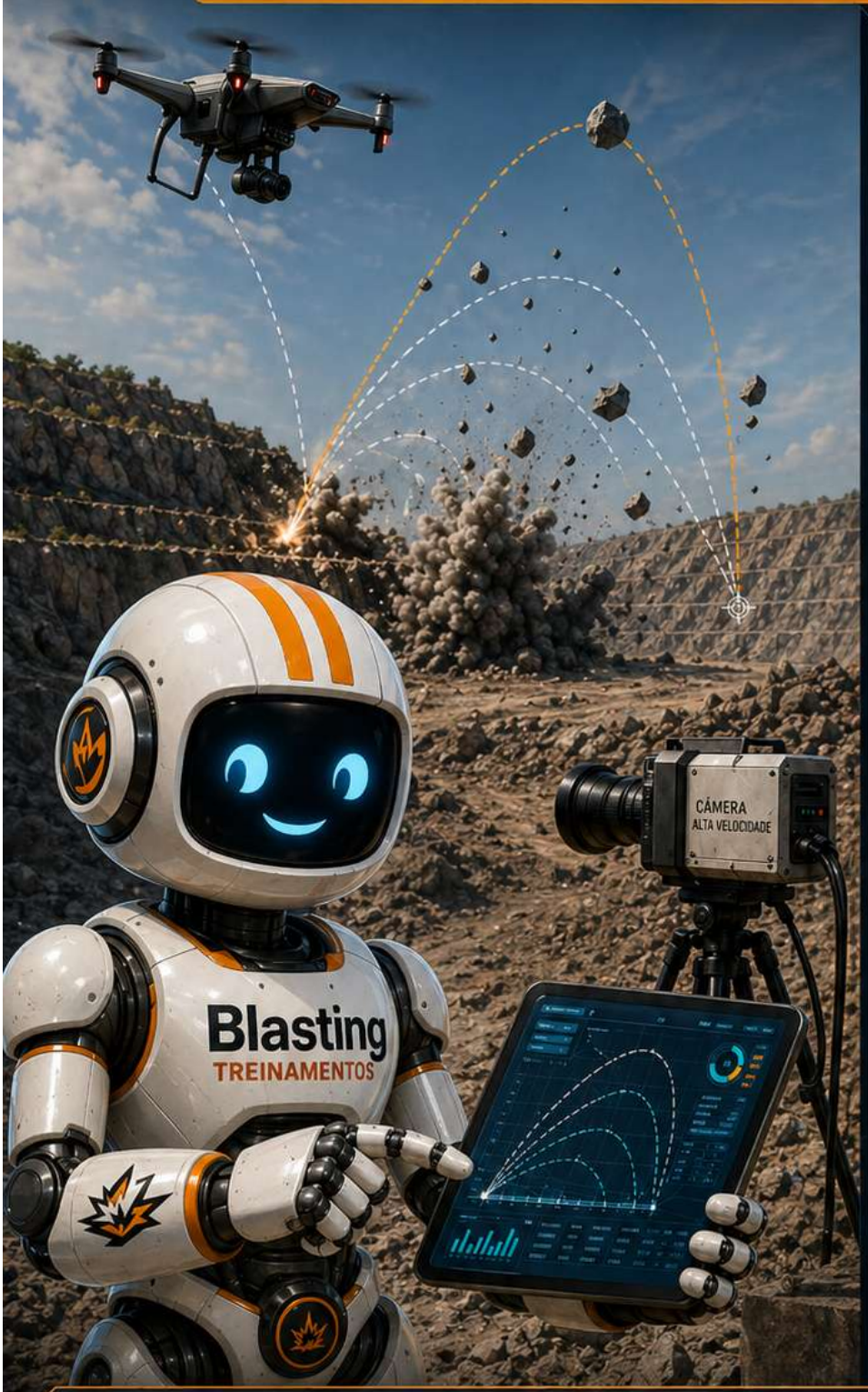
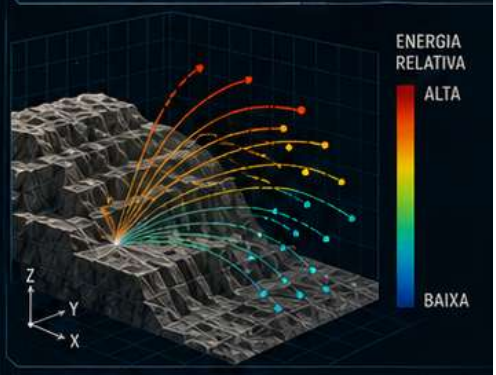
APOSTILA DO CURSO

# ULTRALANÇAMENTO NO DESMONTE DE ROCHAS

## FUNDAMENTOS, MECANISMOS E CONTROLE DE FLYROCK



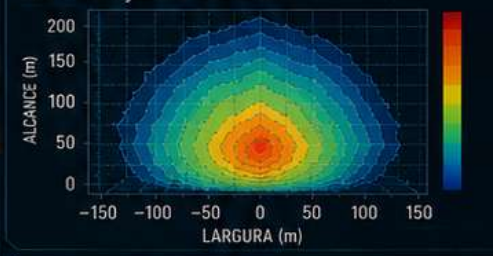

SIMULAÇÃO DE FLYROCK



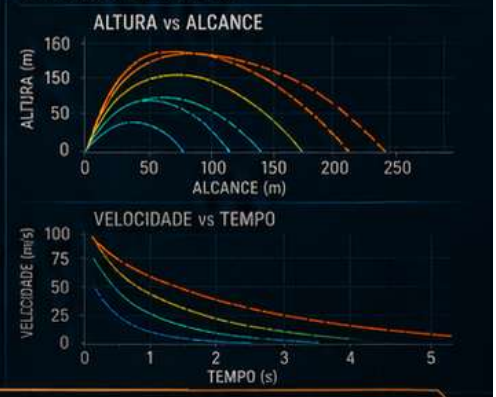

VETORES DE VELOCIDADE




DISTRIBUIÇÃO DE ALCANCE




GRÁFICOS DE ANÁLISE




INSTRUTOR: **BRUNO PIMENTEL**

ATUALIZAÇÃO: **JUN/2026**

# Sumário


Módulo 1. Introdução Geral ..... 5
1.1. Abertura do módulo e contextualização do tema ..... 5
1.2. Apresentação do curso e propósito da formação ..... 9
1.3. O desmonte de rochas com explosivos e seus principais riscos ..... 11
1.4. Importância do controle de flyrock ..... 14
1.5. Conceitos iniciais sobre desmonte, plano de fogo e controle da energia ..... 17
1.6. Energia útil, energia desperdiçada e origem dos efeitos indesejados ..... 20
1.7. Processo básico de detonação e fragmentação da rocha ..... 23
1.8. Variáveis controláveis, variáveis incontroláveis e o desafio do equilíbrio ..... 26
1.9. A natureza imprevisível do flyrock ..... 29
1.10. Diferença entre lançamento esperado, lançamento excessivo e flyrock ..... 32
1.11. Definições técnicas de flyrock e limites do conceito ..... 35
1.12. Conceitos iniciais sobre área de influência, área de segurança e cerco de área ..... 37
1.13. Fechamento do módulo e preparação para os próximos temas ..... 40
Módulo 2. Riscos Associados ao Flyrock ..... 42
2.1 Abertura do módulo e visão geral dos riscos associados ao flyrock ..... 42
2.2 Risco à vida humana e à integridade física ..... 44
2.3 Risco a equipamentos móveis, equipamentos fixos e estruturas ..... 47
2.4 Risco à continuidade operacional ..... 50
2.5 Consequências financeiras, jurídicas e reputacionais ..... 52
2.6 Comparação entre flyrock, vibração e onda aérea ..... 54
2.7 Importância da análise e Lições aprendidas a partir de eventos reais ..... 57
2.8 Subnotificação de eventos e impacto na evolução da engenharia de controle ..... 60
2.9 Fechamento do módulo e preparação para os próximos temas ..... 62
Módulo 3. Normas, Regulamentações e Responsabilidade Técnica ..... 64
3.1 Abertura do módulo e relação entre risco, norma e responsabilidade ..... 64
3.2 Panorama geral das normas e regulamentos aplicáveis ao uso de explosivos e ao controle dos seus efeitos ..... 66
3.3 Referências brasileiras aplicáveis ao tema ..... 68
3.4 Referências internacionais e conceitos operacionais relacionados à área de detonação ..... 76
3.5 Limitações normativas e a dificuldade de estabelecer critérios para o flyrock ..... 79
3.6 Responsabilidade técnica e implicações legais no contexto do flyrock ..... 81
3.7 Controle, rastreabilidade e limites da abordagem normativa no desmonte ..... 83
3.8 Fechamento do módulo e preparação para os próximos temas ..... 85
Módulo 4. Mecanismos de Geração de Flyrock ..... 87
4.1 Abertura do módulo e visão geral dos mecanismos de geração ..... 87
4.2 Conceito de confinamento e falha de confinamento da energia explosiva ..... 89
4.3 Relação entre energia disponível, resistência do maciço e caminho de menor resistência ..... 92
4.4 Mecanismo de face burst ..... 94
4.5 Mecanismo de cratering ..... 96
4.6 Mecanismo de rifling ..... 98

4.7 Ejeção de material pela região do tampão e pelo colar do furo ..... 100
4.8 Direções de projeção: frontal, lateral, posterior e vertical ..... 102
4.9 Diferença entre mecanismos típicos e eventos extremos ..... 106
4.10 Desmontes secundários como caso especial de alto risco ..... 109
4.11 Exemplos práticos e leitura técnica dos mecanismos em campo ..... 111
4.12 Fechamento do módulo e preparação para os próximos temas ..... 113
Módulo 5. Fundamentos Físicos do Flyrock ..... 115
5.1 Abertura do módulo e visão geral dos fundamentos físicos do flyrock ..... 115
5.2 Fundamentos energéticos do desmonte ..... 117
5.3 Geração de velocidade inicial dos fragmentos ..... 120
5.4 Fundamentos balísticos do lançamento de fragmentos ..... 125
5.5 Fatores que afetam a trajetória real ..... 128
5.6 Influência da topografia no alcance e no impacto ..... 130
5.7 Relação entre física, mecanismo de geração e potencial de dano ..... 132
5.8 Limitações práticas da análise física simplificada ..... 135
5.9 Fechamento do módulo e preparação para os próximos temas ..... 137
Módulo 6. Confinamento e SDoB ..... 138
6.1 Abertura do módulo e papel central do confinamento no controle do flyrock ..... 138
6.2 Conceito de confinamento ..... 142
6.3 Conceito de SDoB ..... 145
6.4 Regimes de desmonte em função do confinamento ..... 154
6.5 Relação direta entre confinamento, SDoB e flyrock ..... 157
6.6 Comportamento não linear do sistema ..... 160
6.7 Leitura de campo do confinamento e do SDoB ..... 162
6.8 Limitações do uso isolado do SDoB ..... 166
6.9 Fechamento do módulo e preparação para os próximos temas ..... 169
Módulo 7. Causas do Flyrock ..... 171
7.1 Abertura do módulo e causas principais de flyrock ..... 171
7.2 Causas de projeto ..... 174
7.3 Causas operacionais ..... 178
7.4 Causas geológicas ..... 181
7.5 Fator humano ..... 185
7.6 Causalidade combinada ..... 189
7.7 Fechamento do tema ..... 192
Módulo 8. Controle e Mitigação do Flyrock ..... 194
8.1 Abertura do módulo e lógica do controle do flyrock ..... 194
8.2 Controle de projeto ..... 197
8.3 Controle operacional ..... 201
8.4 Medidas preventivas ..... 205
8.5 Medidas mitigadoras ..... 208
8.6 Controle em áreas sensíveis ..... 211
8.7 Fechamento do módulo e consolidação da lógica de controle ..... 214

Módulo 9. Predição e Modelagem de Flyrock ..... 216
9.1 Abertura do módulo e lógica da predição do flyrock ..... 216
9.2 Classificação dos modelos de predição de flyrock ..... 220
9.3 Modelos clássicos de predição ..... 224
9.4 Bases físicas, variáveis e limitações dos modelos de predição de flyrock ..... 238
9.5 Flyrock como fenômeno probabilístico e fundamentos da modelagem probabilística ..... 242
9.6 Simulação e softwares ..... 246
9.7 Validação com dados reais ..... 249
9.8 Aplicação prática da predição na definição de zona de exclusão (Cerco de área) ..... 252
9.9 Fechamento do módulo e consolidação da lógica da modelagem ..... 256
Módulo 10. Inovações Tecnológicas e Futuras Tendências ..... 258
10.1 Abertura do módulo e evolução tecnológica aplicada ao flyrock ..... 258
10.2 Filmagem e análise por vídeo de alta velocidade ..... 262
10.3 Uso de drones e sistemas visuais ..... 265
10.4 Ferramentas digitais de coleta e análise ..... 268
10.5 Softwares especializados de modelagem ..... 271
10.6 Monitoramento integrado do desmonte ..... 274
10.7 Inteligência artificial e análise de dados aplicadas à predição ..... 277
10.8 Redes neurais e modelos híbridos ..... 280
10.9 Tendências futuras no controle de risco ..... 282
10.10 Fechamento do módulo e consolidação da lógica da inovação tecnológica ..... 284
Módulo 11. Da Predição à Gestão de Risco do Flyrock ..... 286
11.1 Abertura do módulo e transição da previsão para a decisão ..... 286
11.2 Incerteza residual e risco residual no flyrock ..... 289
11.3 Do resultado dos modelos à decisão conservadora ..... 293
11.4 Dados de campo como base para decisões de risco ..... 297
11.5 Cenários de risco e barreiras de controle ..... 302
11.6 Diferença entre prever e gerenciar ..... 307
11.7 Necessidade de incorporar risco, consequência e zona de exclusão ..... 311
11.8 Fechamento do módulo ..... 315
Módulo 12. Conclusão e Síntese Final ..... 317
12.1 Abertura do módulo e sentido do encerramento ..... 317
12.2 Síntese dos conceitos centrais do curso ..... 320
12.3 Revisão integrada das relações entre energia, confinamento, geologia, execução, trajetória e risco ..... 323
12.4 Papel do profissional na prevenção de acidentes ..... 326
12.5 Importância da cultura de segurança ..... 329
12.6 Necessidade de atualização contínua ..... 332
12.7 Encerramento técnico e continuidade dos estudos ..... 335
Referências e Leituras Complementares ..... 338
Resumo Executivo do Curso para Divulgação ..... **Erro! Indicador não definido.**

# Módulo 1. Introdução Geral

## 1.1. Abertura do módulo e contextualização do tema

O desmonte de rochas com explosivos é uma atividade fundamental para o desenvolvimento da mineração e de diversas obras civis. Trata-se de um processo que permite transformar maciços rochosos resistentes em materiais fragmentados, viabilizando escavações, produção mineral, construção de infraestrutura e o avanço de projetos de engenharia em diferentes contextos operacionais.




Na mineração, o desmonte é responsável por permitir o acesso ao minério, tornando a lavra tecnicamente possível e economicamente viável. Em muitos casos, sem o uso de explosivos, a fragmentação de rochas duras seria extremamente lenta, onerosa e operacionalmente limitada. Já nas obras civis, o desmonte está presente em atividades como a construção de rodovias e ferrovias, escavação de túneis, abertura de canais, execução de fundações em rocha e cortes em maciços rochosos, sendo um elemento essencial para a viabilização física dos projetos.

Em todos esses cenários, o objetivo central do desmonte é promover uma fragmentação adequada da rocha e um deslocamento controlado do material, facilitando as etapas subsequentes do processo, como carregamento, transporte e beneficiamento. Dessa forma, o desmonte não deve ser entendido apenas como uma etapa operacional isolada, mas como um processo determinante para a eficiência global do empreendimento.

Entretanto, essa mesma atividade que proporciona ganhos expressivos de produtividade é baseada na liberação de grandes quantidades de energia em um intervalo de tempo extremamente curto. Essa característica torna o desmonte um processo inerentemente complexo, que exige elevado nível de controle técnico, planejamento cuidadoso e execução rigorosamente disciplinada.

Toda detonação produz efeitos. Parte desses efeitos é desejada e essencial para o sucesso da operação, como a fragmentação e o deslocamento do material. No entanto, outra parte corresponde a fenômenos indesejados, que podem gerar impactos relevantes sob o ponto de vista operacional, ambiental e, principalmente, de segurança.

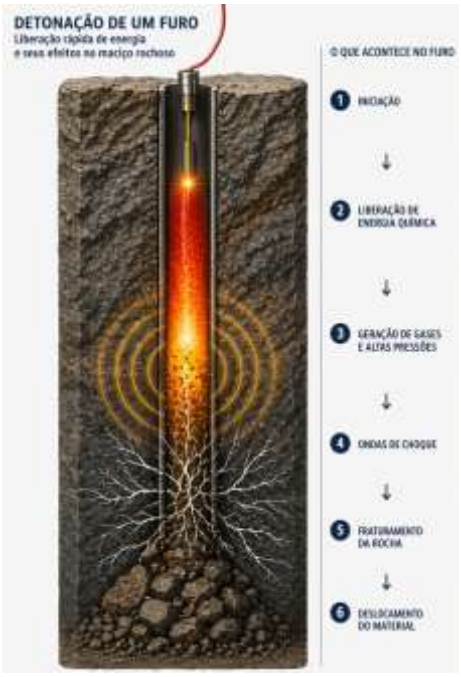
Entre esses fenômenos, o flyrock se destaca como um dos mais críticos. Ele consiste no lançamento de fragmentos rochosos para além da área prevista de controle, podendo atingir equipamentos, estruturas ou pessoas. Esse comportamento está diretamente associado a liberações não controladas da energia do desmonte, muitas vezes influenciadas por fatores como geometria do plano de fogo, qualidade do confinamento, características do maciço rochoso e condições operacionais.




Nesse contexto, é fundamental compreender desde o início que o flyrock não deve ser tratado como um detalhe operacional ou um evento ocasional. Trata-se de um fenômeno central no desmonte de rochas, com potencial de causar danos severos, e que exige entendimento técnico aprofundado, controle adequado e uma abordagem sistemática ao longo de todas as etapas do processo.

## 1.1.1. Energia explosiva: aproveitamento, limitações e efeitos do desmonte

A base do desmonte de rochas com explosivos está na utilização da energia química armazenada nos explosivos, que é liberada de forma extremamente rápida durante a detonação. Essa liberação ocorre em frações de segundo e gera um conjunto de fenômenos físicos de alta intensidade, como ondas de choque, elevadas pressões no interior dos furos e expansão rápida de gases, responsáveis pelo fraturamento e deslocamento do maciço rochoso.




Do ponto de vista operacional, essa energia é extremamente valiosa, pois permite fragmentar grandes volumes de rocha com rapidez, eficiência e, em muitos casos, com excelente relação custo-benefício quando comparada a outros métodos de escavação. No entanto, é fundamental compreender que nem toda a energia liberada pelo explosivo é efetivamente aproveitada para a fragmentação da rocha.

Na prática, o desmonte é um processo naturalmente ineficiente do ponto de vista energético. Apenas uma parcela da energia gerada contribui diretamente para os efeitos desejados, enquanto uma parte significativa é dissipada ou se manifesta de forma não controlada. Essa ineficiência está associada a diversos fatores, como condições geológicas, geometria do plano de fogo, qualidade do confinamento, execução operacional e limitações inerentes ao próprio processo físico.

A parcela de energia efetivamente aproveitada é responsável pelos efeitos desejáveis do desmonte, entre os quais se destacam:

• fragmentação adequada da rocha

• deslocamento controlado do material

• formação de pilha com geometria favorável às operações de carregamento e transporte

Por outro lado, a energia que não é corretamente confinada, direcionada ou distribuída tende a se manifestar por meio de efeitos indesejáveis, que fazem parte do processo, mas devem ser controlados ao máximo. Entre esses efeitos, destacam-se:

- vibração no terreno
- onda aérea
- emissão de poeira
- geração de gases
- dano ao maciço remanescente
- lançamento excessivo
- flyrock




É importante destacar que a presença de efeitos indesejáveis não caracteriza, necessariamente, uma falha total do desmonte, mas sim indica limitações no controle da energia ou oportunidades de melhoria no projeto e na execução. O verdadeiro desafio da engenharia de desmonte não está em liberar a maior quantidade possível de energia, mas sim em controlar como essa energia é utilizada, maximizando seu aproveitamento útil e minimizando sua manifestação de forma descontrolada.

## 1.1.2. O flyrock como fenômeno crítico e a proposta do curso

Dentre os efeitos indesejados, o flyrock merece atenção especial dentro das operações de desmonte, porque reúne características que o colocam entre os riscos mais críticos desse processo. Diferentemente de outros efeitos da detonação, como vibração e onda aérea, que normalmente se propagam de forma indireta, o flyrock envolve o lançamento de fragmentos rochosos com massa e velocidade suficientes para causar impactos diretos. Esses fragmentos podem atingir pessoas, equipamentos e estruturas de maneira imediata, o que eleva significativamente o potencial de risco associado ao fenômeno.




Além do seu potencial de impacto direto, o flyrock se destaca pela alta variabilidade. Sua ocorrência não depende de um único fator isolado, mas sim da interação de múltiplas variáveis que atuam simultaneamente. Entre elas, destacam-se as condições geológicas do maciço rochoso, a qualidade do confinamento, os parâmetros definidos no plano de fogo, a forma como o carregamento é executado em campo e as variações operacionais inerentes ao processo. Essa combinação de fatores torna o comportamento do flyrock difícil de prever com precisão absoluta, reforçando o caráter não linear e sensível do fenômeno.

Essa dificuldade de previsão é amplamente reconhecida na literatura técnica, que destaca que o flyrock está associado a liberações não controladas de energia durante o desmonte, influenciadas tanto por variáveis de projeto quanto por condições reais de campo. Pequenas variações nessas condições podem resultar em diferenças significativas no alcance e na intensidade do lançamento de fragmentos, o que exige uma abordagem conservadora e tecnicamente fundamentada.

Outro aspecto fundamental é o histórico de acidentes associados ao flyrock. Em diversos casos, esse fenômeno está diretamente relacionado a ocorrências graves, incluindo danos materiais relevantes e, em situações mais críticas, lesões ou fatalidades. Isso reforça que o flyrock não deve ser tratado como um simples desvio operacional, mas sim como um fenômeno que exige estudo específico, compreensão aprofundada e uma abordagem sistemática ao longo de todas as etapas do desmonte.

Diante desse cenário, este curso foi desenvolvido com o objetivo de fornecer uma base técnica sólida para a compreensão do flyrock no desmonte de rochas com explosivos. A proposta não se limita à apresentação de definições ou à enumeração de boas práticas. O objetivo central é construir um entendimento estruturado do fenômeno, permitindo que o profissional compreenda não apenas o que acontece, mas por que acontece.

Para isso, ao longo do curso serão abordados os principais elementos que influenciam o flyrock, incluindo seus mecanismos de geração, os fundamentos físicos envolvidos, o papel do confinamento, as causas associadas tanto ao projeto quanto à execução em campo, além das estratégias de controle e mitigação e das limitações inerentes aos modelos de predição.

Este curso representa a primeira etapa dessa jornada de aprendizado. O foco está na compreensão profunda do fenômeno. A partir dessa base, será possível avançar para a segunda etapa, onde em um próximo curso e apostila, poderemos aplicar o conhecimento técnico na gestão de risco e na definição de uma zona de exclusão, transformando a compreensão do flyrock em decisões práticas e seguras no campo.

Ao longo deste curso, o aluno será conduzido de forma progressiva, partindo de conceitos fundamentais até alcançar uma visão integrada do fenômeno. Todo o conteúdo foi estruturado com foco na aplicação prática, na melhoria contínua das operações de desmonte e no fortalecimento de uma cultura de segurança baseada em conhecimento técnico consistente.

# 1.2. Apresentação do curso e propósito da formação

Após compreender o contexto geral do desmonte de rochas e reconhecer o flyrock como um dos riscos mais críticos dessa atividade, é essencial que o aluno tenha clareza sobre a proposta deste curso, seus objetivos e a forma como o conhecimento será construído ao longo da formação.

Este não é um curso voltado apenas à apresentação de conceitos isolados ou recomendações práticas desconectadas. Trata-se de uma formação estruturada, concebida para desenvolver uma compreensão técnica consistente do fenômeno do flyrock, integrando fundamentos teóricos com a realidade operacional de campo. A proposta é conduzir o aluno por uma linha de raciocínio progressiva, que parte dos princípios básicos e evolui até uma visão aplicada, permitindo interpretar situações reais e tomar decisões com maior segurança e embasamento.

O foco central desse curso é proporcionar uma compreensão aprofundada do flyrock como fenômeno físico e operacional. Isso implica não apenas reconhecer sua ocorrência, mas entender de forma clara como ele se origina, quais mecanismos estão envolvidos, quais fatores influenciam sua geração e como a energia explosiva interage com o maciço rochoso. Ao longo do curso, serão explorados aspectos fundamentais como o comportamento da energia no desmonte e o papel do confinamento nos resultados obtidos.

Essa abordagem permite que o aluno desenvolva uma visão técnica integrada, compreendendo o flyrock como resultado de um conjunto de interações entre projeto, execução, características geológicas e comportamento da energia. Esse entendimento é indispensável, pois o controle efetivo do fenômeno depende, antes de tudo, da correta interpretação de suas causas e mecanismos.

Além disso, este curso foi concebido como a base de uma formação mais ampla. Ele representa a primeira etapa de um processo estruturado, que se completa com um segundo curso complementar. A lógica entre os dois cursos é clara e intencional: enquanto esse curso inicial se dedica a entender o fenômeno do flyrock em profundidade, o curso seguinte será voltado para a aplicação prática desse conhecimento na gestão de risco e na definição de zonas de exclusão.

Assim é importante destacar que no próximo curso, o aluno utilizará a base técnica construída aqui para realizar avaliações de risco, estabelecer critérios de segurança, definir limites operacionais e tomar decisões em campo com maior consistência. Essa separação não é apenas didática, mas essencial do ponto de vista técnico, pois não é possível gerenciar adequadamente o risco de um fenômeno que não foi previamente compreendido em sua essência.

Dessa forma, este curso prepara o aluno para ir além da observação do problema, desenvolvendo a capacidade de análise e interpretação necessária para atuar de forma mais segura, consciente e tecnicamente fundamentada no desmonte de rochas com explosivos.

## 1.2.1 Objetivos de aprendizagem e público-alvo

Este curso foi desenvolvido para atender profissionais e estudantes que atuam, ou desejam atuar, em atividades relacionadas ao desmonte de rochas com explosivos, abrangendo diferentes níveis de experiência e formação técnica.

Entre os principais públicos atendidos, destacam-se engenheiros de minas e engenheiros civis, técnicos de mineração, blasters e encarregados de desmonte, profissionais de segurança do trabalho e estudantes das áreas de mineração e áreas correlatas, como geologia, geotecnia, dentre outros. O conteúdo foi estruturado de forma a ser acessível para aqueles que estão iniciando na área, sem abrir mão da profundidade técnica necessária para profissionais mais experientes que buscam aprimoramento e maior embasamento teórico.

Dentro desse contexto, os objetivos de aprendizagem do curso estão diretamente alinhados com o desenvolvimento de uma visão técnica sólida sobre o fenômeno do flyrock. Ao final desta formação, espera-se que o aluno seja capaz de compreender o que é o flyrock e como ele se diferencia de outros efeitos do desmonte, identificar os principais mecanismos responsáveis por sua geração, entender a influência da energia explosiva e do confinamento no comportamento do maciço rochoso e reconhecer as principais causas associadas ao fenômeno.

Além disso, o aluno deverá desenvolver a capacidade de interpretar situações reais de campo com base em princípios técnicos, compreendendo as limitações da previsão do flyrock e adotando uma postura crítica diante

das estratégias de controle e mitigação. Mais do que memorizar conceitos, o curso tem como objetivo formar profissionais capazes de analisar, interpretar e tomar decisões de forma mais segura, consciente e tecnicamente fundamentada.

## 1.2.2 Aplicabilidade profissional do conteúdo

O conhecimento desenvolvido neste curso possui aplicação direta no dia a dia das operações de desmonte de rochas com explosivos, sendo uma ferramenta essencial para a melhoria da qualidade técnica, da segurança e da tomada de decisão em campo.

A compreensão do flyrock permite ao profissional atuar de forma mais consciente e estruturada no planejamento e na execução dos desmontes, contribuindo para a melhoria dos projetos, o ajuste mais adequado dos parâmetros operacionais e a identificação antecipada de situações de risco antes da detonação. Além disso, possibilita uma leitura mais crítica dos resultados obtidos após o desmonte, favorecendo o aprendizado contínuo e a redução da probabilidade de ocorrência de eventos indesejados.

Esse conhecimento também impacta diretamente aspectos mais amplos da operação, como o cumprimento de requisitos legais e normativos, a redução de perdas operacionais e custos associados a incidentes, a melhoria da relação com comunidades e demais stakeholders e o fortalecimento da responsabilidade técnica dos profissionais envolvidos.

Mais do que indicar procedimentos ou apresentar soluções prontas, este curso busca desenvolver a capacidade de compreender o porquê das decisões adotadas. Esse entendimento é fundamental para lidar com a variabilidade natural das operações de desmonte, onde condições reais frequentemente se afastam dos cenários ideais de projeto.

Dessa forma, o aluno passa a estar melhor preparado para atuar com maior segurança, consistência técnica e autonomia, tanto na prevenção quanto na análise de eventos relacionados ao flyrock.

# 1.3. O desmonte de rochas com explosivos e seus principais riscos

Agora que já tivemos uma visão geral do curso, precisamos dar um passo atrás para nos situar no contexto e para isso o primeiro passo é entender que o desmonte de rochas com explosivos, apesar de ser uma ferramenta essencial para a fragmentação e o avanço das operações, é também uma atividade que envolve múltiplos riscos. Esses riscos são inerentes ao próprio processo, uma vez que a detonação promove a liberação súbita de energia e a interação intensa entre explosivos e maciço rochoso.

Para compreender adequadamente o flyrock, é necessário situá-lo dentro desse contexto mais amplo. Ele não é o único efeito adverso gerado por uma detonação, mas se destaca entre os demais pela sua capacidade de causar impactos diretos e imediatos.

Antes de aprofundar especificamente no flyrock, é fundamental que o aluno compreenda o conjunto de efeitos e riscos associados ao desmonte, entendendo como eles se manifestam, como se relacionam e por que exigem controle técnico rigoroso.

## 1.3.1 Efeitos do desmonte e riscos associados

Uma detonação, mesmo quando bem planejada e executada, gera uma série de efeitos físicos inerentes ao uso de explosivos no maciço rochoso. Esses efeitos fazem parte do comportamento natural do desmonte e podem ser classificados como desejáveis, quando contribuem para os objetivos da operação, ou indesejáveis, quando geram impactos adicionais que precisam ser controlados.

Entre os principais efeitos indesejáveis associados ao desmonte de rochas com explosivos, destacam-se a vibração no solo, resultante da propagação de ondas sísmicas que podem causar desconforto e até danos estruturais em áreas próximas; a onda aérea, caracterizada por variações de pressão no ar que provocam ruídos intensos e incômodo em comunidades; a geração de poeira, que afeta a visibilidade, a saúde ocupacional e o meio ambiente; e a emissão de gases provenientes da detonação, que podem representar riscos à saúde, especialmente em condições de ventilação inadequada.




Além desses, também podem ocorrer falhas de detonação e a presença de furos falhados, que representam riscos significativos durante a retomada das operações; deslocamentos inadequados da pilha, comprometendo a eficiência do carregamento e podendo gerar retrabalho; e o flyrock, caracterizado pelo lançamento de fragmentos rochosos para além da área prevista, sendo um dos efeitos mais críticos do ponto de vista de segurança.

Esses efeitos, quando não adequadamente controlados, deixam de ser apenas manifestações físicas do desmonte e passam a se traduzir em riscos reais para a operação, o meio ambiente e a segurança das pessoas.

Do ponto de vista operacional, esses riscos estão relacionados à eficiência e à continuidade das atividades, podendo resultar em retrabalhos, interrupções, redução de produtividade e aumento de custos. No aspecto ambiental, os impactos incluem a dispersão de poeira, a emissão de gases, a propagação de vibrações e ruídos e possíveis danos a estruturas no entorno, afetando diretamente a relação com comunidades e órgãos reguladores.

Já no campo da segurança, os riscos envolvem a integridade física de pessoas e equipamentos, incluindo acidentes durante ou após a detonação, exposição a gases nocivos, interação com furos falhados e, de forma mais crítica, impactos diretos causados por flyrock.




É importante destacar que essas categorias de risco não atuam de forma isolada. Um mesmo evento pode gerar consequências simultâneas nos três aspectos, evidenciando a natureza sistêmica do desmonte de rochas com explosivos. Por isso, o entendimento integrado entre efeitos e riscos é fundamental para uma atuação técnica mais segura, eficiente e responsável.

## 1.3.2 O flyrock como risco crítico no desmonte

Dentro do conjunto de riscos associados ao desmonte de rochas com explosivos, o flyrock ocupa uma posição de destaque e merece atenção diferenciada do ponto de vista técnico e operacional.

Enquanto efeitos como vibração no solo, onda aérea e poeira tendem a se manifestar de forma mais difusa, muitas vezes com comportamento progressivo e impactos indiretos, o flyrock se caracteriza por eventos pontuais, porém com alto potencial de gerar impactos diretos. Ele representa, de forma clara, a materialização física da perda de controle da energia explosiva, resultando no lançamento de fragmentos rochosos com massa, velocidade e trajetória fora do previsto.




Essa característica torna o fenômeno particularmente crítico, pois envolve a possibilidade de impacto direto e imediato. Diferentemente de outros efeitos, o flyrock pode atingir diretamente uma pessoa, colidir com equipamentos em operação ou impactar estruturas de forma instantânea, sem tempo de resposta ou mitigação no momento do evento. Por esse motivo, está frequentemente associado aos acidentes mais graves em operações de desmonte.

O caráter crítico do flyrock se deve à combinação de fatores que ampliam significativamente seu potencial de risco. Em primeiro lugar, destaca-se o impacto direto, onde o contato físico entre fragmentos e alvos expostos pode gerar consequências severas e imediatas. Soma-se a isso a baixa tolerância ao erro, uma vez que pequenas variações no controle da energia, no confinamento ou na execução do carregamento podem resultar em alterações significativas no comportamento do desmonte.

Outro aspecto fundamental é a alta variabilidade do fenômeno. O flyrock depende de múltiplas variáveis interdependentes, como condições geológicas, parâmetros de projeto, qualidade da execução, características do explosivo e eficiência do tampão, o que torna sua ocorrência difícil de prever com precisão absoluta. Essa natureza não linear reforça a necessidade de abordagens conservadoras e baseadas em compreensão técnica sólida.

Por fim, destaca-se o elevado potencial de acidentes graves, incluindo lesões severas, fatalidades e danos materiais expressivos, o que amplia também as implicações legais, ambientais e reputacionais.

Diante desse conjunto de características, o flyrock deve ser tratado como um risco crítico dentro das operações de desmonte de rochas com explosivos, exigindo prioridade no planejamento, rigor na execução e atenção constante na análise e no controle das variáveis envolvidas.

### 1.3.3 Dificuldade de identificação precisa da causa raiz após incidentes

Outro aspecto fundamental do flyrock, que reforça ainda mais sua criticidade, é a dificuldade em identificar com precisão a causa exata de sua ocorrência após um incidente.

Diferentemente de outros efeitos do desmonte, cuja origem pode, em muitos casos, ser analisada de forma mais direta, o flyrock normalmente resulta da combinação de múltiplos fatores atuando simultaneamente. Entre eles, destacam-se variações geológicas não identificadas previamente, pequenas inconsistências no carregamento, falhas localizadas no confinamento e desvios na execução do plano de fogo.

Essa característica multifatorial torna a análise de causa raiz um processo complexo. Após a detonação, parte das evidências é naturalmente perdida ou modificada, seja pela própria fragmentação da rocha, pelo deslocamento do material ou pelas condições do ambiente. Como consequência, a reconstrução completa do evento torna-se limitada, e, em muitos casos, não é possível chegar a uma única explicação conclusiva.

Isso não reduz a importância da análise pós-evento, que continua sendo uma ferramenta essencial para o aprendizado técnico. No entanto, evidencia que o controle do flyrock não pode depender exclusivamente da investigação após a ocorrência, devendo estar fortemente baseado em uma abordagem preventiva.

Nesse sentido, torna-se fundamental adotar práticas como planejamento conservador, controle rigoroso da execução, observação sistemática dos resultados e aprendizado contínuo a partir de cada detonação. Essa postura permite reduzir a dependência de análises retrospectivas e fortalece a capacidade de antecipação e controle dos riscos.

Compreendendo os diferentes efeitos do desmonte e sua tradução em riscos operacionais, ambientais e de segurança, torna-se evidente que o flyrock não é um fenômeno isolado, mas parte de um sistema complexo de interações. Ainda assim, suas características específicas, como o potencial de impacto direto, a baixa tolerância a desvios e a dificuldade de previsão e análise precisa, fazem com que ele se destaque como um dos riscos mais críticos da atividade.

# 1.4. Importância do controle de flyrock

Após compreender que o flyrock é um dos principais riscos associados ao desmonte de rochas, torna-se essencial entender por que o seu controle deve ser tratado como prioridade em todas as etapas da operação.

O flyrock não é apenas um efeito indesejado. Ele representa um risco com potencial de gerar consequências graves e imediatas, afetando diretamente a segurança das pessoas, a integridade de equipamentos, a continuidade da operação e a sustentabilidade do empreendimento.

Diferentemente de outros efeitos do desmonte, que muitas vezes permitem algum nível de tolerância ou mitigação posterior, o flyrock exige uma abordagem preventiva, pois seus impactos, quando ocorrem, tendem a ser diretos e, em muitos casos, irreversíveis.

Neste contexto, o controle do flyrock deve ser entendido como uma responsabilidade técnica, operacional e gerencial, que envolve planejamento adequado, execução rigorosa e tomada de decisão consciente.

## 1.4.1 Proteção da vida humana

A proteção da vida humana é o aspecto mais crítico relacionado ao controle do flyrock.

Fragmentos rochosos lançados durante uma detonação podem atingir pessoas com alta energia, resultando em lesões graves ou fatalidades. Diferentemente de outros riscos, o flyrock não depende de exposição prolongada. Um único evento pode ser suficiente para causar consequências severas.



Esse risco é ainda mais relevante em situações como:

- presença de trabalhadores em áreas próximas
- circulação inadequada de pessoas na zona de influência
- operações em regiões com acesso não controlado
- proximidade de comunidades

Por esse motivo, qualquer estratégia de controle de flyrock deve, antes de tudo, priorizar a eliminação da exposição humana ao risco.

## 1.4.2 Proteção de equipamentos e estruturas

Além do risco às pessoas, o flyrock também representa ameaça significativa para equipamentos e estruturas. Fragmentos lançados podem impactar:



- caminhões fora de estrada
- escavadeiras e carregadeiras
- perfuratrizes
- instalações industriais
- edificações próximas
- linhas de transmissão e outras infraestruturas

Os danos resultantes podem variar desde pequenos impactos até perdas significativas de ativos, dependendo da massa e da velocidade dos fragmentos.

Mesmo quando não há danos estruturais severos, impactos frequentes podem comprometer a confiabilidade dos equipamentos e aumentar custos de manutenção.

## 1.4.3 Continuidade operacional

Eventos de flyrock têm impacto direto na continuidade das operações. Quando ocorre um incidente, é comum que sejam necessárias:

- interrupções temporárias das atividades
- inspeções e investigações
- revisão de procedimentos
- retrabalho em áreas afetadas

Essas interrupções geram perda de produtividade, aumento de custos e atrasos no cronograma. Além disso, eventos recorrentes podem levar à necessidade de adoção de medidas mais restritivas, reduzindo a eficiência operacional do desmonte.

## 1.4.4 Conformidade legal e responsabilidade técnica

O desmonte de rochas com explosivos é uma atividade regulada, sujeita a normas técnicas, exigências legais e fiscalização por órgãos competentes. Eventos de flyrock podem resultar em:

- autuações e multas
- suspensão de atividades
- processos administrativos
- responsabilização civil e criminal

Além disso, o profissional responsável pelo desmonte possui responsabilidade técnica sobre a operação. Isso significa que falhas no controle do flyrock podem gerar implicações diretas para engenheiros, técnicos, blasters e responsáveis pela execução.

## 1.4.5 Reputação da empresa e relação com comunidades

Em operações próximas a áreas habitadas, o flyrock assume uma dimensão ainda mais sensível. Mesmo eventos sem consequências graves podem gerar:

- preocupação e insegurança na comunidade
- perda de confiança na operação
- aumento de reclamações
- pressão de órgãos reguladores

Em casos mais críticos, pode haver:

- danos a propriedades
- repercussão negativa na mídia
- desgaste institucional

A percepção de risco por parte da sociedade tem aumentado ao longo dos anos, e operações que não demonstram controle adequado tendem a enfrentar maior resistência.

## 1.4.6 Abordagem preventiva e proativa no controle do flyrock

Um dos princípios mais importantes no controle do flyrock é reconhecer que esse fenômeno não pode ser tratado de forma reativa. Devido à sua natureza multifatorial, à sua alta variabilidade e à limitação na previsão absoluta de sua ocorrência, o flyrock exige uma abordagem essencialmente preventiva.

Isso significa que o controle não começa no momento da detonação e muito menos após um incidente, mas sim nas etapas anteriores, por meio de um planejamento técnico consistente e de uma execução rigorosa. Entre os principais elementos dessa abordagem, destacam-se o adequado desenvolvimento do plano de fogo, a análise cuidadosa das condições geológicas, a definição de parâmetros conservadores, o controle detalhado da execução em campo e o monitoramento contínuo dos resultados obtidos.

Além da prevenção, é fundamental adotar uma postura proativa ao longo das operações. Isso envolve a capacidade de aprender com eventos anteriores, capacitação constante da equipe, ajustar progressivamente os parâmetros de projeto, revisar práticas operacionais e incorporar melhorias de forma contínua. Essa postura permite não apenas reagir a problemas, mas antecipá-los, reduzindo significativamente a probabilidade de ocorrência de eventos indesejados.

A importância dessa abordagem se torna ainda mais evidente quando se considera que, uma vez ocorrido um evento de flyrock, suas consequências podem ser imediatas e, em muitos casos, irreversíveis. Por isso, o foco deve estar sempre na antecipação e no controle das condições que levam ao fenômeno, e não apenas na resposta após sua ocorrência.

Diante desse contexto, o controle do flyrock deve ser entendido como uma prioridade absoluta dentro das operações de desmonte de rochas com explosivos. Ao longo deste tópico, foi possível observar que suas implicações vão muito além de um simples desvio operacional, envolvendo aspectos humanos, técnicos, econômicos, legais e sociais.

A combinação de impacto direto, baixa tolerância a desvios, alta variabilidade e dificuldade de previsão reforça que o flyrock é um dos riscos mais críticos da atividade, exigindo uma abordagem estruturada, disciplinada e contínua.






## 1.5. Conceitos iniciais sobre desmonte, plano de fogo e controle da energia

Para compreender corretamente o flyrock, é fundamental estabelecer, desde o início, uma base conceitual sólida sobre o funcionamento do desmonte de rochas com explosivos e, principalmente, sobre como a energia é utilizada e controlada nesse processo.

Para seguir, precisamos ter claro que o flyrock é consequência direta da forma como a energia explosiva é gerada, distribuída, confinada e liberada dentro do maciço rochoso. Dessa forma, desmontes bem controlados e desmontes com ocorrência de efeitos indesejados são, essencialmente, resultados diferentes de como essa energia foi gerenciada.

Nesse contexto, o plano de fogo assume um papel central. Ele pode ser entendido como o principal instrumento de controle da energia no desmonte, sendo responsável por definir, de forma técnica e estruturada, como essa energia será aplicada no maciço rochoso.

O plano de fogo é o conjunto de definições técnicas que orienta a execução de um desmonte com explosivos, estabelecendo a forma como a energia será distribuída no interior da rocha. Para isso, ele estabelece como a energia será distribuída no maciço rochoso, definindo parâmetros como:

- posição e profundidade dos furos
- diâmetro de perfuração
- distância entre furos (espaçamento)
- distância até a face livre (afastamento)
- tipo e quantidade de explosivo
- sequência de detonação
- altura e qualidade do tampão

Cada um desses parâmetros influencia diretamente o comportamento da energia explosiva, determinando como ela será dissipada, absorvida ou convertida em fragmentação e deslocamento da rocha. Pequenas variações nesses elementos podem gerar mudanças significativas no resultado do desmonte, reforçando o caráter sensível e não linear do processo.

De forma simplificada, o plano de fogo representa a estratégia adotada para transformar a energia explosiva em trabalho útil, buscando promover uma fragmentação adequada e um deslocamento controlado do material, ao mesmo tempo em que minimiza a ocorrência de efeitos indesejáveis.

Assim, compreender o plano de fogo não significa apenas conhecer seus elementos, mas entender como cada decisão de projeto impacta diretamente o comportamento da energia e, consequentemente, os resultados do desmonte. Essa compreensão é essencial para interpretar o flyrock não como um evento isolado, mas como uma consequência do sistema formado por energia, rocha, projeto e execução.

### 1.5.1 Objetivos do desmonte: fragmentação e deslocamento como resultados centrais

O desmonte de rochas com explosivos possui objetivos bem definidos, que orientam tanto a elaboração do plano de fogo quanto a execução da detonação. Entre esses objetivos, destacam-se a promoção de uma fragmentação adequada da rocha, o deslocamento controlado do material, a facilitação das operações subsequentes, como carregamento e transporte, a manutenção da estabilidade do maciço remanescente e a minimização de efeitos indesejados.

Embora todos esses aspectos sejam importantes, a fragmentação e o deslocamento da rocha se destacam como os principais resultados esperados de um desmonte bem executado, sendo diretamente responsáveis pela eficiência operacional do processo.

A fragmentação refere-se à quebra da rocha em tamanhos adequados para as etapas seguintes. Uma fragmentação insuficiente pode gerar blocos de grandes dimensões, dificultando o carregamento e exigindo retrabalho, enquanto uma fragmentação excessiva pode resultar em material muito fino, com perdas operacionais e aumento de custos.




O deslocamento, por sua vez, corresponde ao movimento da rocha em direção à face livre, formando uma pilha com geometria favorável às operações de carregamento e transporte. Um deslocamento inadequado pode comprometer a produtividade, gerar instabilidades e dificultar a continuidade da operação.

Esses dois resultados estão diretamente relacionados ao controle da energia explosiva. Um desmonte eficiente não é aquele que utiliza mais energia, mas sim aquele que utiliza a energia de forma adequada, confinada e direcionada, de modo a maximizar a fragmentação e o deslocamento desejados.

Quando a energia é corretamente distribuída no maciço rochoso, ela é convertida em trabalho útil, promovendo a quebra e o movimento da rocha de forma controlada. Por outro lado, quando há perda de controle, parte dessa energia deixa de contribuir para esses objetivos e passa a se manifestar em efeitos indesejados, como vibração excessiva, onda aérea e, de forma mais crítica, o lançamento de fragmentos além da área prevista, caracterizando o flyrock.

## 1.5.2 Controle da zona de influência e limitações do planejamento

A zona de influência de uma detonação corresponde à região afetada pela liberação da energia explosiva, abrangendo tanto os efeitos desejados quanto os indesejados do desmonte. Um dos principais objetivos do plano de fogo é justamente controlar essa zona, garantindo que os efeitos permaneçam dentro de limites previsíveis, seguros e compatíveis com a operação. Esse controle envolve:

- a distribuição adequada da energia no maciço
- o direcionamento do deslocamento da rocha
- a contenção da energia por meio do confinamento
- a definição de limites operacionais e de segurança




Quando esses elementos são bem ajustados, a energia é utilizada de forma controlada, e os efeitos do desmonte permanecem dentro da área prevista, assegurando eficiência operacional e proteção das pessoas, dos equipamentos e das estruturas.

Por outro lado, quando há falhas nesse controle, a energia pode se propagar de maneira não desejada, ultrapassando os limites definidos no planejamento. É nesse contexto que surgem diversos efeitos indesejados e, de forma mais crítica, o lançamento de fragmentos além da área prevista, caracterizando o flyrock.

No entanto, é fundamental reconhecer que, embora o plano de fogo seja o principal instrumento de controle do desmonte, ele possui limitações quando confrontado com as condições reais de campo. O planejamento é elaborado com base nas informações disponíveis, como dados geológicos, características do maciço e parâmetros operacionais definidos. Porém, o comportamento real do maciço rochoso é marcado por variabilidade natural, incluindo a presença de fraturas e descontinuidades não mapeadas, variações de resistência e zonas de fraqueza localizadas.

Além disso, a execução em campo também pode introduzir desvios em relação ao planejado, como variações no carregamento dos furos, problemas na qualidade do tampão ou diferenças entre o projeto e a sua aplicação

prática. Esses fatores fazem com que o resultado da detonação nem sempre corresponda exatamente ao previsto no plano de fogo.

É justamente nessa diferença entre planejamento e realidade que muitos efeitos indesejados têm origem. O flyrock, em especial, frequentemente surge dessa combinação entre variabilidade geológica e desvios operacionais, evidenciando que o controle do desmonte não depende apenas de um bom projeto, mas também de uma execução rigorosa, de uma observação atenta em campo e de ajustes contínuos ao longo do tempo.

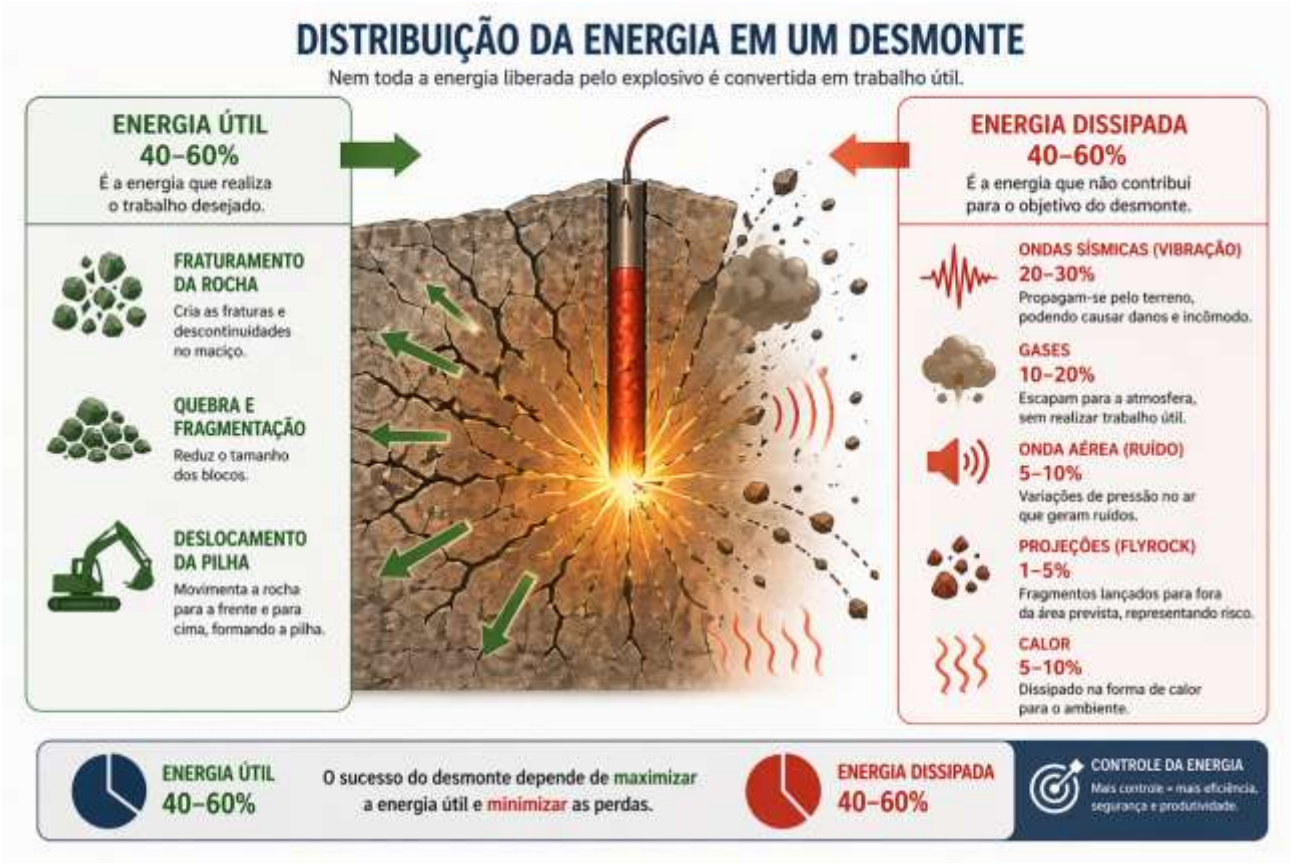
O desmonte de rochas com explosivos é, essencialmente, um processo de controle da energia. O plano de fogo representa a tentativa de organizar e direcionar essa energia para produzir fragmentação e deslocamento adequados, dentro de limites seguros. No entanto, a impossibilidade de controle absoluto, decorrente da variabilidade natural do maciço e das condições operacionais, impõe a necessidade de uma abordagem técnica consciente e disciplinada. Essa compreensão é fundamental para o entendimento do flyrock. Ele não deve ser interpretado como um evento isolado, mas como o resultado de interações complexas entre energia, confinamento, condições do maciço e execução do desmonte.

# 1.6. Energia útil, energia desperdiçada e origem dos efeitos indesejados

Para avançar na compreensão do flyrock, é fundamental entender como a energia explosiva se comporta durante uma detonação e como essa energia é distribuída entre diferentes formas de trabalho.

Uma ideia comum, porém, equivocada, é associar diretamente a quantidade de explosivo utilizada aos resultados do desmonte. Na prática, o fator determinante não é apenas quanto de energia é liberada, mas **como essa energia é utilizada, confinada e direcionada**.

Nem toda a energia liberada por um explosivo é convertida em trabalho útil. Uma parcela significativa é dissipada em diferentes formas, algumas inevitáveis e outras indesejadas. Alguns estudos e teorias indicam que mesmo em uma detonação bem executada temos o aproveitamento de apenas 40 a 60% da energia disponível, sendo o restante da energia dissipada no processo. Em algumas situações mais criticas podemos ter casos de aproveitamento de energia que estão na casa dos 20 a 30%, representando não apenas detonações com um nível de eficiência muito baixo, mas também com alto potencial de riscos e efeitos indesejados.




Compreender essa distribuição energética é essencial para desenvolver uma visão técnica mais precisa do desmonte e, principalmente, para entender a origem dos efeitos indesejados.

## 1.6.1 Conceito de energia útil

A energia útil é aquela parcela da energia explosiva que é efetivamente empregada para atingir os objetivos do desmonte.

Ela está diretamente associada a dois resultados principais:

- **fragmentação da rocha**, por meio da geração e propagação de fraturas
- **deslocamento controlado do material**, em direção à face livre

Quando a energia é bem confinada e distribuída, ela atua de forma eficiente no maciço rochoso, promovendo a quebra da rocha e o seu movimento dentro da área prevista.

A eficiência do desmonte está diretamente relacionada à capacidade de maximizar essa energia útil. Quanto maior a parcela da energia convertida em fragmentação e deslocamento adequados, melhores tendem a ser os resultados operacionais e menor a ocorrência de efeitos indesejados.

## 1.6.2 Energia desperdiçada e suas formas de dissipação

A energia desperdiçada corresponde à parcela da energia explosiva que não é convertida em trabalho útil de fragmentação e deslocamento da rocha, objetivos centrais do desmonte. Essa energia não desaparece, mas se manifesta em diferentes formas, muitas das quais representam efeitos indesejados do processo.

Parte dessa dissipação é inerente ao desmonte e não pode ser completamente eliminada, uma vez que a conversão total da energia em trabalho útil é fisicamente impossível. No entanto, quando a quantidade de energia desperdiçada se torna elevada, isso indica perda de controle no processo, refletindo ineficiências no uso da energia explosiva.




Essa perda de controle está diretamente associada a:

- confinamento inadequado
- distribuição incorreta da carga
- parâmetros de projeto mal ajustados
- condições geológicas desfavoráveis
- falhas na execução

Esses elementos influenciam a forma como a energia é liberada e direcionada no maciço rochoso, podendo aumentar significativamente a parcela de energia que se dissipa de maneira indesejada.

A energia desperdiçada pode se manifestar de diferentes formas, cada uma com características e impactos específicos. Entre as principais, destacam-se a vibração no solo, resultante da propagação de ondas sísmicas que podem afetar estruturas; a onda aérea, caracterizada por variações de pressão no ar que geram ruído e incômodo; a conversão de energia em calor e som, que não contribuem para os objetivos do desmonte; e a geração de poeira e gases, associados à fragmentação e às reações químicas do explosivo, com impactos ambientais e ocupacionais.

Entre todas essas formas de dissipação, o flyrock se destaca por representar a conversão direta da energia explosiva em energia cinética de fragmentos rochosos lançados para além da área prevista. Diferentemente de outros efeitos, que atuam de forma difusa, o flyrock materializa essa energia em movimento de massa com potencial de impacto direto, tornando-se um dos efeitos mais críticos do desmonte.

Dessa forma, compreender o conceito de energia desperdiçada e suas formas de dissipação é essencial para interpretar o flyrock não como um evento isolado, mas como uma manifestação extrema da perda de controle da energia no processo de desmonte.

## 1.6.3 Perda de controle da energia, geração de flyrock e implicações práticas

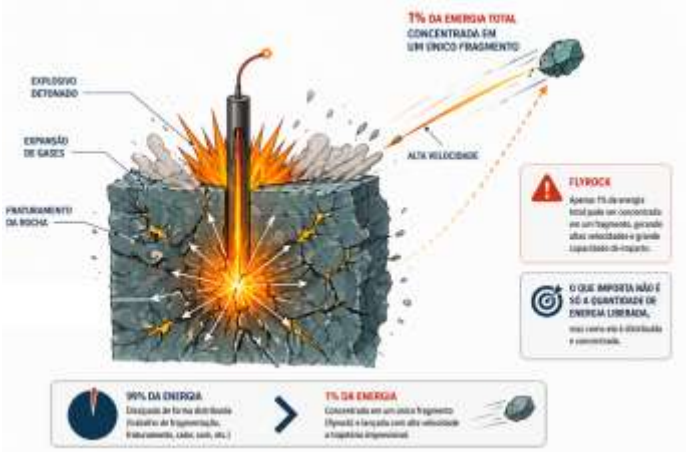
O flyrock está diretamente associado à perda de controle da energia explosiva. Quando a energia não é adequadamente confinada, distribuída ou direcionada, ela pode ser liberada de forma concentrada em determinadas regiões do maciço rochoso, resultando na aceleração excessiva de fragmentos.

Essa situação pode ocorrer, por exemplo, em casos de:

- tamponamento inadequado
- presença de descontinuidades que facilitam a fuga de energia
- afastamento insuficiente

- carregamento irregular
- falhas localizadas no plano de fogo

Esse comportamento reforça que o flyrock não é um evento aleatório, mas uma consequência direta da forma como a energia é liberada e interage com o maciço rochoso. Ele representa, na prática, um desvio no caminho esperado da energia, evidenciando falhas no seu controle.




Um aspecto particularmente importante é que o flyrock pode estar associado a uma fração relativamente pequena da energia total liberada na detonação. Ainda assim, essa pequena parcela pode gerar consequências desproporcionalmente graves. Isso ocorre porque, nesse fenômeno, a energia não está distribuída de forma difusa, mas concentrada em fragmentos específicos, que podem adquirir altas velocidades, trajetórias imprevisíveis e elevada capacidade de impacto.

Mesmo um único fragmento lançado com energia suficiente pode causar danos severos a equipamentos, destruição localizada de estruturas e, em casos mais críticos, lesões graves ou fatalidades. Esse comportamento evidencia que o problema não está apenas na quantidade total de energia envolvida no desmonte, mas na forma como essa energia é distribuída e, principalmente, concentrada.

Por esse motivo, o controle do desmonte deve ir além da busca por eficiência global, incorporando também a prevenção de concentrações localizadas de energia que possam gerar eventos críticos. Essa abordagem exige atenção tanto ao projeto quanto à execução, reforçando a necessidade de disciplina operacional e análise contínua dos resultados.




A análise conjunta da energia útil e da energia desperdiçada permite compreender que o desmonte de rochas com explosivos é, essencialmente, um processo de gestão da energia. Quando a maior parte da energia é convertida em fragmentação e deslocamento controlado, o desmonte tende a ser eficiente e seguro. Por outro lado, à medida que aumenta a parcela de energia desperdiçada, cresce também a probabilidade de ocorrência de efeitos indesejados, incluindo o flyrock.

Esse entendimento reforça uma ideia central deste curso: o controle do flyrock não depende apenas da quantidade de explosivo utilizada, mas principalmente da forma como a energia é liberada, confinada e direcionada no maciço rochoso.

# 1.7. Processo básico de detonação e fragmentação da rocha

Para compreender o comportamento do flyrock, é essencial entender, ainda que em nível introdutório, como ocorre o processo de detonação e de que forma a energia liberada interage com o maciço rochoso.

A detonação não é um evento simples ou instantâneo do ponto de vista físico. Embora ocorra em frações de segundo, ela envolve uma sequência de processos altamente complexos, que se desenvolvem de maneira quase simultânea e interdependente.

Esses processos incluem desde a liberação inicial da energia até a fragmentação e o deslocamento da rocha. O resultado final do desmonte, incluindo a ocorrência ou não de efeitos indesejados como o flyrock, depende diretamente da forma como essas etapas se desenvolvem e interagem entre si.




Compreender essa sequência é fundamental para formar a base necessária ao entendimento dos mecanismos de geração do flyrock, que serão aprofundados nos módulos seguintes.

## 1.7.1 Detonação inicial e pressurização do furo

O processo de detonação se inicia com a ativação do sistema de iniciação, que tem o propósito de iniciar a carga principal de explosivo localizada dentro do furo.




Nesse momento, com a iniciação do explosivo inicia uma reação em cadeia, caracterizada por uma transformação química extremamente rápida, que gera:

- altas pressões
- elevadas temperaturas
- grande volume de gases

Essa reação se propaga ao longo da coluna, dando continuidade à detonação de toda a carga de explosivo dentro do furo, produzindo uma rápida pressurização do seu interior.

A pressão gerada pode atingir valores extremamente elevados, exercendo forças intensas sobre as paredes do furo e iniciando a interação direta com o maciço rochoso.

Essa etapa é fundamental, pois define a forma como a energia começa a ser transferida para a rocha.

## 1.7.2 Propagação da onda de choque

Imediatamente após a detonação inicial, forma-se uma onda de choque que se propaga radialmente a partir do furo para o interior do maciço rochoso.




Essa onda de choque é caracterizada por:

- altas pressões
- velocidades muito elevadas
- capacidade de gerar deformações intensas na rocha

Ao se propagar, a onda de choque comprime o material rochoso, criando tensões que podem exceder a resistência da rocha, iniciando o processo de ruptura.

Essa fase ocorre em um intervalo extremamente curto de tempo e é responsável por parte significativa da fragmentação inicial.

## 1.7.3 Formação de fraturas

Com a passagem da onda de choque, o maciço rochoso sofre tensões que levam à formação de fraturas.




A formação e a propagação dessas fraturas são influenciadas por diversos fatores, como:

- propriedades mecânicas da rocha
- presença de falhas, juntas e fraturas naturais
- nível de confinamento
- distribuição da energia explosiva

Essa etapa é fundamental para a fragmentação, pois define como a rocha será dividida em blocos de diferentes tamanhos.

## 1.7.4 Expansão dos gases

Após a passagem da onda de choque, os gases gerados pela detonação passam a exercer papel dominante no processo. Esses gases, sob alta pressão, expandem-se rapidamente, ocupando o espaço criado pelas fraturas e exercendo forças adicionais sobre os blocos de rocha.




Essa expansão é responsável por:

- ampliar as fraturas existentes
- promover o deslocamento dos fragmentos
- direcionar o movimento da rocha em direção à face livre

Diferentemente da onda de choque, que atua de forma quase instantânea, a expansão dos gases ocorre em um intervalo de tempo ligeiramente maior, mas ainda muito curto.

Essa fase é essencial para transformar a fragmentação em movimento, ou seja, para converter energia em deslocamento controlado.

## 1.7.5 Deslocamento da rocha

O deslocamento da rocha é o resultado combinado das etapas anteriores. Os fragmentos gerados são impulsionados pela expansão dos gases e se movem em direção à região de menor resistência, geralmente a face livre do desmonte, formando a pilha de material desmontado.




Esse movimento depende de fatores como:

- direção e intensidade da energia
- presença e geometria da face livre
- nível de confinamento
- distribuição das fraturas

Quando o processo ocorre de forma controlada, o material se desloca dentro da área prevista, resultando em uma pilha adequada para as etapas seguintes da operação.

No entanto, quando há perda de controle, parte dos fragmentos pode adquirir velocidades e direções não previstas, resultando em lançamentos excessivos ou flyrock.

## 1.7.6 Como essas etapas se relacionam com o risco de flyrock

O flyrock não é resultado de uma única etapa isolada do processo de detonação, mas sim da interação entre todas as fases que compõem o desmonte de rochas com explosivos.

Ele pode surgir quando há desequilíbrios em qualquer uma dessas etapas, como em situações de pressurização excessiva em regiões com baixo confinamento, propagação desigual da onda de choque, presença de fraturas que direcionam a energia de forma não controlada, expansão dos gases por caminhos preferenciais ou ausência e insuficiência de contenção na parte superior do furo.

Nessas condições, a energia deixa de ser distribuída de forma homogênea e passa a se concentrar em determinadas regiões ou fragmentos específicos. Como resultado, esses fragmentos podem adquirir velocidade suficiente para se comportar como projéteis, caracterizando o flyrock.

Dessa forma, compreender as etapas da detonação não é apenas um exercício teórico, mas uma ferramenta essencial para identificar situações de risco, interpretar resultados de campo e melhorar o controle do desmonte de forma consistente.

O processo de detonação e fragmentação da rocha envolve uma sequência de eventos altamente dinâmicos, que ocorrem em frações de segundo, mas que determinam todo o comportamento do desmonte. A interação entre detonação, propagação da onda de choque, formação de fraturas, expansão dos gases e deslocamento da rocha define não apenas a eficiência da fragmentação, mas também o nível de controle sobre os efeitos gerados.

# 1.8. Variáveis controláveis, variáveis incontroláveis e o desafio do equilíbrio

Ao longo dos tópicos anteriores, ficou claro que o desmonte de rochas com explosivos envolve a interação entre energia, maciço rochoso e execução operacional. No entanto, um dos aspectos mais importantes para o entendimento do processo é reconhecer que nem todos os fatores envolvidos podem ser controlados da mesma forma.

O desmonte é, essencialmente, um exercício de equilíbrio. De um lado, existem variáveis que podem ser definidas e ajustadas pelo projeto. De outro, existem fatores que não podem ser completamente controlados, apenas conhecidos, monitorados e, quando possível, compensados.

É justamente nessa interação entre o que pode ser controlado e o que é incerto que reside grande parte da complexidade do desmonte e, consequentemente, do controle do flyrock.

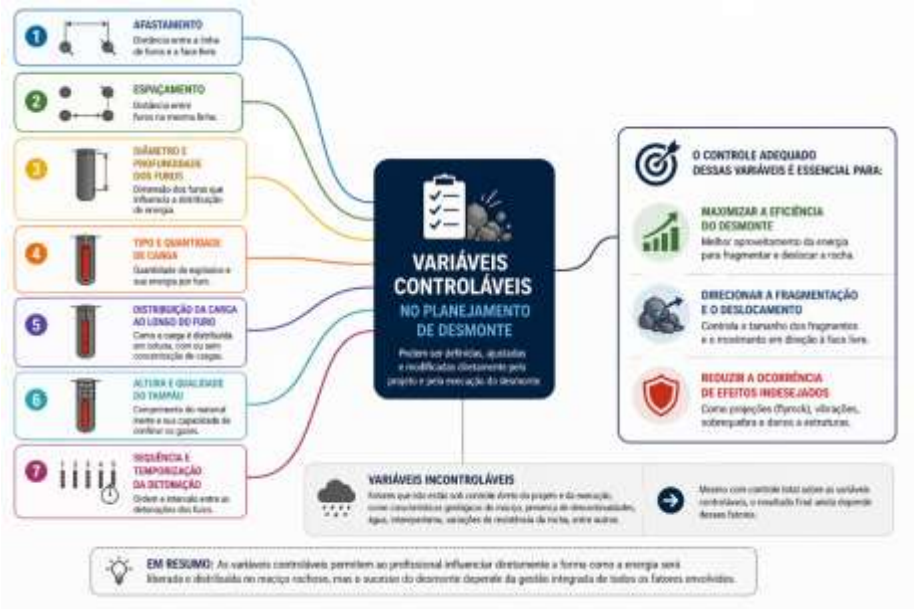
Compreender esse equilíbrio é fundamental para desenvolver uma postura técnica adequada, evitando a ideia equivocada de que existe uma "receita fixa" aplicável a todas as situações.

## 1.8.1 Variáveis controláveis e incontroláveis no desmonte

As variáveis controláveis são aquelas que podem ser definidas, ajustadas e modificadas diretamente pelo projeto e pela execução do desmonte.

Entre as principais variáveis controláveis, destacam-se:

- Afastamento (distância entre linhas de furos ou entre a primeira linha e a face livre)
- Espaçamento (distância entre furos)
- diâmetro e profundidade dos furos
- tipo e quantidade de explosivo
- distribuição da carga ao longo do furo
- altura e qualidade do tampão
- sequência e temporização da detonação




Essas variáveis permitem ao profissional influenciar diretamente a forma como a energia será liberada e distribuída no maciço rochoso.

O controle adequado dessas variáveis é essencial para:

- maximizar a eficiência do desmonte
- direcionar a fragmentação e o deslocamento
- reduzir a ocorrência de efeitos indesejados

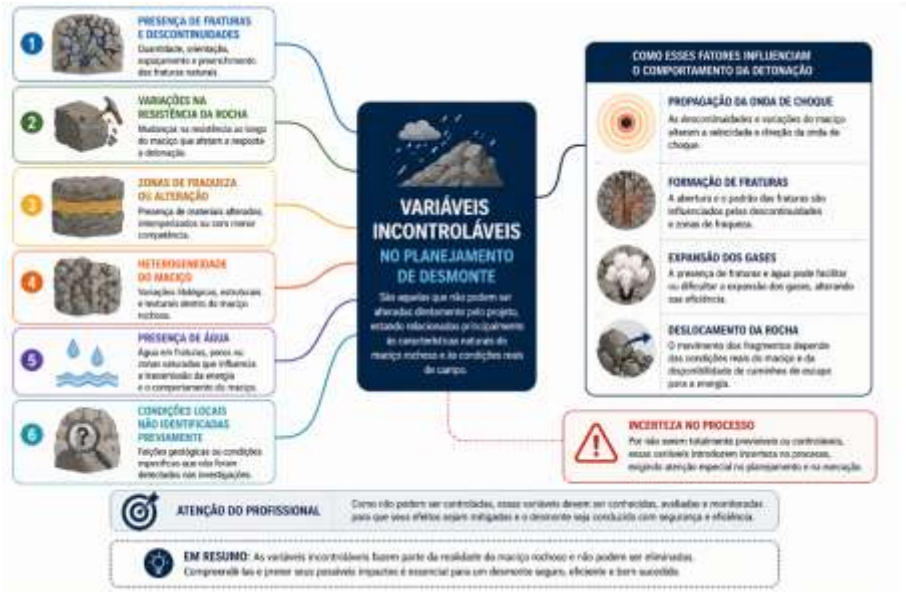
No entanto, mesmo com controle total sobre essas variáveis, o resultado final ainda depende de outros fatores que não estão sob controle direto.

## 1.8.2 O que são variáveis incontroláveis

As variáveis incontroláveis são aquelas que não podem ser alteradas diretamente pelo projeto, estando relacionadas principalmente às características naturais do maciço rochoso e às condições reais de campo.

Entre essas variáveis, destacam-se:

- presença de fraturas e descontinuidades
- variações na resistência da rocha
- zonas de fraqueza ou alteração
- heterogeneidade do maciço
- presença de água
- condições locais não identificadas previamente




Esses fatores podem influenciar significativamente o comportamento da detonação, afetando:

- a propagação da onda de choque
- a formação de fraturas
- a expansão dos gases
- o deslocamento da rocha

Por não serem totalmente previsíveis ou controláveis, essas variáveis introduzem incerteza no processo, exigindo atenção especial no planejamento e na execução.

## 1.8.3 Interação entre projeto, condições reais e experiência local

O resultado de um desmonte de rochas não é determinado exclusivamente pelo plano de fogo, mas sim pela interação entre o projeto e as condições reais do maciço rochoso.

O plano de fogo representa uma intenção técnica, construída com base em dados disponíveis, parâmetros definidos e experiências anteriores. No entanto, ao ser aplicado em campo, esse plano passa a interagir com um ambiente naturalmente variável, que pode apresentar diferenças significativas em relação ao que foi previsto durante o planejamento.

Essa interação entre projeto e realidade pode gerar comportamentos distintos do esperado, como variações na fragmentação, mudanças na direção do deslocamento da rocha e liberação não controlada de energia. É justamente nesse descompasso entre o que foi projetado e o que ocorre em campo que muitos efeitos indesejados têm origem, incluindo o flyrock.

Dessa forma, o sucesso do desmonte não depende apenas da qualidade do projeto, mas também da capacidade de interpretar as condições reais e adaptar o plano às características específicas do maciço rochoso.

Nesse contexto, a experiência local assume um papel fundamental. O conhecimento acumulado sobre uma determinada área permite ao profissional reconhecer padrões de comportamento do maciço, antecipar possíveis desvios em relação ao projeto, ajustar parâmetros de forma mais eficiente e identificar sinais de risco antes da detonação.

Essa experiência não substitui o conhecimento técnico, mas atua como um complemento essencial, tornando a tomada de decisão mais consistente e alinhada com a realidade operacional. Operações que mantêm histórico bem documentado e realizam análise contínua de resultados tendem a apresentar maior controle sobre o desmonte, reduzindo a ocorrência de efeitos indesejados.

## 1.8.4 Monitoramento contínuo e Abordagem conservadora

Diante da impossibilidade de controlar completamente todas as variáveis envolvidas no desmonte de rochas com explosivos, o processo deve ser entendido como dinâmico, exigindo monitoramento contínuo e ajustes sucessivos ao longo do tempo.

Após cada detonação, é fundamental avaliar aspectos como a qualidade da fragmentação, o comportamento do deslocamento da rocha, a presença de efeitos indesejados e possíveis desvios em relação ao que foi previsto no plano de fogo. Essa análise não deve ser vista como uma etapa isolada, mas como parte de um ciclo contínuo de melhoria.

As informações obtidas em campo devem ser utilizadas para ajustar parâmetros do plano de fogo, corrigir falhas de execução e adaptar o projeto às condições reais do maciço. Esse ciclo de planejamento, execução, avaliação e ajuste é essencial para aumentar a previsibilidade dos resultados, melhorar o desempenho operacional e reduzir a ocorrência de eventos indesejados, incluindo o flyrock.

No entanto, mesmo com monitoramento e ajustes constantes, permanece um nível inerente de incerteza associado às variáveis incontroláveis. Por esse motivo, a adoção de uma abordagem conservadora deve ser tratada como um princípio fundamental de segurança.

Uma abordagem conservadora implica tomar decisões que priorizem a redução de risco, especialmente em situações onde há dúvida ou falta de informação completa. Isso pode envolver a escolha de parâmetros mais seguros, maior atenção ao confinamento, controle rigoroso da execução, definição adequada de áreas de segurança e a prevenção de exposições desnecessárias.

Esse posicionamento é particularmente relevante no contexto do flyrock, onde pequenas variações podem resultar em consequências significativas. Nesses casos, a busca por máxima eficiência não pode se sobrepor à necessidade de segurança.

Os conceitos apresentados neste tópico reforçam que o desmonte de rochas não é um processo completamente controlável, mas sim um sistema complexo que exige equilíbrio entre variáveis ajustáveis e fatores incertos. Compreender essa dinâmica é essencial para abandonar a ideia de soluções universais e desenvolver uma abordagem técnica baseada em análise, adaptação e aprendizado contínuo.

Esse entendimento também reforça que o controle do flyrock não depende apenas de parâmetros de projeto, mas da capacidade de interpretar o comportamento real do desmonte e tomar decisões adequadas diante da variabilidade presente em campo.

# 1.9. A natureza imprevisível do flyrock

Ao longo dos tópicos anteriores, foram apresentados os fundamentos do desmonte de rochas, o comportamento da energia explosiva e a influência das variáveis controláveis e incontroláveis no resultado final da detonação.

A partir dessa base, é possível avançar para um dos conceitos mais importantes deste curso: a natureza imprevisível do flyrock.

É fundamental compreender que o flyrock não pode ser tratado como um fenômeno totalmente previsível ou plenamente determinístico. No entanto, isso não significa que ele seja aleatório ou que esteja fora do alcance da engenharia.

O desafio está justamente em entender esse equilíbrio: o flyrock pode ser estudado, compreendido e controlado até certo ponto, mas não pode ser previsto com precisão absoluta em todas as situações.

Essa compreensão marca uma mudança importante na forma de pensar o desmonte, saindo de uma lógica de controle absoluto para uma abordagem mais realista e segura.

## 1.9.1 Limitações da previsibilidade e compreensão do fenômeno

A dificuldade de prever o flyrock com precisão absoluta está diretamente relacionada à complexidade do processo de detonação. Como já discutido ao longo dos tópicos anteriores, o desmonte de rochas envolve a interação simultânea de diversos fatores, como a energia explosiva, o confinamento, as características do maciço rochoso, as condições de execução e a variabilidade operacional.

Cada um desses fatores pode apresentar variações significativas, mesmo dentro de uma mesma área de operação. Pequenas mudanças nas condições locais, como variações geológicas, falhas pontuais no tampão, diferenças no carregamento dos furos ou a presença de descontinuidades não mapeadas, podem alterar de forma relevante o comportamento da detonação.

Essa alta sensibilidade às condições locais torna inviável garantir previsões exatas sobre o alcance, a trajetória e o comportamento dos fragmentos em todos os casos. O desmonte é um sistema dinâmico e não linear, onde pequenas variações podem produzir efeitos desproporcionais, especialmente no contexto do flyrock.

Nesse cenário, é fundamental diferenciar dois níveis de entendimento: a compreensão do fenômeno e a previsão exata de cada evento.

Compreender o fenômeno significa conhecer os mecanismos de geração do flyrock, identificar os fatores que aumentam ou reduzem sua probabilidade e reconhecer as condições que favorecem sua ocorrência. Esse nível de entendimento é essencial para o exercício da engenharia e pode ser desenvolvido de forma consistente por meio de estudo, prática e análise de resultados.



Por outro lado, prever exatamente cada evento implicaria determinar com precisão quais fragmentos serão lançados, com que velocidade, em qual direção e até que distância. Na prática, esse nível de previsão não é possível de forma confiável, devido à variabilidade inerente ao sistema.

Dessa forma, o objetivo da engenharia no contexto do flyrock não deve ser a busca por previsões absolutas, mas sim o desenvolvimento de um entendimento técnico sólido que permita controlar o processo, reduzir incertezas e minimizar riscos de forma consistente.

## 1.9.2 Incertezas geológicas, operacionais e limites do controle em campo

As incertezas geológicas e operacionais desempenham papel central na imprevisibilidade do flyrock e representam um dos principais desafios para o controle do desmonte de rochas com explosivos.

Do ponto de vista geológico, o maciço rochoso raramente é homogêneo. Ele pode apresentar fraturas naturais, planos de fraqueza, variações de resistência, zonas alteradas e presença de água. Essas características influenciam diretamente a forma como a energia explosiva se propaga, como as fraturas se desenvolvem e como

a rocha responde à detonação. Mesmo com investigações prévias, nem todas essas condições podem ser identificadas com precisão, o que introduz incertezas relevantes no comportamento do desmonte.




Do ponto de vista operacional, também existem variáveis que não são totalmente controláveis. Variações no carregamento dos furos, diferenças na qualidade do tampão, desvios na execução do plano de fogo e interferências durante a preparação podem alterar a forma como a energia é distribuída e liberada no maciço. Essas variações, muitas vezes pequenas, podem gerar diferenças significativas no resultado final.

A combinação dessas incertezas cria um cenário em que o comportamento da detonação não pode ser completamente antecipado. Mesmo com um bom planejamento, equipamentos adequados e uma equipe experiente, o controle do desmonte possui limites práticos.




O plano de fogo define uma intenção técnica clara, mas sua execução está sujeita às condições reais encontradas em campo, às limitações operacionais e a interferências não previstas. Além disso, a própria natureza do processo, que ocorre em milissegundos e envolve a liberação de grandes quantidades de energia, torna inviável qualquer tipo de intervenção em tempo real.

Dessa forma, o controle do flyrock é necessariamente indireto. Ele depende das decisões tomadas antes da detonação, da qualidade da execução e da capacidade de antecipar cenários de risco com base em conhecimento técnico e experiência prática.




Reconhecer esses limites é fundamental para evitar excesso de confiança no controle do processo e para adotar práticas mais seguras, consistentes e alinhadas com a realidade operacional. Esse entendimento reforça a necessidade de uma abordagem baseada em prevenção, monitoramento e gestão de risco, em vez da busca por controle absoluto.

## 1.9.3 Prevenção como melhor estratégia inicial

Diante da impossibilidade de previsão absoluta, a estratégia mais eficaz para lidar com o flyrock é a prevenção.

A prevenção se baseia em:

- compreensão dos fatores que influenciam o fenômeno
- adoção de parâmetros de projeto adequados
- controle rigoroso da execução
- definição de condições seguras de operação
- redução da exposição ao risco

Além disso, a prevenção envolve uma mudança de mentalidade. Em vez de buscar eliminar completamente o fenômeno ou prever cada detalhe, o profissional deve focar em:

- reduzir a probabilidade de ocorrência
- limitar as consequências caso ocorra
- criar barreiras de segurança

Aqui é importante entendermos que a natureza imprevisível do flyrock é um dos aspectos mais importantes a serem compreendidos no desmonte de rochas com explosivos. Esse entendimento não deve ser visto como uma limitação da engenharia, mas como um ponto de partida para uma abordagem mais madura e realista.

Ao reconhecer que não é possível prever tudo com precisão absoluta, o profissional passa a adotar estratégias mais eficazes, baseadas em prevenção, controle e gestão de risco. Essa mudança de perspectiva é essencial para avançar no entendimento do flyrock e para desenvolver práticas mais seguras e consistentes no desmonte de rochas.

# 1.10. Diferença entre lançamento esperado, lançamento excessivo e flyrock

Um dos pontos mais importantes para o entendimento do flyrock é estabelecer uma distinção clara entre os diferentes tipos de movimento da rocha gerados durante o desmonte.

Nem todo material que se desloca além do esperado representa, necessariamente, um evento de flyrock. O deslocamento da rocha faz parte do próprio objetivo do desmonte, sendo essencial para a formação da pilha e para a continuidade das operações. No entanto, quando esse movimento ocorre de forma inadequada ou ultrapassa limites de segurança, ele passa a representar um risco.

Diferenciar corretamente o que é um lançamento normal, um lançamento excessivo e um ultralançamento (flyrock) é fundamental para evitar interpretações equivocadas, melhorar a análise dos resultados do desmonte e orientar decisões mais seguras.

## 1.10.1 Lançamento esperado ou normal

O lançamento esperado, ou normal, é aquele que faz parte do comportamento planejado do desmonte.

Durante a detonação, a rocha fragmentada é impulsionada em direção à face livre, formando uma pilha com geometria adequada para o carregamento e transporte.



Esse movimento é desejado e controlado pelo plano de fogo, que busca:

- direcionar o deslocamento do material
- limitar a área ocupada pela pilha
- evitar retrocesso excessivo
- garantir condições operacionais favoráveis

Dentro desse contexto, o lançamento da rocha não é um problema, mas sim um indicador de que a energia está sendo utilizada para produzir o resultado esperado.

## 1.10.2 Lançamento excessivo

O lançamento excessivo ocorre quando o material se desloca além do previsto no projeto, mas ainda permanece dentro de uma área considerada operacionalmente segura.



Nesse caso, pode haver:

- avanço maior da pilha
- projeção de fragmentos além da área planejada
- dificuldades operacionais no carregamento

O lançamento excessivo indica que houve algum desbalanceamento no desmonte, que pode estar relacionado a:

- excesso de energia em determinadas regiões
- confinamento inadequado
- parâmetros de projeto não otimizados
- variações nas condições do maciço

Apesar de não representar, necessariamente, um risco imediato à segurança fora da área de operação, o lançamento excessivo é um sinal de que o controle do desmonte pode ser melhorado.

## 1.10.3 Ultralançamento ou flyrock

O ultralançamento, ou flyrock, ocorre quando fragmentos de rocha são lançados para além dos limites de segurança definidos para a detonação.



Nesse caso, o material atinge áreas onde não deveria estar presente, podendo representar risco direto a pessoas, equipamentos, estruturas e áreas externas à operação.

O flyrock se caracteriza não apenas pela distância percorrida, mas pelo fato de ultrapassar os limites de controle e segurança.

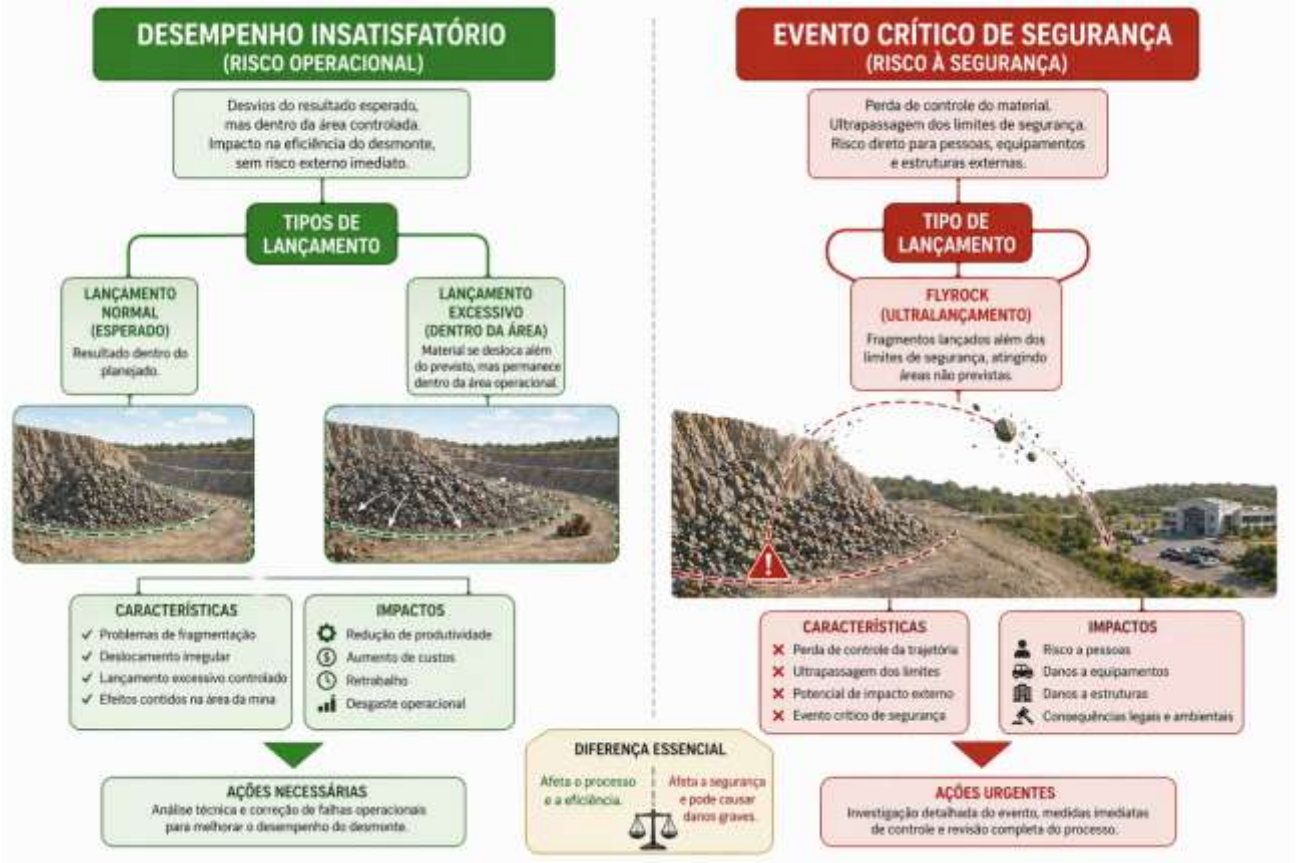
Diferentemente do lançamento excessivo, que ainda pode estar contido dentro da área operacional, o flyrock representa uma falha crítica no controle da energia e do desmonte.

## 1.10.4 Desempenho operacional, níveis de lançamento e implicações para a segurança

É fundamental distinguir entre um desmonte com desempenho insatisfatório e um evento crítico de segurança. Nem todo desvio operacional representa, necessariamente, um risco grave, e essa diferenciação é essencial para orientar corretamente as ações técnicas.

Um desmonte pode apresentar problemas como fragmentação inadequada, deslocamento irregular ou até lançamento excessivo de material, sem que isso implique, obrigatoriamente, um evento crítico. Nesses casos, existem falhas operacionais que devem ser corrigidas, pois afetam a eficiência do processo, mas os efeitos permanecem dentro da área controlada, sem risco direto para pessoas, equipamentos ou estruturas externas.

Por outro lado, o flyrock caracteriza um evento crítico, pois envolve perda de controle da trajetória dos fragmentos, ultrapassagem dos limites de segurança e potencial de impacto direto fora da área prevista. Essa diferença não é apenas técnica, mas também operacional e de segurança, pois define o nível de prioridade e a urgência das ações corretivas.



A partir dessa distinção, é possível associar os diferentes tipos de lançamento a níveis distintos de risco. O lançamento normal e, em alguns casos, o lançamento excessivo dentro da área controlada estão relacionados ao risco operacional, afetando a produtividade e a qualidade do desmonte, mas sem implicar necessariamente em perigo externo imediato.

O lançamento excessivo, quando começa a se aproximar dos limites operacionais, indica perda parcial de controle e pode evoluir para situações mais críticas caso não sejam realizados ajustes no plano de fogo e na execução. Já o ultralançamento, caracterizado pelo flyrock, representa um risco crítico de segurança, com potencial de causar danos diretos e imediatos, devendo ser tratado como prioridade absoluta.

Essa classificação permite estruturar a análise dos resultados do desmonte, facilitando a identificação do tipo de ocorrência e orientando a tomada de decisão de forma mais precisa. Mais do que avaliar se o desmonte foi eficiente, é necessário compreender se ele foi seguro e se os efeitos permaneceram dentro dos limites previstos.

A distinção entre lançamento normal, lançamento excessivo e flyrock é, portanto, fundamental para a correta interpretação dos resultados do desmonte. Ao compreender essas diferenças, o profissional passa a ter maior clareza sobre o que representa um desvio operacional e o que caracteriza um risco crítico de segurança.

Esse entendimento contribui diretamente para melhorar o controle do desmonte, direcionar ações corretivas de forma adequada e reforçar a importância de manter os efeitos da detonação dentro de limites seguros e previsíveis.

# 1.11. Definições técnicas de flyrock e limites do conceito

Após diferenciar os tipos de lançamento da rocha no desmonte, é importante avançar para a consolidação do conceito de flyrock sob uma perspectiva técnica.

Embora o termo seja amplamente utilizado no setor, não existe uma única definição universal que abranja todos os cenários operacionais. Diferentes autores, normas e empresas adotam abordagens distintas, variando conforme o contexto, o nível de risco e o foco da análise.

Compreender essas variações é essencial para evitar interpretações equivocadas e, principalmente, para adotar um conceito que seja útil na prática profissional.

## 1.11.1 Termo em português e em inglês

O termo **flyrock** é amplamente utilizado internacionalmente para descrever o fenômeno do lançamento de fragmentos rochosos durante uma detonação.

No contexto brasileiro, também são utilizados termos como:

- ultralançamento
- projeção de fragmentos
- lançamento de rocha

No entanto, o uso do termo em inglês é predominante na literatura técnica, em relatórios de empresas especializadas e em estudos acadêmicos.

Isso ocorre porque o termo flyrock já está consolidado como referência no setor, sendo amplamente reconhecido e utilizado em diferentes países e idiomas.

Neste curso, será adotado preferencialmente o termo **flyrock**, mantendo a consistência com a literatura técnica e facilitando a integração com referências internacionais.

## 1.11.2 Definições em normas e literatura

As definições de flyrock variam conforme a fonte, podendo ser mais restritas ou mais abrangentes.

De forma geral, essas definições podem se basear em diferentes critérios, como:

- **Área de detonação**

  Define flyrock como qualquer fragmento que ultrapassa a zona diretamente associada ao desmonte.

- **Área operacional**

  Considera flyrock quando o material ultrapassa os limites previstos para a pilha ou para a área de operação.

- **Zona de segurança ou exclusão**

  Classifica como flyrock o material que ultrapassa os limites considerados seguros para pessoas, equipamentos ou estruturas.

Além disso, algumas definições enfatizam:

- a distância percorrida pelos fragmentos
- a presença de risco
- a origem do lançamento (falha de confinamento, por exemplo)

Essa diversidade de abordagens mostra que o conceito de flyrock pode ser interpretado de diferentes formas, dependendo do objetivo da análise.

## 1.11.3 Limitações de cada definição

Apesar de úteis, as definições existentes apresentam limitações quando aplicadas de forma isolada.

Definições baseadas apenas em distância, por exemplo, podem não considerar o contexto operacional. Um fragmento lançado a determinada distância pode ser aceitável em uma operação e inaceitável em outra, dependendo das condições do entorno.

Da mesma forma, definições baseadas apenas na área de operação podem não refletir o risco real, especialmente em ambientes onde há proximidade com estruturas ou comunidades.

Outro ponto importante é que muitas definições não consideram explicitamente a variabilidade do fenômeno e a dificuldade de previsão. Por isso, nenhuma definição isolada é capaz de representar completamente todas as situações encontradas na prática. É necessário adotar uma abordagem mais flexível e orientada ao risco.

## 1.11.4 Elementos essenciais do conceito

Apesar das diferenças entre as definições, é possível identificar elementos comuns que caracterizam o flyrock.

De forma geral, o fenômeno envolve:

- **lançamento de fragmentos de rocha**
- **origem associada à detonação com explosivos**
- **liberação não controlada ou mal direcionada da energia**
- **ultrapassagem de limites previstos ou seguros**
- **potencial de risco a pessoas, equipamentos ou estruturas**

Esses elementos permitem construir uma definição mais consistente, que combine aspectos físicos do fenômeno com sua relevância operacional e de segurança.

## 1.11.5 Definição prática adotada pelo curso

Considerando as diferentes abordagens e suas limitações, este curso adota uma definição prática e orientada à operação:

**Flyrock é o lançamento indesejado de fragmentos de rocha gerados pela liberação descontrolada de energia em um desmonte com explosivos, de modo que esses fragmentos ultrapassem os limites de segurança definidos para a operação e representem risco a pessoas, equipamentos ou estruturas.**

Essa definição apresenta algumas vantagens importantes:

- incorpora o conceito de perda de controle da energia
- considera os limites de segurança como referência principal
- enfatiza o risco como elemento central
- permite adaptação a diferentes contextos operacionais

Ao longo do curso, sempre que o termo flyrock for utilizado, ele estará associado a esse entendimento.

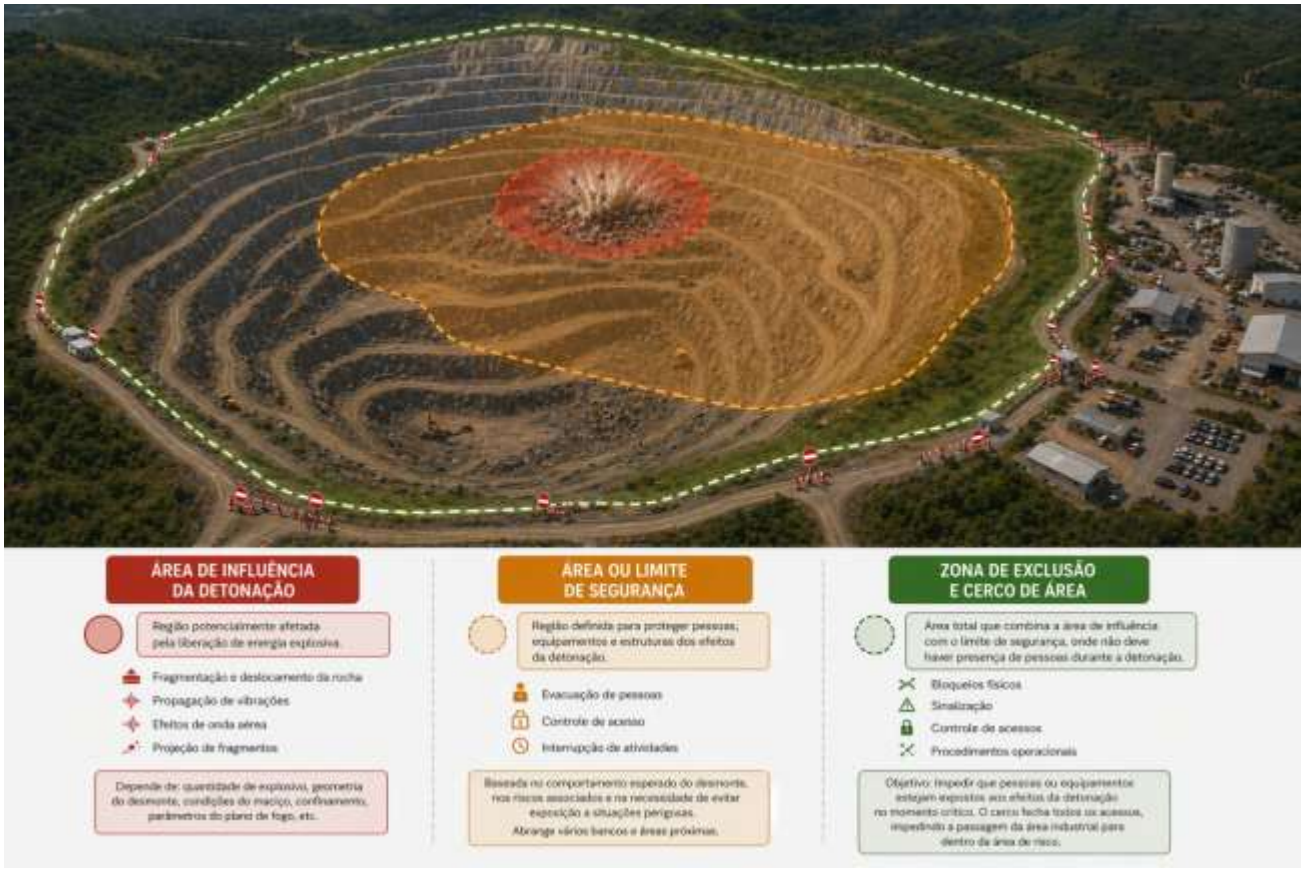
Com esse conceito consolidado, o próximo passo é avançar na compreensão dos limites espaciais do desmonte, abordando os conceitos de área de influência, área de segurança e cerco de área, que são fundamentais para o controle do flyrock e para a gestão do risco associada ao fenômeno.

# 1.12. Conceitos iniciais sobre área de influência, área de segurança e cerco de área

Após compreender o comportamento do desmonte, a natureza do flyrock e as limitações da previsibilidade, é necessário introduzir um conjunto de conceitos espaciais fundamentais para o controle da operação.

Toda detonação ocorre dentro de um espaço físico que precisa ser definido, controlado e protegido. Esses limites não são arbitrários. Eles existem para garantir que os efeitos do desmonte permaneçam dentro de uma zona conhecida e segura.

Nesse contexto, surgem conceitos como área de influência, área de segurança e cerco de área, que serão amplamente utilizados ao longo deste curso e, principalmente, no curso seguinte, onde serão tratados de forma aplicada.




## 1.12.1 Área de influência da detonação

A área de influência da detonação corresponde à região afetada pela liberação de energia explosiva.

Essa área não se limita apenas ao volume desmontado. Ela inclui todas as regiões onde os efeitos da detonação podem se manifestar, como:

- fragmentação e deslocamento da rocha
- propagação de vibrações
- efeitos de onda aérea
- projeção de fragmentos

A extensão dessa área depende de diversos fatores, como:

- quantidade de explosivo utilizada
- geometria do desmonte

- condições do maciço rochoso
- nível de confinamento
- parâmetros do plano de fogo

A área de influência representa, portanto, o alcance potencial dos efeitos do desmonte e serve como referência inicial para o controle da operação.

## 1.12.2 Área ou limite de segurança

A área de segurança é a região definida para garantir que pessoas, equipamentos e estruturas estejam protegidos dos efeitos da detonação.

Ela é estabelecida com base em critérios técnicos e operacionais, considerando:

- o comportamento esperado do desmonte
- os riscos associados aos diferentes efeitos
- a necessidade de evitar exposição a situações perigosas

Dentro da área de segurança, devem ser adotadas medidas como:

- evacuação de pessoas
- controle de acesso
- interrupção de atividades

A área de segurança é, portanto, um limite operacional que busca garantir que os efeitos do desmonte não resultem em danos ou acidentes.

## 1.12.3 Zona de exclusão e cerco de área

A zona de exclusão é a área dentro da qual não deve haver presença de pessoas durante a detonação, sendo composta pela área de influência da detonação mais o limite de segurança.

O cerco de área corresponde às medidas adotadas para garantir o isolamento dessa zona, como:

- bloqueios físicos
- sinalização
- controle de acessos
- procedimentos operacionais

O objetivo do cerco de área é impedir que pessoas ou equipamentos estejam expostos aos efeitos da detonação no momento crítico.

Embora neste módulo a abordagem seja conceitual, é importante destacar que a definição adequada da zona de exclusão é uma das principais ferramentas de controle do risco de flyrock.

## 1.12.4 Relação entre limites operacionais e limites de risco

Os limites operacionais e os limites de risco estão diretamente relacionados, mas não são necessariamente iguais.

Os limites operacionais são definidos com base no planejamento do desmonte e no comportamento esperado do material. Já os limites de risco consideram a possibilidade de desvios em relação ao esperado, incorporando margens de segurança.

Isso significa que:

- nem todo movimento dentro da área operacional representa risco
- mas qualquer movimento que ultrapasse os limites de segurança pode representar uma situação crítica

Essa diferença é essencial para compreender por que as áreas de segurança são, em geral, mais amplas do que a área diretamente afetada pelo desmonte.

## 1.12.5 Diferença entre permanecer dentro da área prevista e ultrapassar os limites de segurança

A distinção entre permanecer dentro da área prevista e ultrapassar os limites de segurança está diretamente relacionada aos conceitos discutidos no tópico anterior sobre tipos de lançamento.

Quando os fragmentos permanecem dentro da área prevista (área de influência):

- o comportamento do desmonte está dentro do esperado
- os riscos estão controlados
- a operação pode ser considerada segura do ponto de vista espacial

Quando há lançamento além da área prevista (área de influência), mas ainda dentro da área de segurança:

- há um desvio operacional
- o controle pode ser melhorado
- o risco ainda está contido




No entanto, quando os fragmentos ultrapassam a área de segurança:

- ocorre o flyrock
- há perda de controle efetiva
- o risco se torna crítico

Essa distinção reforça a importância de definir corretamente os limites espaciais e de garantir que eles sejam respeitados durante a operação.

# 1.13. Fechamento do módulo e preparação para os próximos temas

Ao longo deste módulo, foram apresentados os fundamentos necessários para compreender o flyrock dentro do contexto do desmonte de rochas com explosivos.

Mais do que definir o fenômeno, o objetivo foi construir uma base sólida de entendimento, conectando conceitos de energia, comportamento do maciço rochoso, variabilidade operacional e limites do controle prático.

Neste momento, é importante consolidar os principais aprendizados e organizar mentalmente os conceitos desenvolvidos, preparando o caminho para o aprofundamento técnico que será realizado nos próximos módulos.

## 1.13.1 Síntese dos conceitos introdutórios

O flyrock foi apresentado como um dos principais riscos associados ao desmonte de rochas com explosivos, destacando-se por seu potencial de impacto direto e por suas consequências imediatas.

Ao longo do módulo, ficou estabelecido que:

1. o desmonte é um processo de liberação e controle de energia
2. nem toda a energia liberada é convertida em trabalho útil
3. parte da energia pode se manifestar como efeitos indesejados
4. o flyrock é uma dessas manifestações, associada à perda de controle da energia

Também foi demonstrado que o fenômeno não ocorre de forma isolada, mas resulta da interação entre diversos fatores, incluindo:

- energia explosiva
- confinamento da carga
- características geológicas do maciço
- parâmetros do plano de fogo
- qualidade da execução

Além disso, foi reforçado que o desmonte envolve um equilíbrio entre variáveis controláveis e incontroláveis, o que introduz incerteza no processo.

## 1.13.2 O que o aluno já deve ter entendido ao final do módulo

Ao concluir este módulo, o aluno deve ser capaz de compreender que:

- o flyrock é um fenômeno crítico, e não apenas um efeito secundário do desmonte
- o deslocamento da rocha é parte natural do processo, mas pode se tornar perigoso quando ultrapassa limites de segurança
- não existe previsão absoluta para o comportamento do flyrock
- a variabilidade geológica e operacional influencia diretamente o resultado da detonação
- o controle do desmonte depende tanto do projeto quanto da execução em campo
- a definição de áreas de influência e segurança é essencial para reduzir a exposição ao risco

Mais importante ainda, o aluno deve ter assimilado que o flyrock não pode ser tratado de forma simplista ou baseada apenas em regras fixas.

A compreensão adequada do fenômeno exige:

- base técnica consistente
- capacidade de interpretação
- observação de campo
- postura preventiva

Com esses conceitos consolidados, o curso avança agora para um aprofundamento progressivo dos temas relacionados ao fenômeno. Nos próximos módulos, serão analisados com maior nível de detalhe os riscos associados ao flyrock, as normas e responsabilidades técnicas, os mecanismos de geração, os fundamentos físicos e balísticos, o papel do confinamento, as causas operacionais e geológicas, além das estratégias de controle e dos modelos de predição. Esse avanço permitirá construir uma visão mais completa e aplicada do fenômeno, preparando o aluno para compreender não apenas como o flyrock ocorre, mas principalmente como ele pode ser gerenciado dentro dos limites da engenharia. Ao final do curso, ficará claro que, embora a previsão absoluta não seja possível, o risco pode e deve ser tratado de forma técnica, estruturada e responsável.

# Módulo 2. Riscos Associados ao Flyrock

## 2.1 Abertura do módulo e visão geral dos riscos associados ao flyrock

No Módulo 1, foram estabelecidas as bases conceituais necessárias para compreender o flyrock dentro do contexto do desmonte de rochas com explosivos. Foram discutidos seus mecanismos gerais, sua relação com a energia explosiva, o papel do confinamento e as limitações da previsibilidade. A partir desse ponto, o curso avança para uma etapa essencial: compreender a gravidade real do flyrock.

Mais do que um efeito indesejado, o flyrock deve ser tratado como um risco crítico, capaz de gerar consequências severas e imediatas. Sua importância não está apenas na possibilidade de ocorrência, mas principalmente na magnitude dos impactos que pode provocar quando ocorre.

Neste módulo, o foco deixa de ser apenas a compreensão do fenômeno e passa a incluir a análise de suas consequências práticas, permitindo ao aluno desenvolver uma visão mais completa e realista do problema.

### 2.1.1 O flyrock como risco crítico do desmonte

Dentro do conjunto de efeitos gerados por uma detonação, o flyrock se destaca como um dos mais críticos.

Essa criticidade não está associada à sua frequência de ocorrência, mas principalmente à severidade de suas consequências. Diferentemente de outros efeitos do desmonte, que muitas vezes atuam de forma indireta ou progressiva, o flyrock pode gerar danos imediatos e localizados.

Isso significa que um único evento pode resultar em:

- acidentes com pessoas
- danos a equipamentos
- impactos em estruturas
- interrupções operacionais

Além disso, a combinação entre variabilidade do fenômeno e baixa tolerância ao erro torna o flyrock particularmente desafiador do ponto de vista do controle.

Por essas razões, ele deve ser tratado como um risco crítico, exigindo atenção prioritária em todas as etapas do desmonte.




### 2.1.2 Dimensões do risco associado ao flyrock

O risco associado ao flyrock não se limita a uma única dimensão. Ele deve ser analisado de forma abrangente, considerando diferentes aspectos que podem ser afetados por sua ocorrência.

- **Dimensão humana:** Relaciona-se ao risco à vida e à integridade física de trabalhadores e terceiros. É a dimensão mais crítica e prioritária.
- **Dimensão operacional:** Refere-se aos impactos na continuidade das operações, incluindo paralisações, retrabalho e perda de produtividade.
- **Dimensão patrimonial:** Envolve danos a equipamentos, instalações e estruturas, tanto internas quanto externas à operação.
- **Dimensão legal:** Inclui responsabilidades civis e criminais, autuações, multas e exigências regulatórias.

- **Dimensão reputacional:** Relaciona-se à imagem da empresa perante órgãos reguladores, comunidade e mercado.
- **Dimensão social:** Abrange a relação com comunidades vizinhas, percepção de risco e aceitação das operações.

Essas dimensões estão interligadas. Um único evento de flyrock pode desencadear consequências em várias delas simultaneamente, ampliando significativamente o impacto do problema. Por isso o flyrock deve ser compreendido não apenas como um fenômeno físico, mas como um risco complexo, com potencial de gerar impactos significativos em diferentes dimensões da operação.

## 2.2 Risco à vida humana e à integridade física

Entre todas as dimensões de risco associadas ao flyrock, a mais crítica e prioritária é, sem dúvida, a proteção da vida humana. A segurança das pessoas deve sempre ocupar o nível mais alto de prioridade em qualquer atividade envolvendo explosivos.

No caso do flyrock, essa prioridade se justifica pelo fato de que fragmentos projetados podem atingir indivíduos com alta energia cinética, gerando consequências imediatas e potencialmente irreversíveis.

Diferentemente de outros efeitos do desmonte, que podem ser percebidos e, em alguns casos, evitados ou mitigados com maior antecedência, o impacto de um fragmento ocorre de forma súbita e sem possibilidade de reação.

Por essa razão, o controle do flyrock deve ser conduzido com uma abordagem conservadora, considerando não apenas o comportamento esperado do desmonte, mas também os possíveis desvios.

A proteção da vida humana não deve depender da probabilidade de ocorrência, mas da gravidade potencial das consequências.




## 2.2.1 Risco a trabalhadores expostos

Os trabalhadores envolvidos direta ou indiretamente nas atividades de desmonte estão entre os principais grupos de risco.

Mesmo em operações bem planejadas, existem situações em que trabalhadores podem estar próximos da área de detonação, seja durante atividades de preparação, inspeção ou apoio operacional.

O risco aumenta significativamente quando há:

- falhas no dimensionamento ou na execução do isolamento da área
- comunicação inadequada
- desvios nos procedimentos de segurança

- presença de equipes em locais não autorizados

É importante diferenciar a **exposição ocupacional controlada**, onde há planejamento, procedimentos e restrições bem definidos, da **exposição indevida**, que ocorre quando esses controles falham.

A segurança dos trabalhadores depende diretamente da eficácia do planejamento, da disciplina operacional e da rigorosa aplicação dos procedimentos de controle de acesso.

## 2.2.2 Risco a terceiros e público externo

Além dos trabalhadores da operação, o flyrock pode representar risco para pessoas externas à atividade de desmonte.

Esse risco é particularmente relevante em:

- operações próximas a comunidades
- áreas industriais próximas as áreas de detonação
- áreas com circulação de veículos
- obras em ambientes urbanos ou semiurbanos

Nesses casos, a presença de terceiros em áreas vulneráveis amplia significativamente a gravidade potencial de um evento. Diferentemente dos trabalhadores, que possuem algum nível de treinamento e conhecimento dos riscos, terceiros podem não ter qualquer percepção do perigo associado ao desmonte. Isso torna ainda mais importante o controle rigoroso das áreas de segurança e a definição adequada da zona de exclusão.

## 2.2.3 Gravidade potencial mesmo em eventos de pequena escala

Um aspecto importante do flyrock é que sua gravidade não depende necessariamente da magnitude do evento.

Mesmo fragmentos de pequeno porte podem causar lesões graves ou fatais, dependendo de fatores como:

- velocidade de projeção
- trajetória
- ponto de impacto
- ausência de proteção



Isso significa que eventos aparentemente pequenos, que poderiam ser subestimados do ponto de vista operacional, ainda assim representam riscos significativos à segurança.

## 2.2.4 Relação entre exposição humana e falha no controle espacial do desmonte

A ocorrência de danos a pessoas está diretamente relacionada à combinação de dois fatores:

- presença de indivíduos em áreas vulneráveis
- falha no controle espacial dos efeitos do desmonte

Quando o desmonte ocorre dentro dos limites previstos e as áreas de segurança são corretamente respeitadas, o risco à vida humana é significativamente reduzido.

Por outro lado, quando há:

- subdimensionamento da área de segurança

- falhas no cerco de área
- acesso indevido à zona de risco
- lançamento de fragmentos além dos limites previstos

o risco aumenta de forma crítica. Essa relação reforça a importância de dois pilares fundamentais:

- controle do comportamento do desmonte
- controle da presença de pessoas na área

A segurança não depende apenas do projeto técnico, mas também da gestão eficaz do espaço e das pessoas.

A compreensão desse risco é essencial para desenvolver uma postura profissional baseada em prevenção, disciplina operacional e responsabilidade técnica.

## 2.3 Risco a equipamentos móveis, equipamentos fixos e estruturas

Além do risco à vida humana, o flyrock representa uma ameaça significativa ao patrimônio da operação e às estruturas presentes no seu entorno.

Geralmente o desmonte com explosivos ocorre em ambientes onde há grande concentração de equipamentos de alto valor, infraestrutura crítica e, em muitos casos, proximidade com áreas externas à operação. Quando fragmentos rochosos são projetados de forma não controlada, esses elementos podem ser diretamente impactados.




Embora nem todo evento de flyrock resulte em danos catastróficos, impactos localizados já são suficientes para gerar custos, interrupções e perda de confiabilidade no processo.

### 2.3.1 Risco a equipamentos móveis

Os equipamentos móveis estão entre os ativos mais expostos ao risco de flyrock durante o desmonte.

Caminhões fora de estrada, escavadeiras, pás carregadeiras e perfuratrizes operam frequentemente próximos às áreas de lavra e podem estar posicionados em regiões potencialmente afetadas pela detonação.

O impacto de fragmentos rochosos pode causar danos em cabines, quebra de vidros, avarias em componentes estruturais e diversos outros.

Mesmo quando não há danos severos, impactos repetidos podem reduzir a vida útil dos equipamentos e aumentar a necessidade de manutenção, ou impedir sua operação por horas ou dias, impactando diretamente a produção.

### 2.3.2 Risco a equipamentos, instalações e estruturas da operação

O flyrock também representa uma ameaça significativa para equipamentos e estruturas presentes na operação. Esses elementos, muitas vezes posicionados próximos às áreas de desmonte por razões operacionais e logísticas,

podem se encontrar dentro da área de influência da detonação, ficando suscetíveis ao impacto de fragmentos projetados.

Entre os principais elementos expostos, podem ser citados britadores, correias transportadoras, subestações elétricas, sistemas de bombeamento e outras unidades essenciais para o fluxo produtivo. Já no que se refere às estruturas, incluem-se oficinas, almoxarifados, prédios administrativos e áreas de apoio operacional, que, embora não estejam diretamente ligadas à frente de lavra, frequentemente se localizam dentro do ambiente operacional ativo.

O impacto do flyrock sobre esses elementos pode gerar uma série de consequências relevantes. Entre elas, destacam-se danos físicos a equipamentos e estruturas, necessidade de manutenção corretiva ou reparos emergenciais, interrupções no processo produtivo e, em alguns casos, exposição indireta de pessoas a situações de risco. Em operações com alta integração entre setores, um dano pontual pode desencadear efeitos em cadeia, comprometendo etapas subsequentes do processo.

Esse tipo de risco reforça que o planejamento do desmonte não deve considerar apenas a frente de lavra de forma isolada, mas sim toda a área operacional como um sistema integrado. A definição do desenho do plano de fogo, assim como das áreas de segurança, zonas de exclusão e critérios de posicionamento de equipamentos devem levar em conta não apenas a distância em relação à detonação, mas também a variabilidade do fenômeno e as possíveis incertezas associadas ao comportamento do flyrock.

## 2.3.3 Risco a estruturas externas e infraestrutura pública

Em operações próximas a áreas externas, o risco de flyrock se estende para além dos limites da mina ou da obra. Fragmentos projetados podem atingir residências, veículos em circulação, estradas, linhas de transmissão, cercas e propriedades vizinhas, áreas agrícolas e várias outras.

Esse tipo de impacto tende a gerar consequências mais complexas, envolvendo:

- terceiros
- danos fora do controle direto da operação
- aumento da exposição legal e social

Além disso, eventos desse tipo costumam ter maior repercussão, tanto do ponto de vista regulatório quanto na percepção pública.

## 2.3.4 Consequências patrimoniais diretas e indiretas

Os danos causados pelo flyrock podem ser classificados em diretos e indiretos.

**Consequências diretas:**

- reparo ou substituição de equipamentos
- recuperação de estruturas danificadas
- custos imediatos de manutenção

**Consequências indiretas:**

- paralisação de equipamentos ou setores
- perda de produção
- aumento de custos operacionais
- necessidade de replanejamento
- redução da confiabilidade do processo

Mesmo eventos de menor escala podem gerar impactos relevantes quando considerados ao longo do tempo, especialmente em operações de grande porte.

Os danos a equipamentos, instalações e estruturas podem comprometer a continuidade operacional, aumentar custos e gerar impactos que vão além do evento imediato.

A compreensão desse risco amplia a visão do profissional, reforçando a necessidade de controle rigoroso do desmonte e de consideração adequada dos limites espaciais da operação.

# 2.4 Risco à continuidade operacional

Além dos impactos sobre pessoas e ativos físicos, o flyrock também exerce influência direta sobre a continuidade operacional.

O desmonte de rochas é uma etapa central em operações de mineração e obras civis, funcionando como ponto de partida para diversas atividades subsequentes. Qualquer desvio significativo nesse processo pode gerar efeitos em cadeia, comprometendo o planejamento e a estabilidade da operação.

Nesse contexto, o flyrock não deve ser visto apenas como um evento isolado de segurança, mas como um fator capaz de afetar a produtividade, a confiabilidade do processo e a eficiência global da operação.

## 2.4.1 Paralisações imediatas após incidentes

Quando ocorre um evento de flyrock fora dos limites esperados, a resposta imediata da operação tende a ser a paralisação das atividades.

Essa interrupção é necessária para:

- garantir a segurança das pessoas
- avaliar a extensão do evento
- evitar exposição adicional a riscos

A área afetada pode precisar ser isolada até que seja considerada segura para retomada das atividades ou pode ser imposta uma proibição de realização de outros desmontes até a conclusão das investigações.

Dependendo da gravidade do evento, essa paralisação pode afetar a frente de lavra, áreas adjacentes e atividades logísticas.

Mesmo interrupções de curta duração já são suficientes para impactar o ritmo da operação, especialmente em sistemas produtivos contínuos.

## 2.4.2 Inspeções, investigações e retrabalho

Após a ocorrência de um evento de flyrock, é necessário realizar uma série de ações para entender suas causas e garantir que a operação possa ser retomada com segurança.

Essas ações incluem:

- inspeções de campo
- avaliação de danos
- coleta de dados
- análise técnica do evento

Em muitos casos, também é necessário revisar o plano de fogo, corrigir parâmetros e realizar retrabalho em áreas afetadas. Esses processos demandam tempo, recursos e envolvimento de equipes técnicas, o que contribui para a extensão dos impactos operacionais. Além de muitas vezes necessitar contratar consultores externos e empresas especializadas trazendo custos não previstos para operação.

## 2.4.3 Impactos operacionais, produtividade e custos

Os efeitos do flyrock sobre a operação vão além das questões de segurança, impactando diretamente a produtividade, o cumprimento do cronograma e os custos operacionais. Esses impactos estão, na maioria das vezes, interligados, formando um conjunto de consequências que afetam o desempenho global da operação.

Do ponto de vista operacional, o flyrock pode comprometer a continuidade das atividades, gerando atrasos na liberação de áreas para carregamento, redução do volume movimentado e descontinuidade no fluxo produtivo.

Em muitos casos, torna-se necessário realizar ajustes no sequenciamento de lavra, reorganizando frentes de trabalho e priorizando áreas seguras, o que pode desalinhar o planejamento originalmente estabelecido. Em operações com alto nível de controle e metas rigorosas, mesmo pequenas interrupções tendem a gerar efeitos acumulativos, comprometendo indicadores de produção ao longo do tempo.

Além disso, a adoção de medidas adicionais de segurança e controle, como inspeções mais detalhadas, ampliação de áreas de restrição ou maior rigor nos procedimentos operacionais, pode tornar os ciclos produtivos mais lentos, reduzindo a eficiência global da operação.

Esses impactos operacionais estão diretamente associados ao aumento de custos. Entre os principais fatores, destacam-se o tempo improdutivo de equipamentos, a mobilização de equipes para inspeção e análise de ocorrências, a necessidade de retrabalho e correções, além de ajustes frequentes no planejamento. Soma-se a isso a implementação de medidas adicionais de controle e segurança, que, embora necessárias, elevam o custo operacional por ciclo.

Um aspecto importante é que muitos desses custos não são imediatamente evidentes. Eles se manifestam de forma indireta e progressiva, acumulando-se ao longo do tempo, especialmente em operações onde eventos de flyrock ocorrem com maior frequência. Esse cenário reforça que o controle do flyrock não deve ser visto apenas como uma questão de segurança, mas também como um fator crítico para a eficiência operacional e a sustentabilidade econômica do empreendimento.

### 2.4.4 Perda de confiança no processo de desmonte

Eventos recorrentes de flyrock podem comprometer a confiança da equipe no processo de desmonte.

Quando o comportamento do desmonte se torna imprevisível ou inconsistente, a tendência é adotar uma postura mais conservadora, o que pode incluir:

- redução das cargas de explosivo
- aumento das áreas de segurança
- restrição de operações simultâneas
- maior cautela na execução

Embora essas medidas possam aumentar a segurança, elas também reduzem a eficiência operacional. Além disso, a perda de confiança pode afetar a tomada de decisão, tornando o processo mais lento e menos otimizado.

A compreensão desses impactos é fundamental para que o profissional reconheça que o controle do flyrock não é apenas uma exigência de segurança, mas também uma condição essencial para a estabilidade operacional.

# 2.5 Consequências financeiras, jurídicas e reputacionais

Os impactos do flyrock não se limitam ao momento da detonação nem aos danos físicos imediatos. Em muitos casos, as consequências mais significativas se manifestam após o evento, desdobrando-se em múltiplas camadas que afetam diretamente a operação, a empresa e seu ambiente institucional.

Um único evento de flyrock pode desencadear uma sequência de efeitos que vão desde custos operacionais até implicações legais e danos à reputação. Esse efeito em cadeia amplia significativamente a gravidade do problema e reforça a necessidade de tratá-lo de forma estratégica.

## 2.5.1 Consequências financeiras diretas e indiretas

Os eventos de flyrock estão associados a impactos financeiros que podem ser classificados em diretos e indiretos, ambos relevantes para a análise completa das consequências do fenômeno. Enquanto os custos diretos são mais imediatos e facilmente identificáveis, os custos indiretos tendem a se manifestar de forma progressiva, muitas vezes representando uma parcela significativa do impacto total.

As consequências financeiras diretas estão relacionadas aos efeitos imediatos do evento. Entre elas, destacam-se os custos de reparo ou substituição de equipamentos danificados, a recuperação de estruturas afetadas, as despesas associadas à contenção de danos e os custos iniciais de inspeção e avaliação da ocorrência. Esses custos são, em geral, rapidamente identificados e registrados, pois estão diretamente ligados a danos visíveis. Em situações mais severas, especialmente quando envolvem equipamentos de grande porte ou infraestrutura crítica, os valores podem ser elevados e impactar de forma significativa o orçamento da operação.

Por outro lado, as consequências financeiras indiretas, embora menos evidentes, podem representar um impacto ainda maior ao longo do tempo. Entre os principais fatores estão as perdas de produção decorrentes de paralisações, o tempo improdutivo de equipamentos, a mobilização de equipes técnicas para investigação, o retrabalho necessário para correções operacionais e a implementação de medidas corretivas e preventivas. Esses custos não são sempre registrados de forma imediata ou isolada, o que dificulta sua mensuração precisa.

Em operações onde eventos de flyrock ocorrem com maior frequência ou exigem ajustes contínuos no processo, esses custos indiretos tendem a se acumular, ampliando significativamente o impacto financeiro total. Dessa forma, é fundamental compreender que o custo real de um evento de flyrock vai além dos danos visíveis, envolvendo também perdas operacionais e esforços adicionais que afetam a eficiência e a sustentabilidade econômica da operação.

## 2.5.2 Implicações legais e responsabilidade técnica

Os eventos de flyrock também podem gerar implicações legais relevantes.

Dependendo do contexto e das consequências do evento, podem ocorrer:

- responsabilização civil por danos a terceiros
- responsabilização criminal em casos mais graves
- autuações por órgãos fiscalizadores
- abertura de processos administrativos
- litígios envolvendo terceiros afetados

Nesse cenário, a responsabilidade técnica do profissional envolvido no planejamento e execução do desmonte passa a ser analisada.

Aspectos como:

- conformidade com normas
- qualidade do projeto
- controle operacional

- registro e rastreabilidade das atividades

ganham importância central na avaliação do evento. Isso reforça a necessidade de atuação técnica rigorosa e bem documentada.

## 2.5.3 Danos ambientais e impactos indiretos

O flyrock também pode causar impactos ambientais, especialmente quando atinge áreas naturais ou sensíveis.

Entre os possíveis efeitos, destacam-se:

- danos à vegetação
- impacto em áreas de preservação
- alteração de superfícies do solo
- dispersão de material em cursos d'água

Além dos impactos diretos, existem efeitos indiretos, como:

- necessidade de intervenções corretivas
- alteração de rotinas operacionais para evitar recorrência
- aumento da área afetada pelo desmonte

Esses impactos podem ser mais difíceis de mensurar, mas ainda assim são relevantes no contexto ambiental da operação.

## 2.5.4 Danos reputacionais e efeito em cadeia dos eventos de flyrock

Além dos impactos financeiros, legais e ambientais, os eventos de flyrock podem gerar danos significativos à reputação da operação e da empresa como um todo. Esses efeitos são particularmente sensíveis, pois envolvem a percepção externa sobre a segurança, o controle operacional e a responsabilidade técnica adotada na condução das atividades.

Entre as principais consequências reputacionais, destacam-se a perda de confiança por parte da comunidade, o aumento da atenção e da fiscalização por órgãos reguladores, questionamentos sobre a segurança das práticas adotadas e a exposição negativa em mídias e redes sociais. Em operações localizadas próximas a áreas habitadas, esses efeitos tendem a ser ainda mais intensos, uma vez que a percepção de risco da população se eleva rapidamente após a ocorrência de eventos desse tipo.

A reputação, embora seja um ativo intangível, possui elevado valor estratégico. Sua perda ou deterioração pode comprometer o relacionamento com partes interessadas, dificultar a continuidade operacional e exigir tempo e esforço consideráveis para sua reconstrução.

Outro aspecto fundamental é que o flyrock raramente gera impactos isolados. Na prática, um único evento pode desencadear uma sequência de consequências interligadas, formando um verdadeiro efeito em cadeia. Esse processo pode se iniciar com um dano físico localizado e evoluir para paralisações operacionais, investigações técnicas, geração de custos diretos e indiretos, envolvimento de órgãos reguladores, questionamentos legais, repercussão externa e desgaste institucional.

Esse encadeamento de efeitos amplia significativamente a dimensão do problema, transformando um evento pontual em uma situação complexa, com múltiplas implicações para a operação. Por essa razão, o flyrock deve ser tratado não apenas como um risco operacional, mas como um risco estratégico, com potencial de afetar simultaneamente diferentes áreas da organização.

Mais do que reagir aos efeitos, a engenharia de desmonte deve atuar antecipando cenários, reduzindo incertezas e estruturando operações seguras e consistentes.

# 2.6 Comparação entre flyrock, vibração e onda aérea

Como já vimos anteriormente, o desmonte de rochas com explosivos gera diferentes efeitos que precisam ser controlados para garantir segurança, desempenho operacional e conformidade com normas.




Entre os principais efeitos, destacam-se os três principais a seguir pois eles têm o potencial de gerar danos físicos diretos e imediatos:

- vibração no solo
- onda aérea
- flyrock

Todos são relevantes e exigem atenção técnica. No entanto, eles não possuem a mesma natureza, nem o mesmo nível de tolerância ao risco. A compreensão dessa diferença é fundamental para evitar interpretações equivocadas e para adotar estratégias de controle adequadas para cada tipo de efeito.

## 2.6.1 Semelhanças e diferenças entre os principais efeitos do desmonte

Vibração, onda aérea e flyrock têm uma origem comum: a liberação de energia explosiva durante a detonação.

Todos esses efeitos:

- são inevitáveis em algum grau
- dependem das características do plano de fogo
- são influenciados pela geologia e pelo confinamento
- podem gerar impactos fora da área imediata do desmonte

No entanto, a forma como essa energia se manifesta é diferente.

- **Vibração** ocorre pela propagação de ondas sísmicas no maciço e no solo
- **Onda aérea** ocorre pela propagação de ondas de pressão no ar
- **Flyrock** ocorre pela projeção física de fragmentos de rocha

Essa diferença fundamental na forma de manifestação implica diferenças diretas no tipo de dano, na forma de controle e na tolerância ao efeito.

## 2.6.2 Por que vibração possui limites de tolerância

A vibração gerada pelo desmonte pode causar:

- desconforto
- trincas em estruturas
- danos em casos mais severos

No entanto, a engenharia desenvolveu ao longo do tempo critérios que permitem estabelecer limites aceitáveis para esse efeito.

Esses limites são baseados em:

- velocidade de partícula
- frequência da vibração
- tipo de estrutura exposta

Isso permite que a vibração seja:

- medida com instrumentos
- monitorada em tempo real
- comparada com valores de referência

A partir disso, é possível trabalhar com uma lógica de tolerância, onde certos níveis de vibração são considerados aceitáveis, desde que não causem danos estruturais.

## 2.6.3 Por que onda aérea possui limites de tolerância

A onda aérea, assim como a vibração, também pode ser quantificada e monitorada.

Seus principais efeitos incluem:

- ruído
- desconforto
- vibração em superfícies leves
- potencial de dano em estruturas mais sensíveis

Assim como no caso da vibração, existem limites técnicos que permitem avaliar a aceitabilidade desse efeito, normalmente baseados em:

- níveis de pressão sonora
- características da onda

Isso possibilita:

- monitoramento sistemático
- comparação com padrões estabelecidos
- controle dentro de faixas aceitáveis

Dessa forma, a onda aérea também pode ser tratada dentro de uma lógica de limite e tolerância.

## 2.6.4 Por que o flyrock é tratado de forma diferente

O flyrock se diferencia dos demais efeitos por sua natureza.

Enquanto vibração e onda aérea envolvem propagação de energia em forma de ondas, o flyrock envolve:

- deslocamento de massa (a qual não podemos prever a quantidade, o tamanho, formato, etc)
- trajetória indefinida (pode ser lançado em todas as direções e em longas distâncias)
- impacto físico direto (até um pequeno fragmento pode causar um dano irreparável)

Essa característica faz com que o flyrock tenha:

- potencial imediato de dano físico
- capacidade de atingir pessoas e objetos de forma direta
- baixa margem para tolerância

Diferentemente da vibração e da onda aérea, ***não existe um nível "aceitável" de flyrock fora da área segura***. O controle do flyrock não se baseia em limites graduais, mas em uma lógica binária:

- dentro da área segura → controlado
- fora da área segura → falha de controle

Essa diferença é fundamental para entender por que o flyrock exige uma abordagem mais restritiva e conservadora.

## 2.6.5 O significado crítico de um fragmento além da área segura

Um dos conceitos mais importantes deste tópico é compreender que, no caso do flyrock, um único fragmento fora da área segura já caracteriza uma situação crítica.

Isso ocorre porque:

- o fragmento representa perda de controle da energia
- a trajetória não foi adequadamente contida
- há potencial direto de impacto

Mesmo que não haja dano imediato, o simples fato de um fragmento ultrapassar os limites de segurança indica que o sistema de controle falhou. Essa característica diferencia o flyrock dos outros efeitos do desmonte, onde pequenas variações dentro de certos limites podem ser aceitáveis.

No caso do flyrock, não há margem segura para erro fora da área definida. Esse entendimento é essencial para a tomada de decisão em campo e para a definição de estratégias de controle mais rigorosas.

# 2.7 Importância da análise e Lições aprendidas a partir de eventos reais

Até este ponto, o flyrock foi analisado sob uma perspectiva técnica e conceitual, com foco nos seus mecanismos, riscos e consequências. No entanto, para compreender plenamente a gravidade do fenômeno, é fundamental olhar para eventos reais.

Os registros históricos de acidentes e incidentes com flyrock mostram que esse não é um risco teórico ou eventual, mas um problema concreto, recorrente e presente em operações de mineração e obras civis em diferentes contextos ao redor do mundo.

O estudo de casos reais é uma das ferramentas mais importantes para a compreensão do flyrock.

Enquanto modelos teóricos e conceitos ajudam a entender o fenômeno, são os eventos reais que evidenciam como ele se manifesta na prática.

A análise de acidentes e incidentes permite:

- visualizar situações concretas de falha de controle
- compreender a interação entre múltiplos fatores
- identificar consequências reais do fenômeno
- reconhecer limitações dos modelos teóricos

Além disso, os casos reais ajudam a desenvolver o julgamento técnico, permitindo que o profissional reconheça situações de risco antes que evoluam para eventos críticos.

## 2.7.1 Tipos de eventos historicamente registrados

Os registros históricos mostram que os eventos de flyrock podem assumir diferentes formas, variando em escala e consequência.

Entre os principais tipos de eventos, destacam-se:

- **Acidentes com pessoas:** Incluindo lesões graves e fatalidades, tanto com trabalhadores quanto com terceiros.
- **Danos a equipamentos:** Impactos em caminhões, escavadeiras, perfuratrizes e outros ativos operacionais.
- **Danos a estruturas:** Atingindo instalações internas, edificações externas e infraestrutura pública.
- **Eventos com impacto externo:** Casos em que fragmentos alcançam áreas fora da operação, gerando conflitos com comunidades.



Esses eventos demonstram que o flyrock pode afetar múltiplas dimensões da operação e do seu entorno.

## 2.7.2 Padrões recorrentes observados em incidentes

A análise de diferentes eventos ao longo do tempo revela que muitos casos de flyrock apresentam padrões semelhantes.

Entre os fatores frequentemente associados aos incidentes, podem ser citados:

- falhas de confinamento
- erros no plano de fogo
- desvios na execução

- condições geológicas não adequadamente consideradas
- controle insuficiente da área de segurança

Outro ponto importante é que, em muitos casos, os eventos não resultam de uma única causa, mas da combinação de vários fatores. Essa característica reforça a complexidade do fenômeno e a necessidade de uma abordagem integrada para seu controle.

## 2.7.3 A importância dos sinais prévios

Uma das lições mais recorrentes observadas em eventos de flyrock é que, muitas vezes, existem sinais prévios antes da ocorrência de um evento crítico.

Esses sinais podem incluir:

- lançamentos ligeiramente acima do esperado
- alterações no comportamento da pilha
- fragmentação irregular
- variações não usuais no desmonte

Em muitos casos, esses indícios são tratados como desvios operacionais de baixa relevância, quando, na realidade, podem representar alertas de perda de controle.

A não valorização desses sinais contribui para a evolução do problema até um evento mais grave. Por isso, o reconhecimento e a análise sistemática de pequenos desvios são fundamentais para a prevenção.

## 2.7.4 Falhas de projeto versus falhas de execução

Os eventos de flyrock raramente podem ser atribuídos a uma única causa isolada.

No entanto, é comum identificar dois grandes grupos de fatores:

- falhas de projeto
- falhas de execução

Falhas de projeto podem envolver:

- parâmetros inadequados
- estimativas incorretas de confinamento
- simplificações excessivas

Falhas de execução podem incluir:

- carregamento incorreto
- variações no tampão
- posicionamento inadequado de cargas
- desvios operacionais

Na prática, muitos eventos resultam da combinação desses fatores. Essa interação reforça a necessidade de tratar o desmonte como um sistema integrado, onde projeto e execução devem estar alinhados e sob controle.

## 2.7.5 O valor técnico da investigação de acidentes

A investigação de acidentes e incidentes é uma etapa essencial para o avanço da engenharia de desmonte.

Uma investigação bem conduzida permite:

- identificar causas técnicas e operacionais
- compreender a sequência de eventos
- avaliar falhas no sistema de controle
- propor medidas corretivas e preventivas

Mais do que apontar responsabilidades, o objetivo principal da investigação deve ser o aprendizado, pois a partir da análise crítica dos eventos, é possível melhorar:

- projetos de desmonte
- procedimentos operacionais
- critérios de segurança
- práticas de controle

Esse processo contribui diretamente para a redução da recorrência de eventos semelhantes. A análise desses eventos permite transformar experiências passadas em conhecimento aplicado, contribuindo para a evolução das práticas de engenharia e para o aumento da segurança nas operações.

## 2.7.6 Aprendizado organizacional e prevenção

A prevenção do flyrock depende diretamente da capacidade da organização de aprender com seus próprios eventos.

Isso envolve:

- registrar ocorrências, mesmo as de pequena escala
- investigar de forma estruturada
- identificar causas e fatores contribuintes
- implementar ações corretivas
- acompanhar resultados

Além disso, é essencial promover a disseminação do conhecimento dentro da equipe, garantindo que as lições aprendidas sejam incorporadas às práticas operacionais. A ausência desse ciclo de aprendizado tende a manter ou até aumentar a recorrência de eventos.

# 2.8 Subnotificação de eventos e impacto na evolução da engenharia de controle

Ao longo dos tópicos anteriores, foi possível compreender que o flyrock é um fenômeno complexo, influenciado por múltiplos fatores e com potencial de gerar consequências significativas. No entanto, há um aspecto menos visível, mas igualmente importante, que influencia diretamente a evolução das práticas de controle: a subnotificação de eventos.

Nem todos os eventos de flyrock são registrados, investigados ou compartilhados de forma adequada. Muitos permanecem restritos ao conhecimento local ou são tratados apenas como desvios operacionais sem maior aprofundamento. Essa lacuna de informação limita o aprendizado coletivo e reduz a capacidade da engenharia de evoluir de forma consistente.

## 2.8.1 O que é subnotificação no contexto do flyrock

A subnotificação ocorre quando eventos de flyrock não são formalmente registrados, investigados ou incorporados aos sistemas de controle e aprendizado da operação.

Isso inclui situações como:

- lançamentos fora do esperado que não geram danos imediatos
- eventos considerados “pequenos” ou “sem relevância”
- ocorrências tratadas apenas de forma informal

Nesses casos, o evento acontece, mas não se transforma em informação útil para melhoria do processo. A subnotificação não significa ausência de eventos, mas sim ausência de registro e análise estruturada desses eventos.

## 2.8.2 Por que eventos menores deixam de ser registrados

Diversos fatores contribuem para que eventos menores de flyrock não sejam devidamente registrados.

Entre os mais comuns, destacam-se:

- percepção de baixa gravidade
- ausência de danos imediatos
- pressão por continuidade operacional
- cultura organizacional pouco orientada à análise de desvios
- entendimento de que o evento “não justifica” investigação
- não causar pânico ou aumentar nível de desconfiança
- tratamento como desvio operacional de baixa severidade

Em alguns casos, há também receio de exposição de falhas, o que pode desencorajar o registro formal. No entanto, essa prática compromete o aprendizado e pode permitir que condições de risco evoluam sem controle adequado.

## 2.8.3 Consequências da subnotificação

A subnotificação tem impacto direto na evolução da operação e na engenharia de desmonte.

Quando eventos não são registrados:

- perde-se a oportunidade de identificar causas

- reduz-se a base de dados para análise
- limita-se a capacidade de calibração de modelos
- dificulta-se a identificação de padrões

Isso afeta diretamente:

- o desenvolvimento de melhores práticas
- a confiabilidade das análises
- a evolução dos critérios de segurança

Em outras palavras, a ausência de informação impede que a experiência prática se transforme em conhecimento técnico consolidado.

## 2.8.4 Rastreamento, investigação e cultura de aprendizado no controle do flyrock

Para superar as limitações impostas pela subnotificação de eventos de flyrock, é fundamental estruturar processos que garantam não apenas o registro das ocorrências, mas também a sua adequada análise e interpretação. Nesse contexto, dois pilares se tornam essenciais:

- rastreabilidade dos eventos
- investigação interna sistemática

A rastreabilidade permite reconstruir o desmonte e compreender, com base em dados concretos, como e por que determinado evento ocorreu. Isso envolve o registro sistemático das ocorrências, a documentação detalhada das condições operacionais, a caracterização dos parâmetros do plano de fogo e o acompanhamento das variáveis de campo. Mesmo quando não há consequências imediatas graves, esses registros são fundamentais, pois revelam desvios que poderiam, em outras condições, evoluir para eventos mais críticos.

Já a investigação interna representa o passo seguinte. Ela transforma o registro em aprendizado técnico. Ao analisar causas e fatores contribuintes, o processo deixa de ser reativo e passa a atuar de forma preventiva, permitindo identificar fragilidades no projeto, na execução ou nas condições geológicas. Além disso, o acompanhamento das ações corretivas garante que as melhorias propostas sejam efetivamente implementadas e verificadas ao longo do tempo. No entanto, mais do que procedimentos formais, a efetividade desse processo depende da cultura organizacional. Uma cultura técnica madura valoriza o registro de todos os eventos relevantes, incentiva a análise crítica dos desvios, promove o compartilhamento de informações e busca continuamente a melhoria dos processos.

Nesse ambiente, os eventos deixam de ser vistos apenas como falhas ou problemas operacionais e passam a ser tratados como fontes de conhecimento. Essa mudança de perspectiva é fundamental, pois permite transformar a experiência prática acumulada em aprendizado estruturado, reduzindo a recorrência de incidentes e elevando o nível de controle do desmonte. Organizações que desenvolvem essa cultura tendem a apresentar maior consistência operacional, melhor capacidade de resposta a desvios e resultados mais robustos em termos de segurança e eficiência. Isso ocorre porque o controle do flyrock não depende apenas de um bom projeto, mas da capacidade contínua de aprender com a própria operação.

# 2.9 Fechamento do módulo e preparação para os próximos temas

Ao longo deste módulo, o flyrock foi analisado sob uma perspectiva ampliada, indo além da sua definição técnica e avançando para a compreensão de seus impactos reais. A proposta central foi mostrar que o flyrock não deve ser tratado apenas como um efeito indesejado do desmonte, mas como um dos riscos mais críticos associados à atividade.

Neste momento, é importante consolidar os principais aprendizados e organizar os conceitos desenvolvidos, preparando para a próxima etapa do curso, que abordará o contexto normativo e as responsabilidades técnicas relacionadas ao desmonte.

## 2.9.1 Síntese dos riscos associados ao flyrock

Ao longo do módulo, foi demonstrado que o flyrock possui impacto multidimensional, podendo afetar diferentes aspectos da operação e do seu entorno.

Entre os principais riscos discutidos, destacam-se:

- **Risco à vida humana:** Com potencial de causar lesões graves e fatalidades, sendo a principal preocupação em qualquer operação.
- **Risco a equipamentos e estruturas:** Incluindo danos a ativos operacionais, instalações e infraestrutura interna e externa.
- **Risco à continuidade operacional:** Com impactos sobre produtividade, planejamento, cronograma e eficiência.
- **Consequências financeiras:** Relacionadas a custos diretos e indiretos decorrentes de eventos.
- **Implicações legais:** Envolvendo responsabilidades civis, administrativas e, em alguns casos, criminais.
- **Danos reputacionais e sociais:** Afetando a relação com comunidades, órgãos reguladores e a imagem institucional.

Também foi destacado que esses riscos não ocorrem de forma isolada, mas estão interligados, podendo um único evento desencadear múltiplas consequências.

## 2.9.2 O que o aluno deve ter entendido ao final do módulo

Ao concluir este módulo, o aluno deve ser capaz de compreender que:

- o flyrock é um dos efeitos mais perigosos do desmonte de rochas com explosivos
- sua gravidade está associada à severidade das consequências, e não apenas à frequência de ocorrência
- o fenômeno possui impactos que vão muito além do evento físico imediato
- a gestão do flyrock exige abordagem específica, diferenciada e rigorosa
- a prevenção depende de múltiplos fatores, incluindo:
    - qualidade do projeto
    - controle da execução
    - leitura das condições geológicas
    - definição adequada das áreas de segurança
    - disciplina operacional

Além disso, o aluno deve ter assimilado que o controle do flyrock não pode ser baseado apenas em procedimentos isolados, mas sim em uma abordagem integrada, que combine engenharia, operação e gestão.

## 2.9.3 Ponte para o Módulo 3

Diante da complexidade e da gravidade dos riscos associados ao flyrock, torna-se evidente a necessidade de atuar dentro de um conjunto estruturado de regras, critérios e responsabilidades.

No próximo módulo, serão abordados temas fundamentais para esse controle, incluindo:

- normas e regulamentações aplicáveis ao uso de explosivos
- exigências legais relacionadas ao desmonte
- responsabilidades técnicas dos profissionais envolvidos
- importância da conformidade, rastreabilidade e documentação

Esses elementos são essenciais para garantir que o controle do flyrock não dependa apenas da experiência individual, mas esteja inserido em um sistema formal de gestão e responsabilidade.

A partir desse ponto, o curso avança para uma abordagem mais estruturada, conectando a prática operacional com os requisitos legais e normativos que regem a atividade.

# Módulo 3. Normas, Regulamentações e Responsabilidade Técnica

## 3.1 Abertura do módulo e relação entre risco, norma e responsabilidade

No Módulo 2, foi demonstrado que o flyrock é um dos riscos mais críticos do desmonte de rochas com explosivos, com potencial de gerar consequências humanas, operacionais, financeiras, legais e sociais. A partir desse entendimento, surge uma questão fundamental: como esse risco deve ser tratado do ponto de vista formal?

O controle do flyrock não pode ser visto apenas como uma questão técnica ou operacional. Ele também está diretamente ligado a exigências normativas, responsabilidades legais e princípios éticos que orientam a atuação profissional.

Neste módulo, o foco passa a ser a compreensão dessas responsabilidades, mostrando que o controle do flyrock não é apenas uma boa prática, mas uma obrigação técnica, legal e ética. Não basta reconhecer que o flyrock é perigoso. É necessário entender que, diante desse risco, existem obrigações que precisam ser cumpridas por profissionais e organizações.

### 3.1.1 O risco de flyrock sob a ótica normativa e legal

Do ponto de vista normativo e legal, o desmonte com explosivos é uma atividade que exige controle rigoroso e conformidade com uma série de requisitos.

Mesmo quando as normas não tratam o flyrock de forma detalhada ou não estabelecem limites numéricos específicos, isso não significa ausência de obrigação. Pelo contrário, a existência de um risco com potencial de causar danos severos implica a necessidade de controle adequado.

Nesse contexto, o flyrock deve ser entendido como:

- um risco previsível em termos de possibilidade
- um risco controlável dentro de limites técnicos
- um risco cuja gestão é responsabilidade da operação

A ausência de um critério fixo não elimina a necessidade de prevenção. Ela reforça a importância do julgamento técnico e da adoção de medidas conservadoras.

### 3.1.2 Dever técnico de prevenção e controle

O controle do flyrock está diretamente associado ao dever técnico dos profissionais envolvidos no desmonte.

Esse dever se materializa em diferentes aspectos, como:

- planejamento adequado do plano de fogo
- análise das condições geológicas
- definição correta das áreas de segurança
- controle rigoroso da execução
- monitoramento e avaliação dos resultados

Além disso, envolve a capacidade de antecipar riscos e adotar medidas preventivas antes da ocorrência de eventos críticos. A atuação técnica não deve ser limitada ao cumprimento mínimo de procedimentos, mas orientada pela busca de segurança e controle efetivo do processo. Nesse sentido, a prevenção deve ser tratada como princípio central, e não como resposta a falhas.

### 3.1.3 Por que este módulo é central para a prática profissional

Este módulo ocupa uma posição estratégica dentro do curso porque conecta o conhecimento técnico à responsabilidade profissional.

A partir deste ponto, conceitos como:

- normas
- regulamentações
- responsabilidade técnica
- rastreabilidade
- conformidade

passam a ser entendidos não apenas como exigências formais, mas como ferramentas fundamentais para o controle do risco.

O engenheiro, o blaster e a equipe operacional não atuam apenas como executores de tarefas, mas como responsáveis pela segurança do processo e pelas consequências de suas decisões.

# 3.2 Panorama geral das normas e regulamentos aplicáveis ao uso de explosivos e ao controle dos seus efeitos

O uso de explosivos em atividades de mineração e obras civis está inserido em um ambiente altamente regulado, que envolve normas técnicas, exigências legais e diretrizes de segurança.

Essa estrutura normativa não existe por acaso. Ela é resultado da necessidade de controlar uma atividade que envolve grandes quantidades de energia, com potencial significativo de gerar riscos quando não conduzida de forma adequada.

Neste contexto, o desmonte de rochas deve ser entendido não apenas como uma operação técnica, mas como uma atividade que exige conformidade com um conjunto de regras e responsabilidades bem definidas.

Este tópico tem como objetivo apresentar uma visão geral desse ambiente regulatório, permitindo ao aluno compreender como o controle dos efeitos do desmonte, incluindo o flyrock, se insere dentro dessa estrutura.

## 3.2.1 O desmonte com explosivos como atividade regulada

O desmonte com explosivos é uma atividade que envolve riscos relevantes e, por isso, está sujeita a controle rigoroso por parte de normas e regulamentos.

Esse controle abrange diferentes aspectos, como:

- aquisição, transporte e armazenamento de explosivos
- planejamento e execução do desmonte
- segurança das operações
- proteção de pessoas e do meio ambiente

A regulamentação busca garantir que a atividade seja conduzida de forma segura, controlada e responsável. Isso significa que o profissional envolvido no desmonte deve atuar dentro de um conjunto de requisitos que vão além da técnica, incluindo obrigações legais e operacionais.

## 3.2.2 Normas técnicas, regulamentos e exigências operacionais

Dentro do ambiente regulatório, é importante diferenciar alguns conceitos fundamentais.

**Normas técnicas:** São documentos que estabelecem diretrizes, critérios e boas práticas para execução de atividades. Em geral, são elaboradas por entidades técnicas e têm como objetivo orientar a prática profissional.

**Regulamentos legais:** São instrumentos com força de lei, que estabelecem obrigações formais a serem cumpridas. Seu descumprimento pode gerar sanções legais.

**Exigências de segurança operacional:** São procedimentos e práticas adotados no dia a dia da operação, muitas vezes baseados em normas e regulamentos, mas adaptados à realidade específica de cada empreendimento.

**Responsabilidade técnica profissional:** Refere-se ao dever do profissional de garantir que a atividade seja conduzida de forma segura, adequada e conforme os requisitos aplicáveis, independentemente da existência de regras detalhadas para cada situação.

A compreensão dessas diferenças é essencial para interpretar corretamente o papel de cada elemento dentro do sistema de controle do desmonte.

## 3.2.3 Controle dos efeitos do desmonte dentro do ambiente normativo

As normas e regulamentos relacionados ao desmonte não tratam apenas do uso dos explosivos, mas também dos efeitos gerados pela detonação.

Entre esses efeitos, destacam-se:

- vibração no solo
- onda aérea
- projeção de fragmentos
- impactos ambientais

Em muitos casos, existem critérios técnicos mais bem definidos para alguns desses efeitos, como por exemplo para vibração e ruído, que podem ser medidos e comparados com limites estabelecidos. No entanto, mesmo quando não há critérios detalhados para todos os efeitos, como ocorre com o flyrock, a obrigação de controle permanece.

O ambiente normativo estabelece, de forma geral, que a operação deve ser conduzida de maneira a evitar danos, proteger pessoas e garantir a segurança.

## 3.2.4 Onde o flyrock se insere nesse contexto

O flyrock se insere no ambiente normativo como um dos efeitos do desmonte que deve ser controlado para garantir a segurança da operação e do entorno.

Embora não exista, na maioria dos casos, uma norma que estabeleça limites numéricos claros para o flyrock, isso não reduz sua importância dentro do sistema de controle. Pelo contrário, a ausência de critérios específicos exige uma atuação ainda mais cuidadosa por parte do profissional.

O controle do flyrock passa a depender de:

- interpretação técnica
- aplicação de boas práticas
- definição adequada de áreas de segurança
- adoção de critérios conservadores

Nesse contexto, o flyrock deixa de ser apenas um efeito físico e passa a ser um elemento central na gestão de risco do desmonte.

# 3.3 Referências brasileiras aplicáveis ao tema

No contexto brasileiro, o uso de explosivos e a execução de desmontes de rochas estão sujeitos a um conjunto de normas técnicas e regulamentações que visam garantir a segurança das operações, a proteção de pessoas e a prevenção de acidentes. Embora essas referências não tratem, na maioria dos casos, o flyrock de forma direta e detalhada, elas estabelecem princípios fundamentais que se aplicam ao seu controle.

## 3.3.1 ABNT NBR 9653 no controle do flyrock

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) é responsável pela elaboração de normas que orientam diversas atividades técnicas no país.

As normas técnicas brasileiras exercem um papel fundamental na estruturação de diversas atividades, não apenas como referência conceitual, mas como base objetiva para a definição de critérios de segurança, planejamento e controle operacional.

No contexto específico do desmonte com explosivos, a principal norma da ABNT aplicável é a **ABNT NBR 9653:2018 – Execução de desmonte de rocha com uso de explosivos**, que estabelece diretrizes técnicas voltadas principalmente para o controle dos efeitos das detonações em áreas sensíveis.

Embora a norma seja amplamente conhecida por tratar de vibrações e sobrepressão atmosférica, seu escopo é mais amplo e inclui aspectos diretamente relacionados à segurança da operação, entre eles o risco de projeção de fragmentos rochosos.

De acordo com o escopo da norma, tem-se que:

*"Esta Norma especifica a metodologia para reduzir os riscos inerentes ao desmonte de rocha com uso de explosivos em indústria de mineração e construção em geral, estabelecendo parâmetros a um grau compatível com a tecnologia disponível, para a segurança das populações vizinhas, referindo-se a danos estruturais e procedimentos recomendados quanto à resposta humana."*

E de forma ainda mais direta:

*"Esta Norma se aplica somente às emissões de ruídos impulsivos, vibrações pelo terreno e ultralançamentos decorrentes do desmonte de rocha por explosivos."*

A NBR 9653 estabelece que:

• o desmonte deve ser planejado e executado de forma a **evitar danos a pessoas, estruturas e equipamentos**
• devem ser adotadas medidas de controle para **todos os efeitos da detonação**, não apenas vibração
• a operação deve considerar as condições do entorno e os riscos associados

Nesse contexto, a projeção de fragmentos, ou seja, o flyrock, está diretamente incluída como um dos riscos que devem ser controlados.

**Definição normativa de ultralançamento**

A norma também estabelece uma definição clara para o fenômeno:

"Ultralançamento: lançamento de fragmento de rocha além do perímetro da área operacional do empreendimento."

Essa definição é extremamente importante do ponto de vista técnico, pois estabelece dois critérios objetivos:

• existe um limite espacial definido (perímetro operacional)

• qualquer fragmento que ultrapasse esse limite caracteriza ocorrência de ultralançamento

Ou seja:

→ não é necessário haver dano para caracterizar o flyrock

→ basta ultrapassar o limite da área operacional

Essa definição tem implicações diretas para:

• definição de zona de exclusão

• avaliação de desempenho do desmonte

• classificação de eventos como falha operacional

## Requisitos normativos para ultralançamento

No item 5 – Requisitos de avaliação, a norma estabelece:

"Em operações de desmonte de rocha por explosivos, devem ser observadas as condições estabelecidas em 5.1 a 5.3."

E de forma direta, no item 5.1 – Ultralançamento:

"*O ultralançamento não pode ocorrer além da área operacional do empreendimento, respeitadas as normas internas de segurança referentes à operação de desmonte*."

Esse é um dos pontos mais críticos da norma e precisa ser interpretado corretamente.

A exigência normativa estabelece que:

• o ultralançamento não é aceitável fora da área operacional

• a operação deve ser conduzida de forma a conter completamente os fragmentos

• as normas internas devem complementar esse controle

Do ponto de vista técnico, isso significa que:

→ o flyrock não é tratado como evento tolerável

→ ele é tratado como falha de controle do desmonte

## Interpretação técnica aplicada ao flyrock

A partir desses trechos normativos, podemos extrair conclusões fundamentais para a engenharia de desmonte:

### *1. O flyrock é um efeito normativamente reconhecido*

A norma inclui explicitamente o ultralançamento como um dos efeitos do desmonte, ao lado de vibração e sobrepressão.

Isso reforça que:

• não se trata de um efeito secundário irrelevante

• é um fenômeno que deve ser considerado no planejamento

### *2. Existe um critério objetivo de ocorrência*

A definição da norma elimina ambiguidades:

• ultrapassou o perímetro → ocorreu ultralançamento

Isso é extremamente importante para:

• análise de incidentes

• padronização de relatórios

• avaliação de desempenho

### *3. A norma estabelece um critério de não ocorrência*

Diferente de vibração, que admite limites aceitáveis, o ultralançamento tem um critério mais rígido:

→ não pode ocorrer fora da área operacional

Isso posiciona o flyrock como:

• um risco de alta severidade

• um evento que deve ser evitado, não apenas controlado

***4. A responsabilidade recai sobre o projeto e a execução***

Como a norma não fornece uma "fórmula" para evitar o flyrock, ela transfere a responsabilidade para:

• o planejamento do desmonte

• o controle da execução

• a definição adequada da área operacional

Isso conecta diretamente com os fatores já estudados no curso:

• confinamento

• geometria do plano de fogo

• condições geológicas

• execução operacional

Com isso fica claro que a ABNT NBR 9653 estabelece de forma clara que o ultralançamento é um dos efeitos relevantes do desmonte de rochas e define critérios objetivos para sua caracterização e controle. Ao determinar que fragmentos não podem ultrapassar a área operacional, a norma posiciona o flyrock como um evento indesejado e inaceitável fora dos limites definidos.

Dessa forma, o controle do ultralançamento deixa de ser apenas uma boa prática e passa a ser uma exigência técnica normativa, diretamente relacionada à qualidade do projeto, à disciplina operacional e à gestão de riscos da detonação.

## 3.3.2 NR-19 e NRM-16 aplicadas ao controle do flyrock

Além da ABNT NBR 9653, outras normas brasileiras fundamentais para o desmonte de rochas com explosivos são a NR-19 – Explosivos e a NRM-16 – Operações com Explosivos, ambas com forte impacto sobre o controle dos efeitos da detonação, incluindo o ultralançamento.

Embora essas normas não tratem o flyrock com a mesma objetividade conceitual da NBR 9653, elas estabelecem requisitos operacionais, de segurança e de controle que atuam diretamente sobre suas causas.

### *3.3.2.1 NR-19 – Explosivos*

A NR-19 estabelece os requisitos e as medidas de prevenção voltadas à segurança e à saúde dos trabalhadores em todas as etapas que envolvem explosivos, incluindo fabricação, manuseio, armazenamento e transporte.

De acordo com a norma:

A NR-19 tem como objetivo "estabelecer os requisitos e as medidas de prevenção para garantir as condições de segurança e saúde dos trabalhadores"

Além disso, a norma determina que:

As atividades com explosivos devem obedecer às disposições da própria NR-19 e ao normativo de explosivos do Exército Brasileiro

**Gestão de riscos e prevenção de acidentes**

A NR-19 exige que as organizações adotem uma abordagem estruturada de gestão de riscos por meio do Programa de Gerenciamento de Riscos (PGR), o qual deve contemplar, de forma específica:

- os riscos de incêndio
- os riscos de explosão
- as respectivas medidas de prevenção

Além disso, a norma estabelece a obrigatoriedade de elaboração de planos e procedimentos operacionais, incluindo:

- Plano de Emergência e Combate a Incêndio e Explosão
- Procedimentos operacionais para fabricação, armazenamento e manipulação de explosivos

**Controle de áreas e resposta a emergências**

Dentro do Plano de Emergência, a NR-19 estabelece que devem ser previstos procedimentos para situações de explosão, incluindo:

- acionamento de sistemas de alerta
- abandono da área
- isolamento da área afetada
- atendimento a vítimas

Essas exigências demonstram que a norma reconhece a necessidade de controle da área e de proteção das pessoas diante de eventos associados ao uso de explosivos.

**Interpretação aplicada ao flyrock**

A NR-19 não trata explicitamente do fenômeno do flyrock ou ultralançamento de fragmentos. No entanto, ao exigir:

- identificação e controle de riscos
- implementação de medidas preventivas
- planejamento de respostas a emergências envolvendo explosões

a norma estabelece uma base obrigatória para o controle dos riscos associados às detonações.

Nesse contexto, o flyrock deve ser entendido como um dos possíveis efeitos decorrentes de uma detonação, inserido no conjunto de riscos que devem ser considerados no PGR e tratados por meio de medidas de prevenção, controle operacional e planejamento de emergência.

Assim, embora não seja citado nominalmente, o controle do flyrock está diretamente relacionado ao cumprimento dos princípios de segurança estabelecidos pela NR-19.

### *3.3.2.2 NRM-16 – Operações com Explosivos*

A NRM-16 estabelece os requisitos técnicos e operacionais para o uso de explosivos na mineração, abordando desde o planejamento do desmonte até sua execução e controle em campo.

**Planejamento e responsabilidade técnica**

A norma determina que o plano de fogo deve ser elaborado por profissional legalmente habilitado:

*O plano de fogo da mina deve ser elaborado por profissional legalmente habilitado*

Além disso, a execução das atividades relacionadas ao desmonte deve ocorrer sob responsabilidade técnica:

*A execução do plano de fogo, operações de detonação e atividades correlatas devem ser supervisionadas ou executadas pelo técnico responsável ou pelo bláster*

**Controle da área e segurança da detonação**

A NRM-16 estabelece medidas obrigatórias relacionadas à segurança antes e durante a detonação, incluindo:

*A área de risco deve ser evacuada e devidamente vigiada*

Além disso, o responsável técnico ou bláster deve:

*certificar-se de que não haja mais pessoas na frente de desmonte e áreas de risco antes da detonação*

A norma também exige:

- acionamento de sirenes
- interdição de vias de acesso
- comunicação prévia das detonações

### Definição de áreas de segurança

Em operações a céu aberto, a norma estabelece que:

*devem ser definidos perímetros de segurança e métodos de monitoramento*

Esses perímetros podem ser ajustados mediante avaliação técnica:

*podem ser alterados mediante avaliação técnica que comprove segurança*

### Controle de projeção de fragmentos

Assim como a norma ABNT NBR 9653, a NRM-16 estabelece explicitamente que:

*não deve ocorrer lançamento de fragmentos de rocha além dos limites de segurança da mina*

E complementa:

*devem ser adotadas técnicas e medidas de segurança no planejamento e execução do desmonte*

Um ponto importante é que, enquanto a ABNT NBR 9653 trata o limite como a "área operacional do empreendimento", a NRM-16 utiliza o conceito de "limites de segurança da mina", direcionando a análise para a definição de zonas seguras que devem ser respeitadas durante a detonação. Essa abordagem deixa mais evidente que não se trata apenas de um limite físico previamente estabelecido, mas de um parâmetro que deve ser definido tecnicamente pela operação, considerando os riscos associados ao desmonte. Dessa forma, a NRM-16 reforça a responsabilidade operacional na definição desses limites, tornando o controle da projeção de fragmentos diretamente dependente da qualidade do planejamento e da execução, especialmente no que se refere ao risco de ultralançamentos.

### Execução e disciplina operacional

A norma estabelece que as operações devem seguir o plano definido e serem conduzidas por pessoal qualificado, incluindo:

- carregamento dos furos sob orientação
- verificação de quantidades carregadas
- controle da sequência de detonação

### Interpretação aplicada ao flyrock

A NRM-16 não utiliza explicitamente o termo flyrock ou ultralançamento, mas trata de forma especifica sobre o lançamento de fragmentos. Para isso ela estabelece:

- obrigatoriedade de plano de fogo
- controle da execução
- evacuação e vigilância da área de risco
- definição de perímetros de segurança
- proibição de lançamento de fragmentos além dos limites de segurança

A norma atua diretamente sobre os fatores que influenciam a geração e os impactos do flyrock. Dessa forma, o fenômeno do flyrock está inserido no conjunto de riscos operacionais que devem ser controlados por meio do planejamento técnico, da execução disciplinada e da correta definição das áreas de segurança.

## 3.3.3 Normas do Exército Aplicadas ao Flyrock

As normas do Exército Brasileiro aplicáveis aos explosivos não tratam o flyrock ou ultralançamento como fenômeno técnico de forma direta ou conceitual, como ocorre na ABNT NBR 9653 e na NRM-16. O foco desse sistema normativo está na fiscalização, no controle, na autorização e na segurança das atividades com produtos controlados, especialmente no âmbito do Decreto nº 10.030/2019 e da Portaria nº 147-COLOG/2019.

Ainda assim, essas normas se conectam de forma consistente com a prevenção do flyrock, porque exigem que a atividade com explosivos seja formalmente autorizada, documentada, planejada, executada sob responsabilidade definida e mantida sob controle fiscalizatório. A Portaria nº 147-COLOG/2019 estabelece que a execução do serviço de detonação deve ser precedida de autorização da Fiscalização de Produtos Controlados e atribui à empresa executante a responsabilidade pela elaboração do plano de fogo e por sua execução.

Além disso, a mesma portaria exige que cada detonação seja comunicada ao Serviço de Fiscalização de Produtos Controlados por meio de Aviso de Detonação e que o consumo dos explosivos empregados seja posteriormente informado por Aviso de Consumo. Também determina que a autorização para o serviço, o aviso de detonação, o aviso de consumo, o plano de fogo e o seu relatório permaneçam disponíveis para fiscalização. Essa estrutura reforça o caráter formal, controlado e rastreável da detonação, contribuindo diretamente para a redução de falhas operacionais e para a apuração técnica de eventuais ocorrências.

Outro ponto relevante está na Portaria nº 56-COLOG/2017, que trata do Plano de Segurança de PCE. Embora essa norma não discipline o plano de fogo, ela exige que o Plano de Segurança aborde análise de risco, controle de acesso, medidas de proteção a patrimônio e pessoas, medidas de contingência em caso de acidentes e capacitação de pessoal. Esses elementos não tratam especificamente do ultralançamento, mas fortalecem o controle preventivo da atividade com explosivos e a preparação da operação para lidar com desvios e emergências.

No caso do emprego imediato de explosivos, a Portaria nº 147-COLOG/2019 ainda exige plano de segurança específico, incluindo delimitação do local de guarda dos explosivos com observância da segurança de área, difusão de ocorrências e monitoramento permanente durante o pernoite do material no local. Embora a norma não defina critérios de cálculo para zonas de segurança em função do risco de flyrock, ela reforça a exigência de delimitação e controle da área, o que se relaciona diretamente com a responsabilidade técnica pela definição de distâncias seguras.

Dessa forma, mesmo sem tratar explicitamente o flyrock como fenômeno físico, as normas do Exército estabelecem uma base normativa importante para sua prevenção e controle. Ao exigir autorização prévia, comunicação formal das detonações, elaboração e execução do plano de fogo, análise de risco, medidas de contingência, segurança de área e manutenção da documentação à disposição da fiscalização, esse conjunto normativo atua diretamente sobre fatores que influenciam as causas e as consequências do ultralançamento.

## 3.3.4 NBR 9061 - Segurança de escavação a céu aberto

A ABNT NBR 9061, intitulada **Segurança de escavação a céu aberto**, é uma norma brasileira publicada originalmente em 1985 e, conforme confirmação oficial da ABNT, encontra-se vigente. A norma estabelece condições de segurança exigíveis para a elaboração de projetos e execução de escavações de obras civis a céu aberto, em solos e rochas.

Antes de utilizar essa norma como referência neste curso, é necessário destacar um ponto essencial: a própria NBR 9061 delimita seu campo de aplicação e informa que seu escopo não inclui escavações para mineração e túneis. Portanto, ela não deve ser aplicada diretamente como norma de segurança para operações de mineração. Sua inclusão neste material se justifica pela relevância técnica de alguns de seus dispositivos relacionados ao desmonte de rocha com explosivos e, principalmente, por apresentar uma referência numérica direta de distância mínima de evacuação, algo pouco comum nas normas brasileiras associadas ao tema.

No trecho dedicado ao uso de explosivos, a norma estabelece que nenhum fogo deve ser detonado sem que o plano geral de execução dos serviços e o esquema de fogo específico tenham sido aprovados. Esse plano deve incluir diversos elementos do desmonte, como quantidade, disposição, diâmetro, comprimento e inclinação dos furos, altura de bancada, tipo de explosivos e acessórios, cargas, sequência de detonação, carga por espera, localização do fogo, data e hora prevista para a detonação e dispositivos de proteção contra lançamento ou projeção de fragmentos.

Esse ponto é relevante porque, embora a norma não utilize o termo flyrock, ela menciona explicitamente o risco de lançamento ou projeção de fragmentos. Em zona urbana, a NBR 9061 ainda recomenda que a frente da bancada seja coberta com rede de cabos de aço, correntes, lonas ou pneus, com o objetivo de evitar que fragmentos de rocha sejam lançados sobre pessoas ou edificações vizinhas.

O aspecto mais importante para este curso está no item **10.7.2**, inserido no tópico **10.7 Evacuação e vigilância do local do fogo**, que apresenta uma referência direta de evacuação mínima:

*"Durante o carregamento, o local deve ser abandonado por todo pessoal não diretamente ligado à operação. Deve ser completamente evacuada uma área mínima limitada por 250 m a jusante e 200 m a montante, 10 min antes da detonação. Nos caminhos de acesso devem ser colocados elementos do serviço de segurança com bandeiras vermelhas. Esses elementos têm suficiente autoridade para impedir a passagem de qualquer pessoa não diretamente ligada à operação de carregamento e controle final."*

Essa referência deve ser interpretada com cautela. Os valores de **250 m a jusante e 200 m a montante** representam uma distância mínima indicada no escopo específico da norma, voltada a escavações civis a céu aberto com uso de explosivos. Eles não devem ser entendidos como distância universal de segurança, nem como critério suficiente para mineração ou para qualquer desmonte de rochas. A própria norma não apresenta um método de cálculo para esses valores e não os relaciona diretamente com variáveis como carga explosiva, diâmetro dos furos, altura de bancada, tampão, afastamento, direção de lançamento, geologia ou mecanismos de flyrock.

Além da distância mínima citada, o item 10.7 também traz elementos importantes para o conceito de cerco de área. O item 10.7.1 exige a instalação de sinais de alerta, em número e tamanho adequados, indicando que está sendo realizada escavação a fogo, com sinalização visível para todos que entrem ou passem próximo à obra. O item 10.7.3 estabelece o aviso final da detonação por sirene, com sinais sonoros progressivos 10 minutos, 5 minutos e 1 minuto antes do fogo. Já o item 10.7.4 trata da liberação dos acessos e do retorno ao local, indicando que o acesso ao local da detonação somente é permitido após 5 minutos da detonação.

Esses pontos são importantes porque mostram uma lógica operacional muito próxima do que atualmente se entende como controle de área para detonação: sinalização prévia, evacuação, vigilância dos acessos, autoridade dos responsáveis pelo bloqueio, aviso sonoro, controle do retorno e recolhimento de materiais não utilizados. Embora a norma seja voltada a obras civis e não à mineração, ela apresenta uma estrutura clara de prevenção da exposição de pessoas ao risco durante o desmonte com explosivos.

Dessa forma, a principal contribuição da NBR 9061 para este curso é servir como uma referência normativa vigente, porém complementar, demonstrando que existe no contexto brasileiro uma preocupação formal com plano de fogo, proteção contra projeção de fragmentos, evacuação de área, vigilância e controle de acessos em escavações a fogo. Sua referência numérica deve ser vista apenas como um **parâmetro mínimo inicial dentro de seu escopo original**, e não como substituto de uma análise técnica específica de risco de ultralançamento.

Para operações de mineração e para desmontes reais em campo, a definição da zona de exclusão deve sempre considerar as condições específicas do plano de fogo, do maciço rochoso, da geometria da bancada, dos mecanismos possíveis de flyrock, do histórico operacional e dos critérios técnicos de segurança adotados pela operação.

## 3.3.5 Exigências de segurança e responsabilidade técnica no contexto brasileiro

A análise das normas brasileiras aplicáveis ao desmonte de rochas com explosivos evidencia que, embora o ultralançamento não seja tratado de forma uniforme em todos os dispositivos legais e normativos, existe um conjunto consistente de exigências que atua diretamente sobre sua prevenção e controle. A ABNT NBR 9653 e a NRM-16 estabelecem critérios objetivos para o controle dos efeitos da detonação, incluindo a projeção de fragmentos. A NR-19 e as regulamentações do Exército Brasileiro estruturam o processo sob a ótica da segurança, do planejamento, do controle operacional, da autorização, da fiscalização e da rastreabilidade.

A ABNT NBR 9061 também contribui para essa discussão, mesmo não sendo uma norma específica para mineração. Seu escopo está relacionado a escavações de obras civis a céu aberto, em solos e rochas, e a própria norma exclui escavações para mineração e túneis. Ainda assim, ela é relevante como referência complementar porque trata de escavações em rocha com uso de explosivos, menciona dispositivos de proteção contra

lançamento ou projeção de fragmentos no plano de fogo e apresenta uma referência numérica mínima de evacuação de **250 m a jusante e 200 m a montante** para o contexto específico da norma.

Em conjunto, essas normas não apenas orientam a execução da atividade, mas também definem um ambiente normativo no qual o controle do flyrock deixa de ser opcional e passa a ser uma obrigação técnica. Ainda que algumas normas não utilizem o termo flyrock ou ultralançamento, elas tratam de elementos diretamente relacionados ao fenômeno, como projeção de fragmentos, evacuação de áreas, controle de acessos, proteção de pessoas e edificações, planejamento do fogo, execução supervisionada e definição de limites de segurança.

Nesse contexto, o cenário brasileiro impõe uma série de exigências relacionadas à segurança e à responsabilidade técnica, que devem ser atendidas de forma integrada ao longo de toda a operação de desmonte.

Essas exigências envolvem:

• a atuação de profissionais legalmente habilitados

• a elaboração de planos de fogo, planos de segurança e procedimentos operacionais adequados

• o cumprimento rigoroso dos requisitos legais e normativos

• a definição e o controle das áreas de segurança

• a evacuação e vigilância das áreas sujeitas aos efeitos da detonação

• a sinalização e o controle dos acessos antes, durante e após o fogo

• a responsabilidade direta pelos resultados da operação

Dentro dessa estrutura, a responsabilidade técnica assume papel central. Não se trata apenas de cumprir normas de forma automática, mas de compreender que essas normas estabelecem requisitos mínimos, que precisam ser interpretados e aplicados de acordo com as condições reais de campo. A existência de uma referência mínima, como a indicada pela NBR 9061 para escavações civis a céu aberto, não elimina a necessidade de uma avaliação específica do risco. Ao contrário, reforça que distâncias mínimas não devem ser confundidas com distâncias suficientes para todas as situações.

Assim, o profissional responsável pelo desmonte deve:

• interpretar corretamente as condições geológicas e operacionais

• avaliar os mecanismos possíveis de projeção de fragmentos

• tomar decisões seguras com base em critérios técnicos

• adotar medidas preventivas diante de incertezas e variabilidades

• definir áreas de segurança compatíveis com o risco real da detonação

• garantir que a operação esteja efetivamente sob controle em todas as etapas

Essa abordagem é essencial quando se trata do flyrock, pois o ultralançamento é um fenômeno que não depende apenas de conformidade normativa, mas da qualidade das decisões técnicas tomadas no planejamento e na execução. Mesmo em cenários onde todas as exigências formais são atendidas, falhas na interpretação do maciço, no controle do confinamento, na definição da geometria, na qualidade do tampão, no carregamento dos furos ou na execução operacional podem resultar em projeções indesejadas.

Dessa forma, a obrigação de prevenir acidentes, incluindo eventos de flyrock, está diretamente associada à atuação técnica responsável. Isso implica reconhecer que o controle do desmonte não é garantido apenas pela existência de normas, mas pela capacidade do profissional de aplicá-las de forma crítica, consistente e adaptada à realidade da operação. No contexto brasileiro, as normas fornecem a base mínima de segurança; cabe à engenharia transformar essa base em decisões concretas, capazes de proteger pessoas, equipamentos, estruturas e o entorno da área detonada.

## 3.4 Referências internacionais e conceitos operacionais relacionados à área de detonação

Além das referências brasileiras, o controle do desmonte com explosivos e dos seus efeitos também é amplamente tratado no cenário internacional. Entretanto, diferentemente do que ocorre em alguns sistemas normativos nacionais, não existe um único padrão internacional universal sobre flyrock. O que se observa é a formação de um conjunto de referências composto por regulamentos legais, códigos de prática, guias técnicos e orientações emitidas por agências reguladoras e órgãos de segurança mineral. Em comum, essas referências reforçam que a detonação deve ser tratada como um evento espacialmente controlado, no qual a definição adequada da área de risco, a exclusão de pessoas e a proteção de estruturas são elementos centrais da segurança operacional.

### 3.4.1 Importância das referências internacionais

As referências internacionais são importantes porque ampliam a base de conhecimento técnico e mostram como diferentes países tratam a relação entre desmonte, risco e controle espacial. Em muitos casos, essas referências não buscam prever exatamente cada fragmento lançado, mas exigem que a operação seja planejada de forma a manter os efeitos do desmonte dentro de uma área previamente controlada. Esse raciocínio é especialmente importante para o flyrock, pois reforça que a gestão do fenômeno depende mais da delimitação adequada de áreas de risco e da robustez das barreiras de controle do que da expectativa de previsões absolutas.

### 3.4.2 Estados Unidos: MSHA e o conceito de área de detonação

Nos Estados Unidos, a principal referência normativa para operações de desmonte em minas a céu aberto é a regulamentação da MSHA, especialmente o 30 CFR Part 56. Esse regulamento define o conceito de *blast area* como a área na qual os efeitos da detonação, incluindo projeção de material, ondas de choque ou gases, podem causar lesões às pessoas.

A norma estabelece que a definição dessa área deve considerar fatores como características geológicas, geometria do desmonte, diâmetro e profundidade dos furos, sistema de retardos, carga por espera, tipo de explosivo e características do tampão. Além disso, exige que, antes da detonação, todas as pessoas sejam retiradas da *blast area*, salvo aquelas devidamente protegidas em abrigo adequado, e que os acessos à área sejam controlados.

Do ponto de vista do flyrock, esse modelo é particularmente relevante porque o fenômeno está incorporado diretamente na definição da área de risco, por meio do conceito de material projetado. Isso implica que a possibilidade de ultralançamento deve ser considerada obrigatoriamente na delimitação da área de detonação, influenciando diretamente sua extensão e seu controle operacional.

### 3.4.3 Reino Unido: risco fora da operação e proteção de terceiros

No Reino Unido, a base regulatória está nas *Quarries Regulations 1999*, complementadas pelas orientações da HSE. Essas normas estabelecem que as operações devem ser conduzidas de forma a proteger não apenas os trabalhadores da pedreira, mas também qualquer pessoa que possa ser afetada pela atividade, incluindo indivíduos fora dos limites da operação.

No contexto das detonações, o entendimento adotado é que os riscos não se limitam à área interna da pedreira. Efeitos como projeção de fragmentos, vibrações e onda aérea podem ultrapassar os limites físicos do empreendimento, sendo responsabilidade da operação avaliar esses impactos e adotar medidas de controle adequadas.

Esse enfoque é particularmente importante para o flyrock, pois reforça que o critério de segurança não deve ser definido apenas com base nos limites operacionais da mina, mas sim no alcance potencial dos efeitos da detonação. Assim, sempre que houver possibilidade de projeção de fragmentos além desses limites, a área de risco deve ser ampliada e devidamente controlada.

## 3.4.4 Austrália: zona de exclusão e controle operacional do flyrock

Na Austrália, o controle do flyrock é tratado de forma prática e direta por meio de reguladores estaduais e guias operacionais. Em estados como Queensland e Austrália Ocidental, documentos oficiais destacam que o ultralançamento é um risco significativo, com registros de eventos reais envolvendo danos a veículos, estruturas e áreas externas à mina.

Esses materiais estabelecem que a definição da zona de exclusão deve considerar fatores como geologia, geometria do desmonte, diâmetro dos furos, profundidade de carga, sequência de iniciação, topografia e presença de infraestrutura ou áreas públicas no entorno. Também reforçam que a zona de exclusão deve estar livre de pessoas antes da detonação e ser efetivamente controlada.

Outro ponto relevante é a responsabilidade operacional. As orientações indicam que a definição das distâncias de segurança não deve depender de decisões isoladas, mas sim de um processo estruturado, envolvendo planejamento, validação e controle. Além disso, quando houver risco de projeção de fragmentos além da área controlada, recomenda-se a adoção de medidas adicionais, como redução da energia do desmonte, ajustes no plano de fogo ou uso de barreiras de contenção.

Esse conjunto de práticas evidencia que o controle do flyrock não depende apenas do projeto, mas da integração entre planejamento, execução e gestão operacional da detonação.

## 3.4.5 África do Sul: abordagem explícita e preventiva para o flyrock

A África do Sul apresenta um dos referenciais mais diretos e explícitos sobre o controle do flyrock. Guias recentes baseadas na *Mine Health and Safety Act* estabelecem padrões mínimos para vibrações, onda aérea e projeção de fragmentos em operações próximas a estruturas e comunidades.

Esses documentos determinam que a operação deve identificar e avaliar os riscos associados ao desmonte, utilizando essas informações para definir limites, restrições e condições específicas de execução. Um ponto particularmente relevante é que não são estabelecidos níveis aceitáveis de flyrock fora da área controlada, sendo o objetivo evitar completamente a projeção de fragmentos além da zona de exclusão definida.

Além disso, quando a avaliação indicar que os efeitos da detonação podem ultrapassar os limites da operação, deve ser criada uma área controlada adicional, com exclusão ou evacuação de pessoas. O planejamento do desmonte também pode exigir abordagem multidisciplinar, especialmente quando há risco para estruturas ou áreas sensíveis.

Essa abordagem reforça que o flyrock deve ser tratado como um risco crítico, cuja prevenção depende da combinação entre avaliação de risco, planejamento técnico e controle rigoroso da área de segurança.

## 3.4.6 Peru: controle de voladuras e proteção de áreas externas

No Peru, a regulamentação das operações com explosivos na mineração está estruturada no Regulamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería, que estabelece requisitos técnicos e operacionais para o planejamento e execução das detonações, com forte ênfase na proteção de pessoas, instalações e áreas externas à operação.

Dentro desse contexto, a norma exige que as operações de voladura sejam previamente planejadas e conduzidas sob responsabilidade técnica, incluindo a necessidade de avaliação das condições do desmonte, dos parâmetros operacionais e dos possíveis impactos da detonação. Um ponto particularmente relevante é a exigência de análise específica quando as detonações são realizadas próximas a edificações, infraestruturas ou propriedades de terceiros, o que implica a consideração direta do alcance potencial dos efeitos da explosão.

Essa abordagem reforça que o controle da detonação não deve se limitar à área interna da mina, mas deve considerar também os riscos associados ao entorno, especialmente quando há possibilidade de influência sobre áreas externas. Nesse sentido, a regulamentação peruana se aproxima de forma clara do conceito de zona de exclusão, ao exigir que o planejamento da voladura incorpore medidas de segurança adequadas para evitar danos fora da área controlada.

Do ponto de vista do flyrock, embora o termo não seja tratado de forma conceitual explícita, a exigência de controle dos impactos da detonação sobre estruturas e áreas vizinhas estabelece uma conexão direta com o

fenômeno. A necessidade de avaliar previamente o alcance dos efeitos da voladura implica, na prática, a consideração da projeção de fragmentos como um dos fatores que devem ser controlados.

Dessa forma, o modelo peruano reforça a importância de integrar planejamento técnico, avaliação de risco e controle operacional, destacando que a segurança da detonação depende da capacidade da operação de prever e limitar seus efeitos, especialmente quando há interação com áreas externas à mina.

## 3.4.7 Contribuições dessas referências para o controle do flyrock

Quando analisadas em conjunto, essas referências internacionais mostram uma convergência muito clara. Em primeiro lugar, praticamente todas tratam a detonação como um evento que deve ser espacialmente delimitado e controlado, por meio da definição prévia de áreas de risco, zonas de exclusão ou blast areas.

Em segundo lugar, o flyrock aparece de forma direta ou indireta como um dos efeitos considerados na definição dessas áreas, servindo como base para a evacuação de pessoal, controle de acessos, uso de sentinelas, implementação de barreiras e, quando necessário, revisão dos parâmetros do desmonte.

Em terceiro lugar, observa-se uma tendência consistente de estruturar o controle do risco a partir de três eixos principais: definição adequada da área de risco, qualidade do planejamento do desmonte e disciplina operacional na execução da detonação.

Essas referências também reforçam uma ideia central para o curso:

*o controle do flyrock não depende da previsão exata da trajetória de cada fragmento, mas da capacidade de projetar e conduzir a operação de forma que qualquer projeção plausível permaneça contida dentro de uma área previamente definida, evacuada e efetivamente controlada.*

## 3.5 Limitações normativas e a dificuldade de estabelecer critérios para o flyrock

Ao longo deste módulo, foi possível compreender que o desmonte de rochas com explosivos está inserido em um ambiente normativo consistente, composto por normas brasileiras e referências internacionais que orientam a segurança, o planejamento e o controle das detonações. Essas normas estabelecem diretrizes importantes e, em muitos casos, critérios objetivos para avaliação dos efeitos do desmonte.

No entanto, quando se trata especificamente do flyrock, observa-se uma limitação relevante: a dificuldade de tratar o fenômeno por meio de critérios normativos simples, objetivos e universalmente aplicáveis. Diferentemente de outros efeitos, o ultralançamento apresenta características que dificultam sua padronização, exigindo uma abordagem mais técnica, interpretativa e baseada em gestão de risco.

### 3.5.1 Limitações das normas no tratamento do flyrock

As normas aplicáveis ao desmonte de rochas, tanto no Brasil quanto no cenário internacional, tratam de forma mais estruturada os efeitos que podem ser medidos diretamente, como vibração e onda aérea. Esses fenômenos possuem parâmetros bem definidos, como velocidade de partícula e pressão sonora, que permitem monitoramento, comparação com limites estabelecidos e avaliação objetiva de conformidade.

Já o flyrock apresenta uma natureza diferente. Trata-se de um fenômeno físico que envolve a projeção de fragmentos rochosos com trajetórias variáveis, diferentes velocidades iniciais e forte dependência das condições específicas de cada desmonte. Por essa razão, ele não se adapta facilmente a um modelo de controle baseado em um único parâmetro mensurável.

Diante dessa característica, as normas tendem a abordar o flyrock de forma direta ou indireta por meio de exigências relacionadas ao planejamento do desmonte, ao controle da execução, à definição de áreas de segurança, à prevenção de acidentes e ao controle de acesso. Em geral, em vez de estabelecer limites numéricos universais para o alcance dos fragmentos, elas atuam sobre as condições que influenciam o fenômeno, como geometria do plano de fogo, confinamento, organização operacional, evacuação e vigilância da área. Mesmo quando aparece uma referência numérica mínima, como na NBR 9061, essa distância deve ser entendida dentro do escopo específico da norma e não como critério geral de predição ou controle do flyrock.

Essa abordagem não representa uma lacuna normativa, mas sim uma adaptação à natureza do problema. O flyrock não pode ser tratado apenas como um valor a ser medido, mas como um risco que precisa ser controlado por meio de decisões técnicas e operacionais consistentes.

### 3.5.2 Dificuldade de estabelecer critérios universais para o flyrock

A principal dificuldade na normatização do flyrock está na impossibilidade de definir critérios universais que sejam válidos para todas as situações. Isso ocorre porque o fenômeno é altamente variável e depende da interação de múltiplos fatores, como características geológicas, grau de confinamento, energia liberada, qualidade do carregamento, condições de execução e variabilidade operacional.

Além disso, existe uma diferença fundamental entre critérios físicos e critérios de risco. Um critério físico busca descrever o fenômeno em termos mensuráveis, como distância de lançamento ou velocidade de fragmentos. Já o critério de risco considera quem ou o que pode ser atingido, qual a probabilidade de ocorrência e qual a severidade das consequências.

No caso do flyrock, essa diferença é determinante. Dois eventos com a mesma distância de projeção podem ter impactos completamente distintos, dependendo do contexto. Um pode ocorrer em área isolada, sem consequências, enquanto outro pode atingir pessoas, equipamentos ou estruturas, gerando danos significativos. Isso demonstra que a distância, isoladamente, não é suficiente para representar o risco real.

Da mesma forma, a tentativa de estabelecer limites universais esbarra na diversidade dos cenários operacionais. Um mesmo valor de alcance pode ser aceitável em uma área remota e totalmente inadequado em operações próximas a comunidades ou infraestrutura sensível. O contexto local passa a ser determinante na definição do que é seguro.

Por essa razão, o controle do flyrock exige uma abordagem baseada em análise técnica, avaliação de risco e definição adequada de áreas de segurança. A ausência de critérios numéricos universais, aplicáveis a todos os tipos de desmonte, não reduz a responsabilidade técnica. Pelo contrário, exige maior capacidade de interpretação, tomada de decisão e adoção de medidas preventivas. Referências numéricas mínimas, quando existentes, devem ser vistas como ponto de partida dentro de seu escopo específico, e não como substitutas da análise técnica do risco.

Nesse contexto, o controle do flyrock está diretamente ligado à qualidade da engenharia aplicada, à disciplina operacional e à responsabilidade técnica na condução do desmonte. É essa combinação que permite gerenciar o risco de forma eficaz, mesmo na ausência de critérios universais.

# 3.6 Responsabilidade técnica e implicações legais no contexto do flyrock

O controle do flyrock, conforme discutido nos tópicos anteriores, não depende exclusivamente de normas ou parâmetros técnicos isolados. Ele é resultado direto da atuação integrada de diferentes profissionais ao longo de todo o processo de desmonte, desde o planejamento até a execução em campo.

Nesse contexto, a responsabilidade deixa de ser apenas técnica e passa a assumir um caráter mais amplo, envolvendo também implicações legais, administrativas e institucionais. As decisões tomadas durante o planejamento e a execução do desmonte possuem consequências diretas não apenas sobre o desempenho operacional, mas também sobre a segurança, a conformidade normativa e a responsabilidade perante terceiros.

Compreender como essa responsabilidade se distribui entre os diferentes agentes e quais são suas possíveis consequências é fundamental para garantir um controle efetivo do flyrock e uma atuação profissional consistente.

## 3.6.1 Responsabilidade técnica no planejamento e na execução do desmonte

A responsabilidade técnica no desmonte de rochas é compartilhada entre diferentes funções, mas distribuída de forma clara e proporcional às atribuições de cada profissional.

O **responsável técnico** desempenha papel central na definição das condições técnicas da operação, sendo responsável pela elaboração e validação do plano de fogo, definição de parâmetros de projeto, avaliação das condições geológicas, análise de riscos, definição das áreas de segurança e previsão de medidas de proteção contra projeção de fragmentos quando aplicável. No contexto do flyrock, sua atuação está diretamente ligada à capacidade de antecipar cenários de risco e adotar critérios conservadores quando necessário.

O **blaster**, por sua vez, é responsável pela execução do desmonte e pela transformação do planejamento em realidade operacional. Sua atuação envolve o controle do carregamento, a verificação das condições dos furos, a condução da detonação e o cumprimento rigoroso dos procedimentos de segurança. No controle do flyrock, o blaster exerce papel crítico ao identificar desvios, ajustar procedimentos e interromper a operação em caso de condições inseguras.

A **equipe operacional e a supervisão** complementam esse processo, atuando na preparação da área, no controle de acessos, na verificação das condições antes da detonação e na garantia de que os procedimentos sejam efetivamente aplicados. A supervisão, em especial, tem papel importante na coordenação das atividades e na tomada de decisão em situações de risco.

Embora a responsabilidade seja compartilhada, ela não é indistinta. Cada função possui atribuições específicas, níveis de decisão próprios e responsabilidades proporcionais ao seu papel. O controle do flyrock depende diretamente da integração entre essas funções, sendo que falhas em qualquer etapa podem comprometer a segurança do desmonte.

Além disso, existe um dever comum a todos os envolvidos: agir de forma preventiva. Isso implica antecipar riscos, reconhecer desvios, evitar a continuidade de condições inseguras e priorizar a segurança em relação à produtividade. No contexto do flyrock, a prevenção é a principal ferramenta de controle.

## 3.6.2 Implicações legais e institucionais associadas ao flyrock

Quando ocorre um evento de flyrock com consequências relevantes, a responsabilidade ultrapassa o campo técnico e passa a ter desdobramentos formais em diferentes esferas.

A **responsabilidade civil** está relacionada à obrigação de reparar danos causados a terceiros, podendo envolver indenizações por danos a propriedades, estruturas, equipamentos ou lesões a pessoas. Esse tipo de responsabilização, em muitos casos, independe da intenção, sendo baseado no nexo entre o evento e o dano causado.

A **responsabilidade criminal** pode surgir em situações que envolvem lesões graves, fatalidades ou condutas caracterizadas como negligência, imprudência ou imperícia. Nesses casos, a investigação busca identificar falhas relevantes no controle do desmonte, descumprimento de procedimentos de segurança ou decisões técnicas inadequadas que tenham contribuído para o evento.

Já a **responsabilidade administrativa** está relacionada à atuação de órgãos fiscalizadores, podendo resultar em autuações, multas, exigência de medidas corretivas, restrições operacionais ou até suspensão de atividades. A severidade dessas medidas depende da gravidade do evento e do nível de controle demonstrado pela operação.

Além dessas esferas formais, os eventos de flyrock também geram consequências reputacionais significativas. A perda de confiança da comunidade, o desgaste da imagem institucional, a exposição negativa em mídias e o aumento da pressão regulatória podem impactar diretamente a continuidade e a sustentabilidade da operação.

Quando o flyrock ultrapassa os limites da área operacional e atinge terceiros, a gravidade do evento é ampliada de forma significativa. Nesses casos, o impacto deixa de ser interno e passa a envolver pessoas, propriedades e infraestrutura externas, aumentando a repercussão, o rigor das investigações e a pressão institucional.

Por isso é importante ter claro que a responsabilidade associada ao flyrock é simultaneamente técnica, operacional e legal. O controle efetivo desse risco depende da qualidade do planejamento, da precisão da execução, da integração entre as equipes e da adoção de uma postura preventiva em todas as etapas do desmonte.

Quando essa estrutura falha, as consequências ultrapassam o campo operacional, alcançando esferas civis, criminais, administrativas e reputacionais, com impactos potencialmente severos para profissionais e organizações.

Por isso, o controle do flyrock deve ser compreendido não apenas como uma exigência técnica, mas como uma obrigação profissional e institucional, diretamente ligada à segurança, à conformidade e à sustentabilidade das operações.

# 3.7 Controle, rastreabilidade e limites da abordagem normativa no desmonte

O controle do flyrock, conforme desenvolvido ao longo deste módulo, não se limita ao planejamento adequado e à execução correta do desmonte. Ele também depende da capacidade de registrar, monitorar, analisar e comprovar, de forma objetiva e verificável, que o processo foi conduzido conforme os critérios técnicos, operacionais e normativos estabelecidos.

Nesse contexto, ferramentas como registros operacionais, inspeções de campo e rastreabilidade são fundamentais para garantir controle efetivo do processo. Ao mesmo tempo, é necessário reconhecer que, mesmo com toda a estrutura normativa e documental, o controle do flyrock não pode ser reduzido a uma abordagem puramente formal.

A gestão eficiente do desmonte exige a integração entre documentação, verificação prática e aplicação consistente de engenharia e boas práticas. Esse equilíbrio é o que permite transformar conformidade formal em controle real do risco.

## 3.7.1 Registros, inspeções e rastreabilidade como base do controle operacional

Os registros operacionais constituem a base da rastreabilidade do desmonte, permitindo documentar de forma estruturada todas as etapas do processo. Informações como condições de perfuração, parâmetros do plano de fogo, execução do carregamento e sequenciamento da detonação são essenciais para compreender como a operação foi conduzida.

A existência de registros consistentes permite comparar o planejado com o executado, identificar desvios, analisar desempenho e, principalmente, investigar eventos. Sem esse nível de documentação, o processo passa a depender de percepção e memória, reduzindo significativamente a capacidade de controle e aprendizado.

Entre os registros mais relevantes, destacam-se os logs de perfuração e os controles de carregamento. Os logs de perfuração devem incluir dados como profundidade dos furos, diâmetro, presença de água, perdas ou desvios e características do material perfurado. Já os controles de carregamento devem registrar tipo de explosivo, quantidade aplicada, altura de coluna explosiva, comprimento de tampão e eventuais ajustes realizados em campo. Esses dados são fundamentais para entender a distribuição de energia no maciço e identificar possíveis causas de desvios, incluindo eventos de flyrock.

As inspeções de campo complementam esse processo ao garantir que o planejamento esteja sendo efetivamente executado. Elas devem ocorrer em diferentes etapas, antes do carregamento, durante a execução e antes da detonação, verificando condições dos furos, presença de anomalias, aplicação correta do plano de fogo, isolamento da área, sinalização, vigilância dos acessos e ausência de pessoas em zonas de risco.

A rastreabilidade, por sua vez, permite reconstruir o desmonte de forma detalhada, respondendo ao que foi planejado, executado e ajustado, bem como às condições presentes no momento da operação. Do ponto de vista da segurança, ela facilita a identificação de causas e contribui para a melhoria contínua. Do ponto de vista da responsabilidade, protege os profissionais quando o processo foi corretamente conduzido e evidencia falhas quando existem desvios.

Além disso, a comprovação técnica da conformidade, por meio de registros organizados, relatórios pós-desmonte e evidências de inspeção, é essencial para auditorias, atendimento a órgãos reguladores e defesa técnica em caso de incidentes. Essa capacidade de demonstrar controle é um indicativo direto da maturidade operacional.

## 3.7.2 Limitações da abordagem normativa e papel das boas práticas e da engenharia aplicada

Apesar da importância das normas e da documentação, é fundamental compreender que o simples cumprimento formal de requisitos não garante, por si só, o controle efetivo do flyrock.

As normas estabelecem uma base mínima de segurança, definindo requisitos, diretrizes e obrigações que devem ser atendidos. Essa base é indispensável e representa o ponto de partida para qualquer operação segura. No entanto, ela não contempla todas as variáveis envolvidas no desmonte, especialmente no que se refere à complexidade e variabilidade do flyrock. Mesmo quando uma norma apresenta referência mínima de evacuação ou controle de área, essa referência não elimina a necessidade de avaliação técnica específica.

Uma operação pode estar formalmente em conformidade e, ainda assim, apresentar riscos elevados se o plano de fogo não considerar adequadamente as condições geológicas, se houver falhas na execução ou se não forem adotadas margens de segurança compatíveis com o cenário. Isso evidencia que a conformidade normativa é necessária, mas não suficiente.

Nesse contexto, as boas práticas operacionais desempenham papel fundamental ao adaptar os procedimentos à realidade específica de cada operação. Elas envolvem padronização de processos, controle rigoroso da execução, verificação contínua das condições de campo e aplicação de margens de segurança adequadas. Essas práticas são construídas a partir da experiência acumulada, da análise de eventos anteriores e do aprendizado organizacional.

A engenharia aplicada é o elemento que conecta norma, teoria e prática. Ela permite interpretar o cenário específico, ajustar parâmetros do desmonte, antecipar riscos e definir medidas de controle adequadas. No caso do flyrock, essa capacidade é essencial para compensar incertezas e adaptar o plano de fogo às condições reais do maciço e da operação.

Nesse ponto, a ética profissional assume papel central nesse processo. O profissional deve atuar além do que está explicitamente previsto nas normas, priorizando a segurança, adotando decisões conservadoras quando necessário e interrompendo a operação diante de condições inseguras. Essa postura é fundamental para evitar eventos críticos, especialmente em um fenômeno que não pode ser completamente controlado por regras fixas.

Para finalizar é importante ter em mente que o controle efetivo do flyrock depende da integração entre registros consistentes, inspeções rigorosas, rastreabilidade adequada e aplicação de engenharia e boas práticas. A capacidade de documentar e comprovar o processo é tão importante quanto a execução em si.

Ao mesmo tempo, é essencial reconhecer que a abordagem normativa, embora indispensável, possui limitações. O controle real do risco depende da capacidade técnica, do julgamento profissional e da postura preventiva dos envolvidos.

É essa combinação entre conformidade, prática operacional e engenharia aplicada que permite transformar exigências formais em segurança efetiva no desmonte de rochas.

# 3.8 Fechamento do módulo e preparação para os próximos temas

Ao longo deste módulo, foi construída uma visão ampliada sobre o controle do flyrock, saindo de uma abordagem puramente técnica e incorporando os aspectos normativos, legais e éticos que orientam a prática profissional.

Ficou claro que o controle do desmonte não se limita à execução operacional, mas envolve responsabilidade formal, tomada de decisão e capacidade de demonstrar conformidade.

Neste momento, é fundamental consolidar os principais conceitos desenvolvidos e preparar o avanço do curso para o entendimento mais profundo dos mecanismos que dão origem ao flyrock.

## 3.8.1 Síntese normativa e de responsabilidade técnica

O Módulo 3 demonstrou que o controle do flyrock está diretamente ligado ao cumprimento de deveres técnicos e legais.

Entre os principais pontos consolidados, destacam-se:

- o desmonte com explosivos é uma atividade regulada, sujeita a normas, diretrizes e exigências de segurança
- o flyrock, mesmo sem critérios normativos específicos, está inserido no conjunto de riscos que devem ser controlados
- a ausência de critérios numéricos universais para o flyrock não elimina, em nenhuma hipótese, a responsabilidade técnica
- 
- o profissional deve atuar com base em:
    - conhecimento técnico
    - boas práticas
    - interpretação das condições de campo
    - critérios conservadores

Também foi reforçado que:

- registros, inspeções e rastreabilidade são fundamentais para o controle e para a defesa técnica
- a responsabilidade é compartilhada, mas com atribuições bem definidas
- eventos de flyrock podem gerar consequências civis, criminais, administrativas e reputacionais

Essa base normativa e de responsabilidade é essencial para sustentar uma atuação segura e consistente.

## 3.8.2 O que o aluno deve ter entendido ao final do módulo

Ao concluir este módulo, o aluno deve ser capaz de compreender que:

- o controle do flyrock não é opcional, mas uma obrigação técnica, legal e ética
- cumprir normas é indispensável, mas não garante controle absoluto do fenômeno
- a ausência de critérios universais específicos para o flyrock exige maior rigor na tomada de decisão
- a prevenção depende da integração entre:
    - conformidade normativa

- boas práticas operacionais
- engenharia aplicada
- disciplina na execução
- capacidade de análise e julgamento

Além disso, o aluno deve ter assimilado que:

- o controle efetivo não se baseia apenas em regras, mas na qualidade da atuação profissional
- a responsabilidade técnica envolve antecipação de riscos e não apenas reação a eventos
- a segurança depende da capacidade de transformar exigências formais em controle real do processo

Por fim, a atuação segura exige mais do que conformidade formal. Exige conhecimento, disciplina, registro, análise e tomada de decisão consciente.

Com essa base consolidada, o curso avança agora para o estudo dos mecanismos de geração do flyrock, aprofundando a compreensão do fenômeno e preparando o caminho para seu controle efetivo.

# Módulo 4. Mecanismos de Geração de Flyrock

## 4.1 Abertura do módulo e visão geral dos mecanismos de geração

Nos módulos anteriores, foi construída uma base sólida para compreender o flyrock sob diferentes perspectivas. Primeiro, o fenômeno foi definido e contextualizado dentro do desmonte de rochas com explosivos. Em seguida, foram analisados seus riscos, suas consequências e sua relevância como um dos principais fatores de segurança da atividade. Posteriormente, o tema foi conectado ao ambiente normativo, às responsabilidades técnicas e às obrigações legais associadas ao seu controle.

A partir deste ponto, o curso avança para um nível mais profundo de entendimento: como o flyrock é gerado. Essa mudança de foco é fundamental. Para controlar efetivamente o fenômeno, não basta saber que ele existe, nem apenas reconhecer sua gravidade ou cumprir requisitos formais. É necessário compreender os processos físicos e operacionais que dão origem ao lançamento de fragmentos.

Neste módulo, o flyrock deixa de ser analisado apenas como risco e passa a ser estudado como resultado de mecanismos específicos, que podem ser identificados, interpretados e, em muitos casos, prevenidos.

### 4.1.1 O flyrock como resultado de liberação descontrolada de energia

O flyrock é consequência direta da forma como a energia explosiva é liberada e interage com o maciço rochoso.

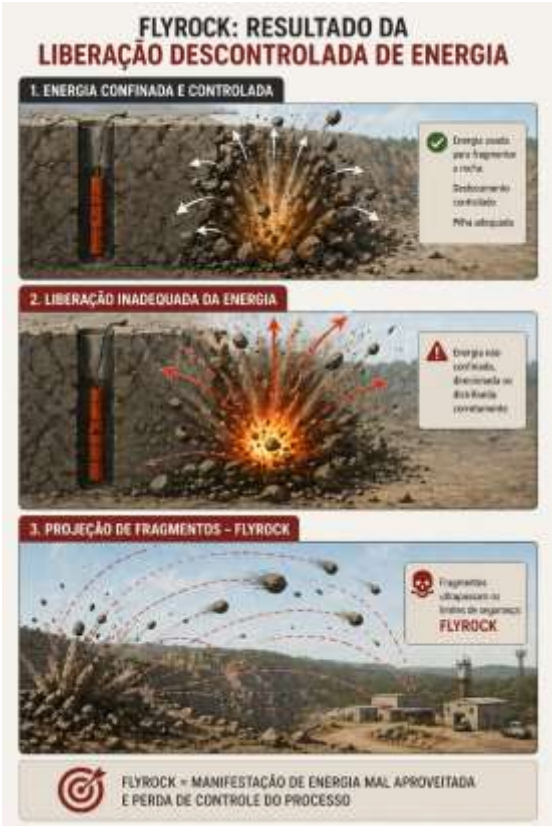
Como já vimos no modulo introdutório, em um desmonte bem controlado, a energia é utilizada para:

- fragmentar a rocha
- promover o deslocamento desejado
- gerar uma pilha adequada para as etapas seguintes

No entanto, quando essa energia não é adequadamente confinada, direcionada ou distribuída, parte dela pode se manifestar na forma de projeção de fragmentos. Nesse contexto, o flyrock pode ser entendido como:

- uma manifestação de energia mal aproveitada
- um indicativo de perda de controle do processo
- um efeito associado à liberação inadequada da energia explosiva

Essa visão é fundamental para entender que o fenômeno não surge “do nada”, mas sim como consequência de condições específicas do desmonte.




### 4.1.2 Por que entender os mecanismos é essencial para controlar o fenômeno

O controle do flyrock depende diretamente da capacidade de identificar e compreender os mecanismos que levam à sua geração.

Sem esse entendimento, a atuação tende a ser:

- reativa, baseada apenas em correções após eventos
- limitada a ajustes empíricos
- pouco eficaz na prevenção de ocorrências mais severas

Por outro lado, quando os mecanismos são compreendidos, torna-se possível:

- antecipar cenários de risco
- reconhecer condições críticas antes da detonação
- ajustar o plano de fogo de forma mais precisa
- melhorar a tomada de decisão em campo

Além disso, a identificação correta do mecanismo permite interpretar eventos ocorridos, facilitando a análise de causas e a implementação de medidas corretivas mais eficazes.

## 4.1.3 Visão geral dos principais mecanismos que serão estudados

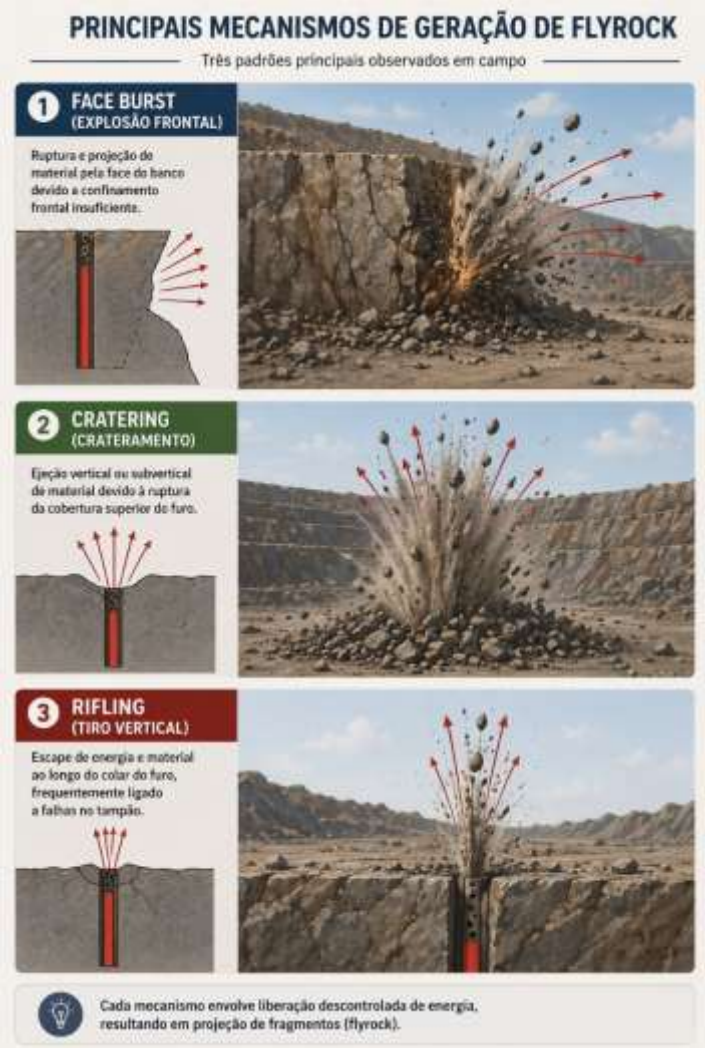
Ao longo deste módulo, serão estudados os principais mecanismos de geração de flyrock, que representam padrões recorrentes observados em campo.

Entre eles, destacam-se:

- **face burst (Explosão Frontal):** Associado à ruptura e projeção de material pela face do banco, geralmente em função de confinamento frontal insuficiente.
- **Cratering (Crateramento):** Relacionado à ejeção vertical ou subvertical de material, normalmente devido a ruptura da cobertura superior do furo.
- **Rifling (Tiro vertical):** Associado ao escape de energia e material ao longo do colar do furo, frequentemente ligado a falhas no tampão.

Além desses mecanismos principais, também serão abordados:

- padrões de ejeção em diferentes direções
- influência da geometria do desmonte
- papel da geologia e das descontinuidades
- situações especiais, como o desmonte secundário




O objetivo não é apenas descrever esses mecanismos, mas permitir que o aluno desenvolva capacidade de leitura técnica, relacionando condições de campo com o comportamento observado.

# 4.2 Conceito de confinamento e falha de confinamento da energia explosiva

O comportamento da energia explosiva no interior do maciço rochoso é o fator central que determina o resultado de um desmonte. Quando essa energia é corretamente confinada e direcionada, ela é utilizada de forma eficiente para fragmentar e deslocar a rocha de maneira controlada. No entanto, quando o confinamento falha ou se torna insuficiente, a energia tende a escapar por caminhos não previstos, podendo gerar efeitos indesejados.

Entre esses efeitos, o flyrock se destaca como uma das manifestações mais críticas dessa perda de controle.

Neste tópico, será estabelecida a base conceitual do confinamento, mostrando que o flyrock, em grande parte dos casos, está diretamente associado à falha de contenção da energia explosiva.

## 4.2.1 O que é confinamento no desmonte

O confinamento, no contexto do desmonte de rochas com explosivos, pode ser entendido como a resistência oferecida pelo sistema ao escape da energia liberada pela detonação.

Esse sistema inclui:

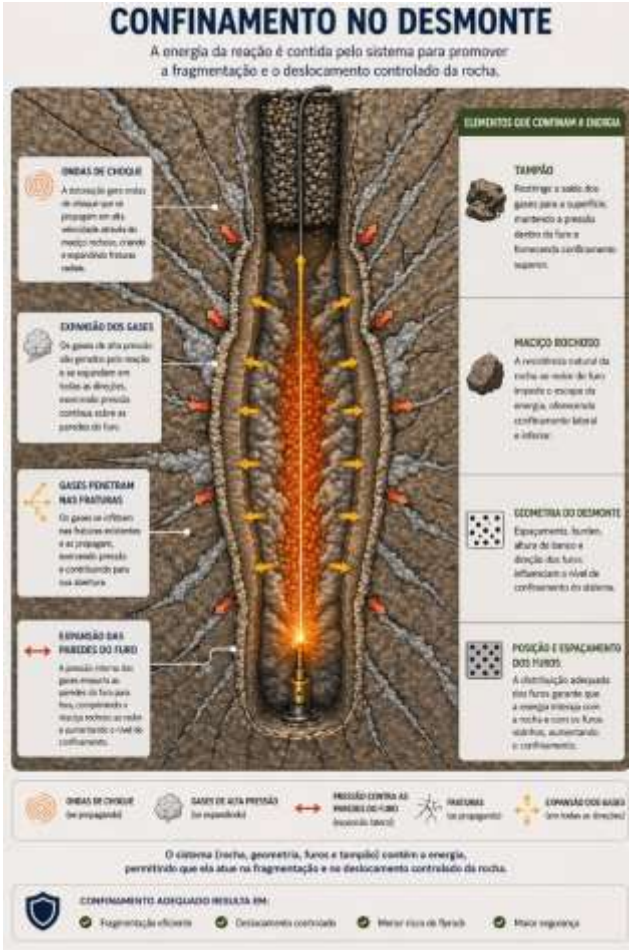
- o próprio maciço rochoso
- a geometria do desmonte
- a posição e o espaçamento dos furos
- o tampão e a coluna explosiva

De forma simplificada, o confinamento representa a capacidade do maciço e do arranjo do desmonte de conter temporariamente a energia do explosivo, permitindo que ela atue na fragmentação e no deslocamento da rocha.

Um desmonte bem projetado, busca criar um equilíbrio no qual:

- a energia é suficiente para romper o maciço
- mas não encontra caminhos fáceis de escape descontrolado

Esse equilíbrio é fundamental para garantir eficiência e segurança.

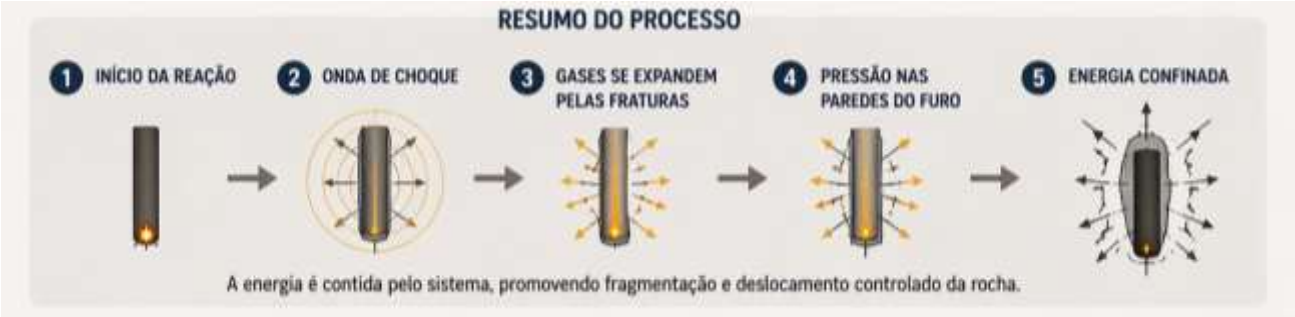



## 4.2.2 Como o confinamento controla o uso da energia

A energia explosiva, ao ser liberada, tende naturalmente a se expandir em todas as direções. No entanto, é o confinamento que direciona essa energia para realizar trabalho útil.

Quando o confinamento é adequado:

- a energia é absorvida pelo maciço
- ocorre formação e propagação de fraturas
- a rocha é fragmentada de forma progressiva
- o deslocamento ocorre na direção da face livre




Nesse cenário, a energia é convertida, em grande parte, em:

- fragmentação
- deslocamento controlado
- formação de pilha adequada

Por outro lado, o confinamento atua como uma barreira temporária que impede que a energia se dissipe rapidamente para o exterior. Essa retenção momentânea é essencial para que o explosivo cumpra sua função principal.

## 4.2.3 O que caracteriza uma falha de confinamento

Uma falha de confinamento ocorre quando o sistema não consegue conter adequadamente a energia liberada pela detonação.

Essa falha pode ocorrer por diversos motivos, como:

- afastamento insuficiente
- tampão inadequado
- presença de fraturas ou descontinuidades
- cavidades ou zonas alteradas
- erro de execução no carregamento

Nessas condições, a energia encontra caminhos de menor resistência e escapa de forma descontrolada.

Essa perda de contenção pode ocorrer em diferentes direções:

- pela face do banco
- pela região superior do furo
- lateralmente ao longo de descontinuidades
- até mesmo para trás, em situações específicas

A falha de confinamento não é necessariamente uniforme. Ela pode ocorrer de forma localizada, afetando apenas parte do desmonte, mas ainda assim gerar consequências significativas.

## 4.2.4 Relação entre perda de confinamento e projeção de material

Quando a energia escapa de forma descontrolada, ela pode ser transferida diretamente para fragmentos de rocha, gerando sua projeção.

Nesse processo:

- a energia não é dissipada gradualmente
- ocorre aceleração localizada de fragmentos

- os blocos podem atingir altas velocidades iniciais
- a trajetória passa a depender de fatores como ângulo, forma e resistência do ar

É exatamente nesse cenário que o flyrock se forma. Assim, o flyrock pode ser interpretado como:

- uma consequência direta da perda de confinamento
- um indicador de que a energia não foi adequadamente controlada
- um sinal de desequilíbrio entre energia disponível e resistência do sistema

Essa relação é fundamental, pois permite ao profissional compreender que o controle do flyrock começa, essencialmente, pelo controle do confinamento. Dessa forma, o flyrock não deve ser visto como um evento isolado, mas como uma consequência direta de falhas no controle da energia explosiva.

## 4.3 Relação entre energia disponível, resistência do maciço e caminho de menor resistência

No tópico anterior, foi estabelecido que o flyrock está fortemente associado à falha de confinamento da energia explosiva. Neste ponto, é necessário avançar um passo além e compreender como essa energia se comporta dentro do sistema formado pelo maciço rochoso e pelo plano de fogo.

A geração do flyrock não depende apenas da quantidade de energia liberada, mas do equilíbrio entre essa energia e a capacidade do maciço de resistir, absorver e direcionar essa energia. Quando esse equilíbrio é rompido, a energia tende a seguir trajetórias preferenciais de escape, conhecidas como caminhos de menor resistência. É nesse processo que se originam muitos dos mecanismos de geração de flyrock.

### 4.3.1 Energia disponível e resistência do sistema

Em um desmonte, a energia disponível é determinada principalmente pela quantidade e pelas características do explosivo utilizado.

Essa energia interage com um sistema que oferece resistência, composto por:

- o maciço rochoso
- suas propriedades mecânicas
- a presença de descontinuidades
- a geometria do desmonte

O resultado do desmonte depende do equilíbrio entre esses dois elementos:

- energia disponível
- resistência do sistema

Quando esse equilíbrio é adequado:

- a energia é distribuída de forma mais uniforme
- ocorre fragmentação controlada
- o deslocamento segue a direção planejada

Por outro lado, quando a energia excede a capacidade local de resistência ou encontra regiões de baixa resistência, o comportamento se torna menos controlado.

### 4.3.2 Conceito de caminho de menor resistência

A energia liberada pela detonação tende naturalmente a se deslocar na direção onde encontra menor oposição. Esse princípio é conhecido como:

*Caminho de menor resistência*

No desmonte, esse caminho pode ser definido por:

- a face livre do banco
- zonas mais fraturadas ou alteradas
- regiões com menor confinamento
- descontinuidades estruturais

A face livre, por exemplo, é intencionalmente criada para funcionar como o principal caminho de alívio da energia, direcionando o deslocamento da rocha.

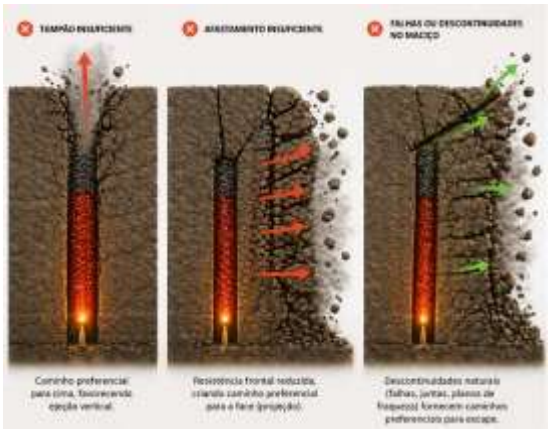
No entanto, quando surgem outros caminhos com resistência igual ou inferior à da face livre, a energia pode ser desviada, resultando em comportamentos indesejados.

## 4.3.3 Influência da geometria do desmonte nesse caminho

A geometria do desmonte tem papel decisivo na definição do caminho de menor resistência. Parâmetros como afastamento, espaçamento, altura do banco, posicionamento dos furos e comprimento do tampão, influenciam diretamente a forma como a energia se distribui.

Por exemplo:

- **afastamento insuficiente** pode reduzir excessivamente a resistência frontal, favorecendo projeção pela face;
- **tampão inadequado** pode criar um caminho preferencial para cima, favorecendo ejeção vertical;
- **disposição irregular dos furos** pode gerar zonas de concentração de energia;



Além disso, a interação entre a geometria e as condições reais do maciço pode alterar significativamente o comportamento esperado.

## 4.3.4 Como o caminho de menor resistência favorece o flyrock

O flyrock ocorre, em grande parte, quando a energia encontra um caminho de menor resistência e durante a sua liberação impulsiona fragmentos de forma localizada e intensa.

Esse processo pode ocorrer quando:

- há perda de confinamento em uma direção específica
- existem descontinuidades conectando o furo à superfície
- o afastamento é insuficiente em pontos localizados
- o tampão não oferece resistência adequada

Nessas condições:

- a energia não se dissipa de forma distribuída
- ocorre concentração de energia em determinados pontos
- fragmentos são acelerados com maior intensidade
- a projeção passa a ter maior alcance e imprevisibilidade

Assim, o caminho de menor resistência deixa de ser apenas um conceito geométrico e passa a ser um elemento chave na geração do flyrock.

A compreensão do equilíbrio entre energia disponível e resistência do maciço, juntamente com o conceito de caminho de menor resistência, é fundamental para entender como o flyrock se forma.

A energia sempre buscará o caminho mais fácil para se dissipar. Quando esse caminho não está corretamente controlado, surgem as condições para a projeção de fragmentos.

# 4.4 Mecanismo de face burst

Agora que já entendemos os conceitos de confinamento e caminho de menor resistência, voltamos para as principais formas como isso ocorre, que como mencionado na abertura desse modulo, chamamos de mecanismos de geração de flyrock.

Entre os diferentes mecanismos de geração de flyrock, o *face burst* (Explosão frontal) é um dos mais clássicos e frequentemente observados em desmontes com face livre.

Esse mecanismo está diretamente associado à perda de confinamento na região frontal do desmonte, ou seja, na direção da face livre.

Compreender o face burst é fundamental, pois ele representa uma situação em que o caminho de menor resistência coincide com uma condição de confinamento insuficiente, permitindo que a energia seja liberada de forma intensa e localizada, projetando fragmentos para frente.

## 4.4.1 O que é face burst

O *face burst* (Explosão frontal) pode ser definido como o mecanismo de projeção de fragmentos que ocorre quando a energia explosiva rompe e expulsa material diretamente através da face livre.

Nesse processo:

- a energia se concentra na direção da face livre
- ocorre ruptura abrupta do maciço nessa região
- fragmentos são acelerados para frente, além da área esperada




Diferentemente de um deslocamento normal, onde a rocha se move de forma controlada formando a pilha, no face burst ocorre uma liberação mais violenta e localizada da energia, resultando em projeção de fragmentos com maior alcance. Esse mecanismo é um exemplo claro de falha de confinamento frontal.

## 4.4.2 Condições que favorecem o mecanismo

O face burst tende a ocorrer quando a resistência oferecida pela face do banco é insuficiente para conter e direcionar a energia de forma adequada.

Entre as principais condições que favorecem esse mecanismo, destacam-se:

- **afastamento insuficiente:** Quando a distância entre o furo e a face livre é menor que o necessário, reduzindo o confinamento frontal.
- **face irregular ou mal definida:** Superfícies com saliências, reentrâncias ou geometrias irregulares podem criar zonas de menor resistência.
- **presença de fraturas e descontinuidades:** Fraturas orientadas em direção à face podem funcionar como caminhos preferenciais de escape.
- **zonas alteradas ou materiais mais fracos:** Regiões com menor resistência mecânica facilitam a ruptura e a ejeção de material.
- **carregamento excessivo em relação ao confinamento**: Quando a energia disponível é alta em relação à capacidade de resistência local.

Essas condições podem ocorrer isoladamente ou, com maior frequência, de forma combinada.

### 4.4.3 Comportamento da projeção e Indícios de face burst na leitura de campo

No face burst, a projeção ocorre predominantemente na direção frontal, ou seja, perpendicular ou subperpendicular à face do banco.

Entre os principais indícios, destacam-se:

- fragmentos projetados além da face, concentrados na direção frontal
- marcas de impacto em áreas à frente do banco
- ausência de material correspondente na pilha
- evidências de ruptura abrupta na face do desmonte
- zonas localizadas com fragmentação mais intensa
- descontinuidade no padrão da pilha
- sinais de que a energia foi liberada de forma concentrada

Em alguns casos, a projeção pode apresentar variações laterais, especialmente quando há irregularidades na face ou influência de descontinuidades.

A análise desses indícios permite relacionar o comportamento observado ao mecanismo de geração, contribuindo para ajustes no projeto e na execução.

O comportamento da projeção tende a ser mais direcionado do que em outros mecanismos, o que pode ajudar na sua identificação em campo.

O face burst é um dos mecanismos mais representativos da relação entre confinamento inadequado e projeção de fragmentos. Ele evidencia como a redução da resistência frontal pode transformar a face do banco em um caminho preferencial de escape da energia, resultando em lançamento de material além dos limites esperados.

# 4.5 Mecanismo de cratering

Enquanto o *face burst* está associado à perda de confinamento frontal, o *cratering (crateramento)* representa um mecanismo distinto, relacionado à ruptura e ejeção de material na direção vertical ou subvertical. Esse mecanismo ocorre quando a energia explosiva rompe preferencialmente a cobertura superior do furo, indicado que a região acima da carga foi o caminho de menor resistência.

O cratering é particularmente importante porque está diretamente ligado à região do tampão e à forma como a energia é contida na parte superior do furo, sendo uma das principais causas de projeções verticais de fragmentos.

## 4.5.1 O que é cratering

O *cratering (crateramento)* pode ser definido como o mecanismo de projeção de material que ocorre quando a energia explosiva rompe a cobertura superior do furo, resultando na ejeção de fragmentos para cima.

Nesse processo:

- a energia se direciona preferencialmente para a superfície superior
- ocorre ruptura da camada superior do maciço
- fragmentos são lançados verticalmente ou em ângulos elevados




Diferentemente do deslocamento normal do desmonte, onde a rocha se move em direção à face livre, no cratering a energia cria uma abertura superior, permitindo a liberação direta de material em qualquer direção.

## 4.5.2 Condições geométricas e operacionais associadas

O cratering tende a ocorrer quando a resistência da parte superior é insuficiente para conter a energia liberada.

Entre as principais condições que favorecem esse mecanismo, destacam-se:

- **relação inadequada entre carga e tampão:** Excesso de carga ou tampão insuficiente reduz o confinamento superior.
- **tampão mal executado ou de baixa qualidade:** Materiais inadequados ou má compactação comprometem a contenção da energia.
- **resistência ao deslocamento frontal maior do que o vertical:** Normalmente quando o tampão é menor que o afastamento a tendencia da energia é se deslocar para parte superior que apresenta menor resistência.
- **presença de fraturas ou zonas alteradas próximas à superfície:** Essas descontinuidades reduzem a resistência local.
- **geometria desfavorável do furo ou da bancada:** Incluindo variações na profundidade, irregularidades ou erros de execução.
- **excesso de material solto:** Conhecido como *forro*, o material solto sobre a bancada pode levar a um tampão efetivo ou camada de rocha resistente inferior ao considerado no desenho.

Essas condições podem atuar isoladamente, mas frequentemente se combinam, aumentando a probabilidade de ocorrência do cratering.

## 4.5.3 Projeção vertical e subvertical de fragmentos

A principal característica do cratering é a direção da projeção.

Nesse mecanismo, os fragmentos são lançados:

- verticalmente, quando a ruptura ocorre diretamente acima da carga
- subverticalmente, quando há leve inclinação na trajetória

Esse tipo de projeção apresenta algumas particularidades importantes:

- pode atingir grandes alturas e distâncias, aumentando o tempo de voo dos fragmentos
- permite que os fragmentos percorram distâncias horizontais após a queda
- pode atingir áreas fora do campo de visão imediato da operação

Além disso, fragmentos projetados podem ser lançados em todas as direções, ampliando o risco, especialmente em áreas próximas ao desmonte.

## 4.5.4 Reconhecimento de cratering em campo

A identificação do cratering em campo é fundamental para análise de eventos e melhoria do controle operacional.

Entre os principais indícios, destacam-se:

- material ejetado com distribuição radial
- formação de cavidade ou cratera na região superior do furo
- fragmentos depositados em áreas próximas, mas fora da pilha principal




Também podem ser observados:

- sinais de ruptura vertical na superfície
- dispersão irregular de material ao redor do ponto de detonação
- presença de blocos lançados em posições aleatórias

Esses indícios ajudam a diferenciar o cratering de outros mecanismos, especialmente do rifling e do face burst.

O cratering evidencia a importância do confinamento na região superior do furo. Quando a cobertura e o tampão não oferecem resistência suficiente, a energia encontra um caminho preferencial para cima, resultando na ejeção vertical ou subvertical de fragmentos. Esse mecanismo reforça que o controle do flyrock depende não apenas da geometria frontal do desmonte, mas também do controle rigoroso da região superior da carga.

# 4.6 Mecanismo de rifling

O *rifling (tiro vertical)* é um mecanismo de geração de flyrock fortemente associado à região do colar do furo e ao desempenho do tampão.

Diferentemente do *cratering*, que envolve ruptura da cobertura superior, o rifling ocorre quando há escape preferencial de energia e fragmentos ao longo do eixo do furo, ou seja, diretamente pela boca do furo, geralmente devido à perda de eficiência do tampão.

Esse mecanismo é particularmente relevante porque está diretamente ligado à qualidade da execução do desmonte, sendo muitas vezes consequência de falhas operacionais que poderiam ser evitadas com controle adequado.

## 4.6.1 O que é rifling

O *rifling (tiro vertical)* pode ser definido como o mecanismo de ejeção de fragmentos ao longo do colar/boca do furo, resultante do escape de gases e material pela coluna superior.

Nesse processo:

- a energia não é adequadamente confinada pelo tampão
- ocorre fluxo ascendente de gases sob alta pressão
- fragmentos são expelidos pela abertura do furo




Esse tipo de ejeção tende a ser mais canalizado, seguindo o eixo do furo, podendo resultar em lançamentos com direções variadas após a saída, mas principalmente com direção vertical.

## 4.6.2 Papel do tampão no controle do mecanismo

O tampão é o principal elemento de controle contra o rifling.

Sua função é:

- conter a expansão dos gases dentro do furo
- aumentar o tempo de confinamento da energia
- direcionar a energia para a fragmentação e deslocamento

Quando o tampão é adequado, ele atua como uma barreira eficiente, impedindo o escape direto da energia.

No entanto, o rifling pode ocorrer quando há:

- **tampão insuficiente em comprimento:** Reduz a capacidade de contenção da pressão interna.
- **material inadequado:** Materiais pouco resistentes ou inadequados para o confinamento.
- **má compactação:** Presença de vazios ou baixa densidade no tampão.
- **contaminação do tampão com material inadequado:** Mistura com solo, fragmentos grandes ou material solto.
- **falhas na execução:** Erros durante o carregamento ou na formação do tampão.

Essas condições reduzem drasticamente a eficiência do confinamento, permitindo o escape da energia ao longo do furo.

## 4.6.3 Diferenças entre rifling e cratering

Embora ambos os mecanismos estejam associados à região superior do furo, há diferenças importantes entre rifling e cratering.

No **cratering**:

- ocorre ruptura da cobertura superior do maciço
- a projeção é predominantemente vertical ou subvertical
- há formação de uma cratera na superfície
- O lançamento de fragmentos pode ser em todas as direções

No **rifling**:

- o escape ocorre ao longo do colar/boca do furo
- não há necessariamente ruptura da cobertura como no cratering
- o material é expelido diretamente pela abertura do furo
- a projeção tende a ser mais vertical

Outra diferença importante é que o rifling está mais diretamente associado à qualidade do tampão, enquanto o cratering está mais relacionado à geometria e à cobertura sobre a carga.

## 4.6.4 Indícios de escape pelo colar do furo

A identificação do rifling em campo é fundamental para avaliar falhas de execução e corrigir procedimentos.

Entre os principais indícios, destacam-se:

- evidência de expulsão de material pelo colar do furo
- ausência parcial ou total do tampão após a detonação
- material depositado ao redor do furo de forma dispersa
- sinais de fluxo ascendente de gases
- comportamento inconsistente da pilha em relação ao padrão esperado




Esses sinais indicam que a energia não foi devidamente confinada, reforçando a necessidade de revisão dos procedimentos de tamponamento.

Diferentemente de mecanismos mais ligados à geometria ou à geologia, o rifling está frequentemente associado a falhas operacionais, o que significa que, em muitos casos, pode ser prevenido com boas práticas e controle rigoroso em campo. A compreensão desse mecanismo reforça a necessidade de disciplina operacional e atenção aos detalhes durante o carregamento.

# 4.7 Ejeção de material pela região do tampão e pelo colar do furo

A região superior do furo, composta pelo tampão e pelo colar, representa uma das zonas mais críticas no controle do flyrock. Nos tópicos anteriores, vimos separadamente os mecanismos de *cratering* e *rifling*. Neste ponto, o objetivo é integrar esses conceitos e ampliar a compreensão de que essa região funciona, na prática, como um ponto sensível de contenção da energia explosiva.

Quando há qualquer deficiência nessa zona, a energia encontra um caminho direto de escape, resultando na ejeção de material com potencial significativo de projeção vertical, subvertical ou inclinada.

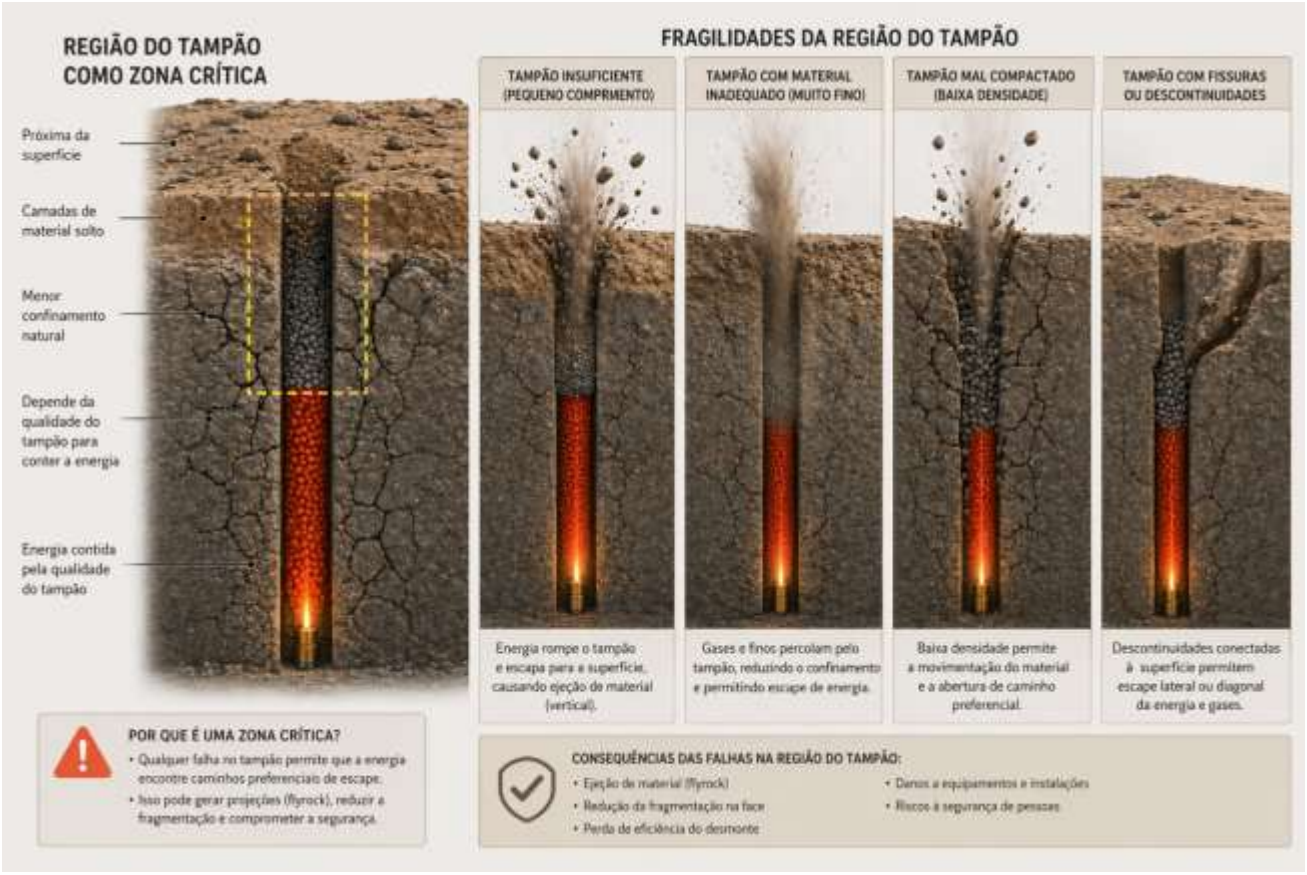
## 4.7.1 Região do tampão como zona crítica

O tampão não é apenas um elemento complementar do desmonte, mas sim uma parte essencial do sistema de confinamento.

A região superior do furo concentra uma condição particularmente delicada:

- está próxima da superfície
- normalmente com camadas de material solto
- possui menor confinamento natural (o material do tampão é solto e não rocha sã)
- depende fortemente da qualidade do tampão para conter a energia

Por esse motivo, qualquer falha nessa região tende a ter impacto direto no comportamento da detonação.




Quando o tampão é bem executado, ele:

- aumenta o tempo de confinamento dos gases
- direciona a energia para a fragmentação e deslocamento
- reduz a probabilidade de ejeção indesejada

Quando falha, essa região se transforma em um dos principais pontos de geração de flyrock.

## 4.7.2 Ejeção pela boca do furo

A ejeção de material pela boca do furo pode ocorrer de diferentes formas, muitas vezes combinados.

Entre os principais processos envolvidos, destacam-se:

- **escape direto de gases:** Quando a pressão interna supera a capacidade de contenção do tampão.
- **arraste de fragmentos pelos gases em expansão:** Os gases carregam partículas e fragmentos ao longo do furo.
- **expulsão do tampão:** Quando o tampão é deslocado ou ejetado antes de cumprir sua função.




Essas ejeções podem ocorrer de forma isolada ou simultânea, dependendo das condições de carregamento, geometria e qualidade da execução.

## 4.7.3 Relação entre tampão, colar e contenção da energia

O controle da região do colar do furo depende diretamente da interação entre quatro fatores principais:

- **integridade do colar**: Determina a capacidade de resistência do próprio maciço
- **comprimento do tampão:** Determina a capacidade de retenção da pressão interna.
- **qualidade e tipo de material utilizado:** Influencia a resistência ao deslocamento e à erosão pelos gases.
- **compactação e execução:** Define a continuidade e a eficiência do confinamento.



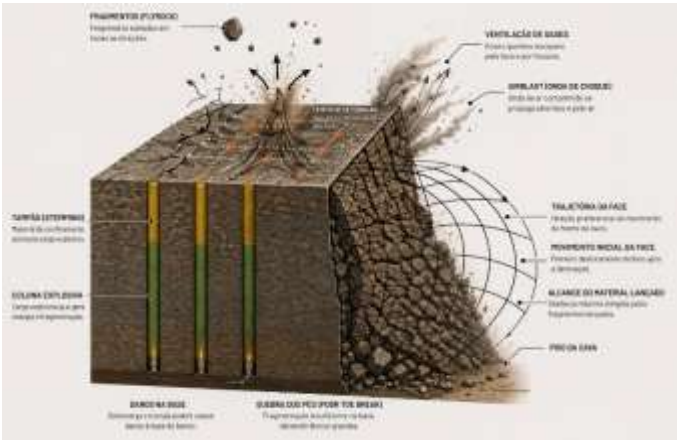

O colar do furo funciona como a interface entre o sistema confinado e o ambiente externo. Se essa interface falha, a energia deixa de ser direcionada e passa a se dissipar de forma descontrolada.

A análise da região do tampão e do colar reforça um dos princípios mais importantes do controle do flyrock: a energia precisa ser confinada de forma eficiente em todas as direções, especialmente na parte superior do furo.

Falhas nessa região tendem a gerar projeções com comportamento menos previsível, ampliando o risco operacional. Por isso, o controle rigoroso do tampão, da execução e das condições locais é uma das medidas mais eficazes para reduzir a ocorrência de flyrock.

# 4.8 Direções de projeção: frontal, lateral, posterior e vertical

Após compreender os principais mecanismos de geração do flyrock, é fundamental avançar para a análise de como esses mecanismos se manifestam no espaço.



O flyrock não ocorre de forma aleatória em termos de direção. Pelo contrário, a direção da projeção está diretamente relacionada ao mecanismo de geração, à geometria do desmonte e às condições locais do maciço.

Entender as direções de projeção permite ao profissional antecipar zonas de maior risco, melhorar o posicionamento de áreas de segurança e interpretar corretamente eventos ocorridos em campo.

## 4.8.1 Projeção frontal

A projeção frontal ocorre na direção da face livre do banco, sendo uma das formas mais comuns de deslocamento da rocha. Em condições normais, esse movimento é desejado, pois contribui para a formação da pilha. No entanto, quando ocorre de forma excessiva ou descontrolada, pode evoluir para flyrock.

Essa direção está fortemente associada ao mecanismo de **face burst**, especialmente em situações como:

- afastamento insuficiente
- face irregular
- perda de confinamento frontal



A projeção frontal tende a ser mais direcionada e previsível quando o desmonte está bem controlado, mas pode se tornar crítica quando há falhas de projeto ou execução.

## 4.8.2 Projeção lateral

A projeção lateral ocorre para os lados da área de desmonte, muitas vezes de forma menos esperada.

Esse tipo de projeção pode estar associado a:

- irregularidades na geometria da bancada
- variações no afastamento lateral
- presença de descontinuidades geológicas inclinadas
- falhas locais de confinamento



A projeção lateral é particularmente perigosa porque pode atingir áreas que não estão diretamente à frente da face, ampliando a zona de risco.

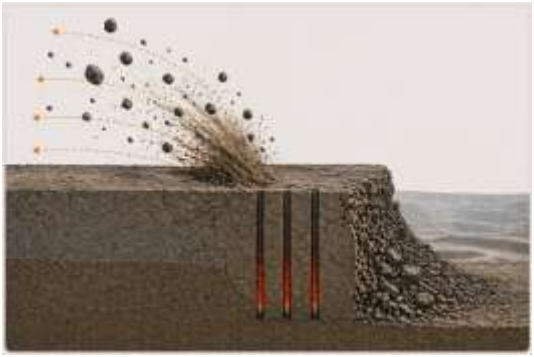
## 4.8.3 Projeção posterior

A projeção posterior ou para trás ocorre na direção oposta à face livre, ou seja, para trás dos furos.

Esse tipo de projeção é menos intuitivo e frequentemente associado a condições como:

- excesso de energia em relação ao confinamento

- presença de fraturas ou zonas de fraqueza atrás da linha de furos
- falhas na distribuição de carga
- geometria inadequada do desmonte
- sequenciamento e temporização inadequada



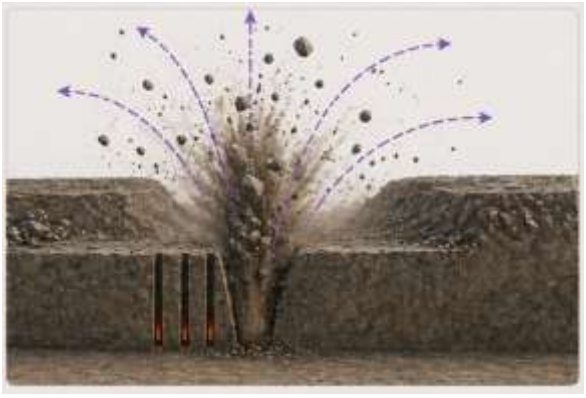
A projeção posterior pode indicar que a energia encontrou um caminho de menor resistência inesperado, muitas vezes associado a sobrequebras ou à falta de alívio frontal.

## 4.8.4 Projeção vertical

A projeção vertical ocorre quando os fragmentos são lançados para cima, podendo atingir grandes alturas antes de retornar ao solo.

Esse tipo de projeção está diretamente associado aos mecanismos de:

- **cratering**
- **rifling**
- falhas na região do tampão



Apesar de normalmente não percorrer grandes distâncias, a projeção vertical apresenta riscos específicos:

- maior tempo de voo
- possibilidade de queda em áreas imprevisíveis
- dificuldade de controle visual durante a detonação

Mesmo quando o alcance horizontal inicial é pequeno, o deslocamento final pode ser significativo após a queda.

## 4.8.5 Relação entre mecanismo e direção provável

A direção do flyrock não é aleatória, mas sim consequência direta do mecanismo de geração e das condições locais.

De forma geral, podemos estabelecer algumas relações importantes:

- **face burst → projeção frontal predominante**
- **cratering → projeção subvertical ou dispersa em todas as direções**
- **rifling → frequentemente vertical**

Além disso, a direção da projeção também depende de:

- geometria do desmonte
- posição relativa do furo
- condições do maciço rochoso
- qualidade da execução

A análise das direções de projeção permite transformar a compreensão dos mecanismos em uma leitura espacial prática do risco.

Ao identificar como e para onde os fragmentos tendem a ser projetados, o profissional pode:

- melhorar a definição de áreas de segurança

- ajustar parâmetros de projeto
- interpretar eventos ocorridos em campo

Esse entendimento será fundamental nos módulos seguintes, especialmente quando avançarmos para o controle, a modelagem e a definição de zonas de exclusão.

## 4.8.6 Integração entre geologia e mecanismo de geração

A geração do flyrock deve ser entendida como resultado da interação entre:

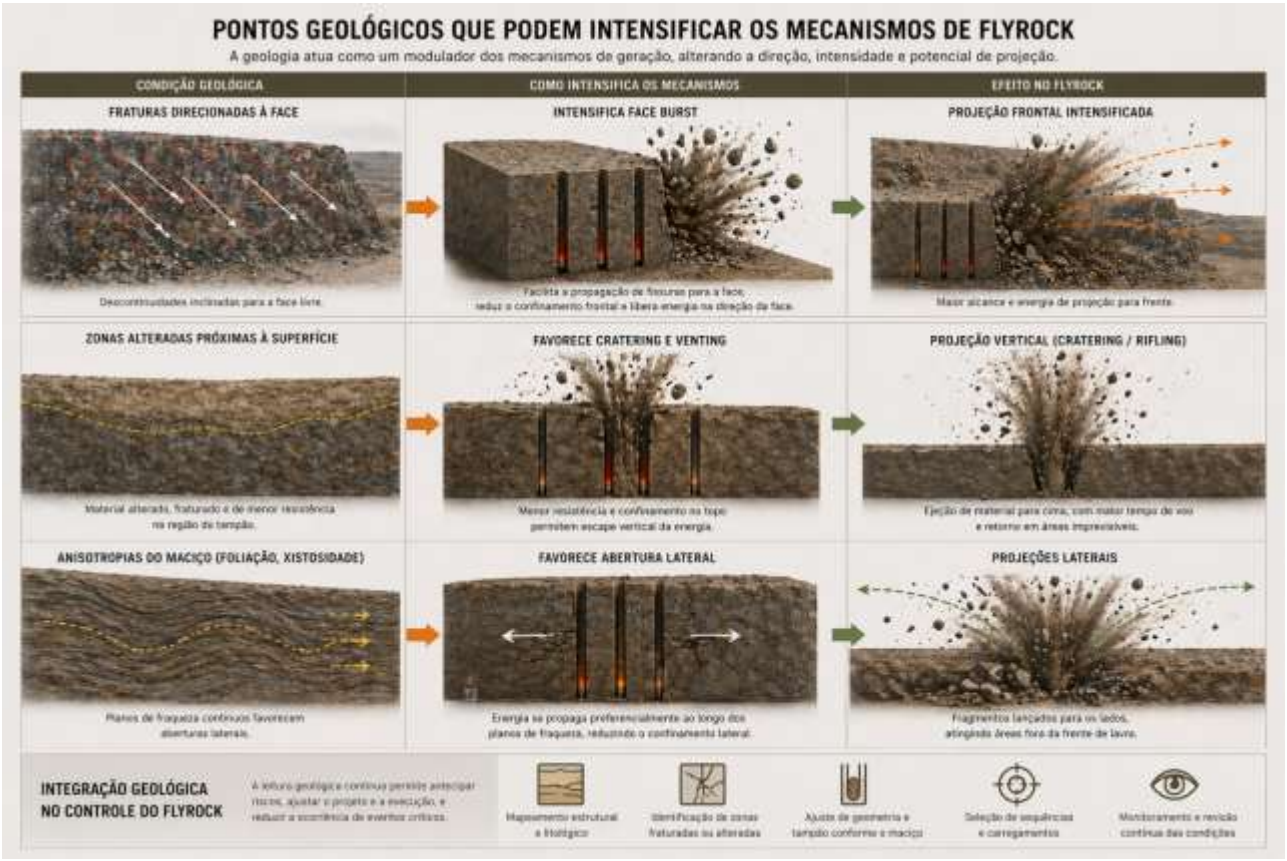
- energia explosiva
- geometria do desmonte
- execução operacional
- condições geológicas

A geologia atua como um modulador dos mecanismos de geração, podendo:

- intensificar mecanismos típicos
- alterar a direção de projeção
- criar condições para eventos extremos

Por exemplo:

- um face burst pode ser intensificado por fraturas direcionadas à face
- um cratering pode ser favorecido por zonas alteradas próximas à superfície
- projeções laterais podem surgir devido a anisotropias do maciço




Essa integração reforça que o controle do flyrock não pode ser baseado apenas em parâmetros de projeto. Ele exige leitura contínua das condições reais do maciço.

Mesmo com um plano de fogo tecnicamente adequado, variações geológicas podem alterar significativamente o resultado do desmonte.

Por isso, o profissional deve desenvolver a capacidade de:

- interpretar estruturas geológicas
- reconhecer zonas de risco
- ajustar decisões com base no contexto local

Essa visão integrada é essencial para reduzir a ocorrência de eventos inesperados e melhorar o controle do flyrock.

# 4.9 Diferença entre mecanismos típicos e eventos extremos

Após estudar os principais mecanismos de geração de flyrock e suas direções de projeção, é importante dar um passo além e compreender que nem todos os eventos seguem padrões previsíveis ou recorrentes.

Na prática, o flyrock pode se manifestar tanto por mecanismos típicos, que são relativamente bem compreendidos, quanto por eventos extremos, que resultam de combinações menos usuais de fatores e podem apresentar comportamento fora do padrão esperado.

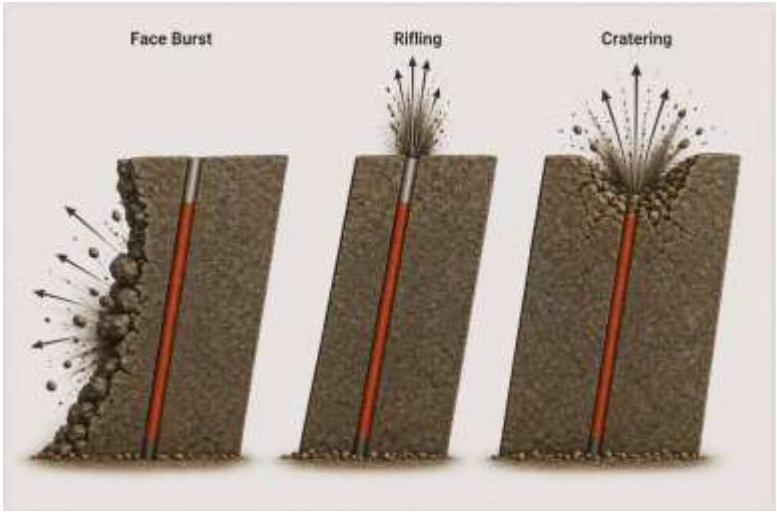
Essa distinção é fundamental para evitar uma falsa sensação de controle baseada apenas na repetição de cenários conhecidos.

## 4.9.1 O que são mecanismos típicos

Os mecanismos típicos são aqueles que abordamos nos tópicos anteriores, frequentemente observados em operações de desmonte e que já possuem bom nível de compreensão técnica.

Entre eles, destacam-se:

- face burst
- cratering
- rifling




Esses mecanismos apresentam características recorrentes:

- padrões relativamente consistentes de ocorrência
- relação clara com geometria e execução
- associação direta com falhas específicas de confinamento

Por serem mais comuns, esses mecanismos são mais facilmente reconhecidos em campo e, consequentemente, mais abordados em práticas de controle e mitigação, inclusive a maioria das fórmulas de predição de lançamento se baseia neles.

## 4.9.2 O que caracteriza um evento extremo

Os eventos extremos são aqueles que fogem do comportamento típico observado nos mecanismos clássicos.

Eles se caracterizam por:

- maior alcance de projeção
- comportamento menos previsível
- combinação de múltiplos fatores críticos
- potencial elevado de dano



Esses eventos podem ocorrer mesmo em desmontes que, aparentemente, estavam dentro de condições aceitáveis.

Em muitos casos, eles envolvem situações como:

- presença de cavidades naturais ou vazios não identificados
- grandes fraturas ou falhas geológicas
- zonas altamente alteradas ou com baixa resistência

- perda significativa e localizada de confinamento
- acúmulo de condições desfavoráveis em um mesmo ponto




Essas condições podem criar caminhos de escape inesperados, resultando em projeções de maior energia e alcance.

## 4.9.3 Fatores que ampliam severidade e alcance

A severidade de um evento de flyrock não depende apenas da ocorrência do mecanismo, mas da intensidade com que ele se manifesta.

Entre os principais fatores que ampliam o alcance e o potencial de dano, destacam-se:

- excesso de energia em relação ao confinamento disponível
- presença de estruturas geológicas desfavoráveis
- geometria inadequada do desmonte
- falhas simultâneas de projeto e execução
- condições locais não identificadas previamente

Além disso, fatores como:

- tamanho e forma dos fragmentos
- ângulo de projeção
- interação com a topografia

também influenciam diretamente o comportamento final do flyrock.

A combinação desses elementos pode transformar um mecanismo comum em um evento de alta severidade.

## 4.9.4 Por que eventos raros exigem abordagem conservadora

Um dos maiores desafios no controle do flyrock é lidar com eventos de baixa frequência, mas alto impacto.

Esses eventos são perigosos porque:

- nem sempre são antecipados pelos modelos tradicionais
- podem ocorrer mesmo em operações bem planejadas
- têm potencial de causar danos graves ou irreversíveis

Por esse motivo, a engenharia de desmonte deve adotar uma abordagem conservadora, especialmente em cenários com maior incerteza.

Isso significa:

- considerar variações possíveis do maciço
- evitar assumir comportamento ideal do sistema

- incorporar margens de segurança adequadas
- priorizar a proteção de pessoas e ativos

Embora o conhecimento dos mecanismos clássicos permita melhorar significativamente o controle do desmonte, a existência de eventos extremos exige uma postura técnica mais cautelosa e preventiva. É necessário sempre considerar a possibilidade de comportamentos fora do padrão.

Essa compreensão prepara o profissional para lidar com a variabilidade real do campo e reforça a necessidade de integrar conhecimento técnico com julgamento, nesse ponto, experiência e conhecimento técnico são fundamentais para a realização de análises mais precisas e seguras.

# 4.10 Desmontes secundários como caso especial de alto risco

Um desmonte secundário representa uma das situações mais críticas em termos de geração de flyrock. Diferentemente do desmonte primário, que ocorre em um maciço relativamente contínuo e com geometria planejada, o desmonte secundário é realizado sobre rochas já fragmentadas, com geometrias irregulares e condições de confinamento altamente variáveis.

Essas características tornam o comportamento da energia explosiva muito mais difícil de prever e controlar, aumentando significativamente o risco de projeção de fragmentos.

## 4.10.1 O que caracteriza os desmontes secundários

O desmonte secundário é tipicamente associado a realização de uma segunda detonação para complementar a detonação primaria, seja porque formaram blocos grandes que não atendem aos requisitos operacionais ou a porções de rocha que não foram devidamente removidas na detonação inicial.

Esse tipo de desmonte pode ocorrer em situações como:

- blocos grandes na pilha
- matacos isolados que dificultam carregamento ou britagem
- porções de material que não foram devidamente arrancadas
- porções de rocha dura em meio a rochas escavadas
- regularizações de pisos ou taludes



As principais características de um desmonte secundário incluem:

- geometrias irregulares e não padronizadas
- excesso de face livre ou face livre mal definida
- apoio instável do material
- variabilidade na forma e no volume dos blocos

Esses fatores tornam o controle do desmonte significativamente mais complexo.

## 4.10.2 Por que o risco de flyrock tende a ser maior

O risco de flyrock no desmonte secundário é elevado devido a uma combinação de fatores desfavoráveis.

Entre os principais, destacam-se:

- **baixo confinamento:** Blocos isolados ou parcialmente apoiados oferecem pouca resistência à expansão dos gases.
- **geometria irregular:** A forma do bloco influencia diretamente o comportamento da energia.
- **ausência de controle preciso da energia:** Dificuldade de ajustar carga e posicionamento com precisão.
- **apoio instável:** bloco pode se mover ou girar durante a detonação.
- **múltiplos caminhos de escape:** A energia encontra facilmente rotas de menor resistência.

Essas condições fazem com que a energia seja liberada de forma menos controlada, favorecendo a projeção de fragmentos.

## 4.10.3 Principais mecanismos envolvidos nesse contexto

Nos desmontes secundários, os mecanismos de geração de flyrock não se manifestam de forma padronizada, estão mais relacionados a eventos extremos, mas podemos destacar alguns comportamentos típicos, como:

- **comportamento semelhante ao cratering:** Quando há ejeção de material para cima devido ao baixo confinamento.
- **projeção multidirecional:** Devido à ausência de uma face livre dominante.
- **liberação abrupta de blocos inteiros ou fragmentos grandes:** O que pode gerar projeções com alta energia cinética.



A ausência de uma geometria controlada faz com que o comportamento seja menos previsível e mais disperso.

## 4.10.4 Cuidados especiais na leitura e controle do risco

Diante dessas características, o desmonte secundário exige uma abordagem mais cautelosa e conservadora, muito mais voltada a experiencia local e ao controle de carga do que a técnicas de predição de lançamento.

Entre os principais cuidados, destacam-se:

- **avaliação individualizada de cada bloco:** Considerar forma, apoio, fissuras e posição.
- **controle rigoroso da carga explosiva:** Evitar excesso de energia.
- **atenção ao posicionamento do furo ou da carga:** Buscar melhor direcionamento possível da energia.
- **uso adequado de tampão ou de técnicas de abafamento:** Mesmo em condições limitadas.
- **ampliação da área de segurança:** Considerando a maior incerteza do comportamento.
- **restrição de presença humana e de equipamentos próximos:** Reduzindo a exposição ao risco.

O desmonte secundário representa um caso especial de alto risco de flyrock devido à combinação de baixo confinamento, geometria irregular e elevada incerteza. Ele não deve ser tratado como uma operação simples ou rotineira. Pelo contrário, exige elevado nível de atenção técnica e operacional.

Essa condição reforça um dos princípios fundamentais do curso: quanto menor o controle das variáveis, maior deve ser o conservadorismo na tomada de decisão. Compreender esse contexto é essencial para evitar eventos graves e garantir a segurança da operação.

# 4.11 Exemplos práticos e leitura técnica dos mecanismos em campo

O conhecimento dos mecanismos de geração de flyrock só se torna realmente útil quando o profissional é capaz de reconhecê-los em situações reais.

Na prática, o desmonte deixa evidências claras do comportamento da energia explosiva. Essas evidências estão presentes na distribuição dos fragmentos, na geometria da pilha, nas condições do furo e no estado da face após a detonação.

Desenvolver a capacidade de leitura técnica de campo significa transformar observações em diagnóstico, permitindo identificar o mecanismo provável de geração do flyrock e, a partir disso, ajustar decisões futuras.

## 4.11.1 Leitura da direção e padrão de lançamento

A primeira etapa da análise em campo é observar a direção e o padrão de lançamento dos fragmentos.

Alguns pontos importantes incluem:

- concentração de fragmentos à frente da face → pode indicar face burst
- dispersão lateral significativa → pode indicar influência geológica ou geometria irregular
- presença de material projetado para trás → possível projeção posterior
- fragmentos espalhados radialmente próximos ao furo → indício de cratering ou rifling

Além da direção, o padrão de distribuição também é relevante:

- distribuição homogênea tende a indicar comportamento controlado
- concentração localizada sugere liberação direcionada de energia
- dispersão irregular pode indicar múltiplos mecanismos atuando simultaneamente

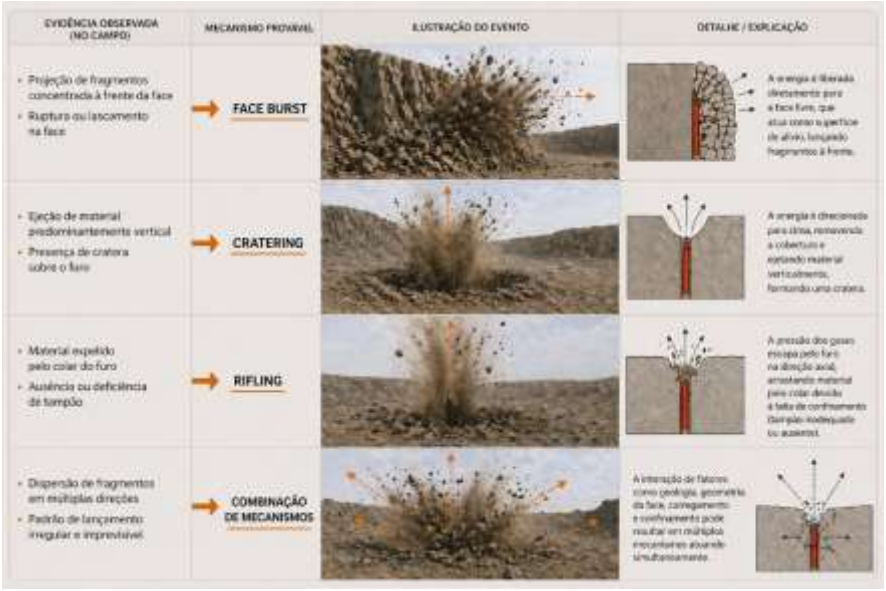
Essa leitura inicial já fornece pistas importantes sobre o comportamento do desmonte.

## 4.11.2 Relação entre evidência observada e mecanismo provável

A etapa mais importante da leitura de campo é a interpretação das evidências.

O profissional deve ser capaz de estabelecer relações como:

- projeção frontal + ruptura na face → face burst
- ejeção vertical + cratera → cratering
- material expelido pelo colar + ausência de tampão → rifling
- dispersão irregular + múltiplas direções → combinação de mecanismos




É importante destacar que:

- nem sempre haverá um único mecanismo dominante
- eventos reais frequentemente envolvem interação entre fatores

- a interpretação deve considerar o contexto completo

Essa análise transforma a observação em diagnóstico técnico.

### 4.11.3 Valor da observação de campo para prevenção futura

A leitura de campo não deve ser vista apenas como uma análise pós-evento, mas como uma ferramenta de aprendizado e prevenção.

Ao observar e interpretar corretamente os sinais do desmonte, é possível:

- identificar falhas de projeto ou execução
- ajustar parâmetros para desmontes futuros
- melhorar práticas operacionais
- reduzir a probabilidade de recorrência de eventos

Além disso, a observação contínua contribui para:

- desenvolvimento da experiência prática
- melhoria da tomada de decisão
- fortalecimento da cultura de segurança

Operações que incorporam sistematicamente a leitura de campo tendem a evoluir mais rapidamente no controle do flyrock.

A capacidade de interpretar evidências de campo é um dos diferenciais mais importantes de um profissional de desmonte. Mais do que conhecer conceitos, é necessário saber observar, relacionar e diagnosticar o comportamento da energia explosiva a partir dos resultados obtidos. Esse processo conecta teoria e prática, permitindo transformar cada detonação em uma fonte de aprendizado e melhoria contínua.

# 4.12 Fechamento do módulo e preparação para os próximos temas

Ao longo deste módulo, avançamos de uma visão conceitual do flyrock para uma compreensão mais estruturada de como esse fenômeno é gerado na prática.

Saímos da ideia de que o flyrock é um efeito indesejado e passamos a tratá-lo como resultado de mecanismos físicos e operacionais identificáveis, que podem ser analisados, interpretados e, principalmente, controlados.

Esse avanço é fundamental, pois marca a transição entre a percepção do risco e a capacidade real de atuar sobre ele.

## 4.12.1 Síntese dos mecanismos de geração

Os mecanismos de geração de flyrock apresentados neste módulo mostram que o fenômeno está diretamente ligado à forma como a energia explosiva é liberada e confinada no sistema.

De forma integrada, podemos destacar que:

- o flyrock é consequência da **liberação inadequada da energia explosiva**
- a **falha de confinamento** é o elemento central na maioria dos casos
- a energia sempre buscará o **caminho de menor resistência**
- diferentes mecanismos refletem diferentes formas de perda de controle da energia

Foram abordados mecanismos clássicos, como:

- face burst, associado à perda de confinamento frontal
- cratering, relacionado à ruptura superior
- rifling, ligado ao escape pelo colar do furo

Também foi discutido que:

- os mecanismos influenciam diretamente a **direção da projeção**
- a geologia pode alterar significativamente o comportamento esperado
- eventos extremos podem ocorrer a partir de combinações específicas de fatores

Essa visão integrada permite compreender o flyrock como um fenômeno técnico, e não como um evento aleatório.

## 4.12.2 O que o aluno deve ter entendido ao final do módulo

Ao final deste módulo, o aluno deve ser capaz de:

- reconhecer que o flyrock possui **causas físicas e operacionais identificáveis**
- entender que o **confinamento da energia** é o principal fator de controle
- identificar os principais **mecanismos de geração** e suas características
- relacionar mecanismos com **direção, alcance e severidade da projeção**
- interpretar evidências de campo e associá-las a **mecanismos prováveis**
- compreender o papel da **geologia** na modificação do comportamento do desmonte

Além disso, deve estar claro que:

- o controle do flyrock depende da integração entre projeto, execução e leitura de campo

- a prevenção exige **atenção aos detalhes e postura técnica ativa**
- a análise de eventos deve sempre buscar entender o mecanismo envolvido

Essa base é essencial para evoluir para níveis mais avançados de controle e modelagem.

O Módulo 4 estabelece uma base sólida para o entendimento do flyrock como um fenômeno técnico, governado por mecanismos que podem ser estudados e controlados.

A partir dessa base, o curso avança agora para uma nova dimensão de análise, conectando a geração do fenômeno com seu comportamento físico e balístico.

# Módulo 5. Fundamentos Físicos do Flyrock

## 5.1 Abertura do módulo e visão geral dos fundamentos físicos do flyrock

Ao longo do Módulo 4, foi possível compreender que o flyrock não é bem um evento aleatório, mas sim o resultado de mecanismos físicos e operacionais bem definidos, associados principalmente à forma como a energia explosiva é liberada e confinada. No entanto, entender como o flyrock é gerado representa apenas parte do problema.

Para compreender plenamente o fenômeno, é necessário avançar um passo além e analisar como os fragmentos se comportam após serem projetados, ou seja, como eles ganham velocidade, como se deslocam no espaço e por que determinados eventos atingem distâncias maiores e apresentam maior potencial de dano.

O Módulo 4 foi dedicado à compreensão dos mecanismos de geração do flyrock, ou seja, aos processos que levam à liberação descontrolada de energia e à projeção de fragmentos. Foram analisados mecanismos como face burst, cratering e rifling. Esses mecanismos respondem à pergunta: Como o flyrock é gerado?

O Módulo 5, por sua vez, dá continuidade a essa análise, passando a responder uma nova questão: Como os fragmentos se comportam após serem lançados?

Essa transição é fundamental, pois o risco associado ao flyrock não depende apenas da sua geração, mas também da forma como os fragmentos se deslocam no espaço.

É importante destacar, desde o início, que o objetivo deste módulo não é apresentar formulações físicas completas ou modelos matemáticos capazes de prever com precisão o comportamento do flyrock. Embora algumas equações simplificadas sejam apresentadas ao longo do módulo, seu papel é apenas auxiliar na compreensão dos conceitos fundamentais.

O foco principal está em desenvolver o entendimento físico do fenômeno, permitindo que o profissional interprete melhor os mecanismos envolvidos, reconheça situações de risco e tome decisões mais seguras em campo. Dessa forma, o módulo busca fornecer base conceitual sólida, sem a expectativa de que existam fórmulas capazes de explicar ou prever completamente o comportamento do flyrock, que é, por natureza, complexo e dependente de múltiplos fatores.

### 5.1.1 Por que o flyrock também deve ser entendido como problema físico e balístico

O flyrock deve ser compreendido como um fenômeno de transferência de energia.

Durante a detonação:

- a energia química do explosivo é convertida em pressão
- essa pressão gera fraturamento e deslocamento da rocha
- em determinadas condições, parte dessa energia é transferida para fragmentos de forma localizada

Quando isso ocorre, os fragmentos são lançados de forma independente, passam a adquirir velocidade e a se comportar como corpos em movimento, sujeitos às leis da física. Nesse contexto, o flyrock deixa de ser apenas um problema de desmonte e passa a ser também um problema físico e balístico.

Isso significa que:

- a distância percorrida por um fragmento depende da sua velocidade inicial
- a direção do lançamento depende do mecanismo de geração
- a trajetória depende das condições físicas do movimento

Portanto, compreender o flyrock exige integrar conceitos de engenharia de desmonte com fundamentos de física mecânica e balística.

## 5.1.2 O papel da velocidade, da trajetória e do relevo no risco real

A severidade de um evento de flyrock não é determinada apenas pelo fato de ocorrer uma projeção, mas principalmente pelas características dessa projeção.

Três elementos são fundamentais para entender o risco real:

- **velocidade inicial do fragmento:** Determina a energia cinética e o potencial de alcance.
- **trajetória de lançamento:** Define a direção, a altura e a distância percorrida.
- **topografia do terreno:** Influencia o alcance efetivo e a energia de impacto.




Por exemplo:

- dois eventos com o mesmo mecanismo podem gerar consequências muito diferentes dependendo da velocidade inicial dos fragmentos;
- um mesmo fragmento pode atingir distâncias maiores se lançado com ângulo favorável;
- áreas rebaixadas podem ampliar significativamente o alcance real do flyrock;
- trajetórias descendentes podem aumentar a energia de impacto.

Esses fatores mostram que o risco não depende apenas da geração do fenômeno, mas da sua evolução no espaço.

Essa nova etapa amplia a visão do fenômeno, incorporando conceitos de energia, velocidade, trajetória e relevo à análise do risco.

A partir desse ponto, entende-se que o flyrock não é apenas um efeito do desmonte, mas também um fenômeno físico completo, cuja compreensão exige a integração entre engenharia, mecânica e interpretação de campo.

# 5.2 Fundamentos energéticos do desmonte

O desmonte de rochas com explosivos é, essencialmente, um processo de transformação e distribuição de energia. A energia química contida no explosivo, ao ser liberada durante a detonação, não atua de forma única ou direcionada. Pelo contrário, ela se distribui em diferentes formas de resposta do sistema, incluindo fragmentação, deslocamento da rocha e diversos efeitos indesejados.

Compreender essa distribuição de energia é fundamental para entender por que o flyrock ocorre. Mais do que um excesso de explosivo, o flyrock deve ser entendido como resultado de uma parcela da energia que não foi adequadamente confinada ou direcionada, sendo transferida para fragmentos de forma localizada e intensa.

## 5.2.1 Energia explosiva e sua distribuição no desmonte

A energia liberada por um explosivo durante a detonação é resultado da rápida conversão de energia química em energia mecânica e térmica.

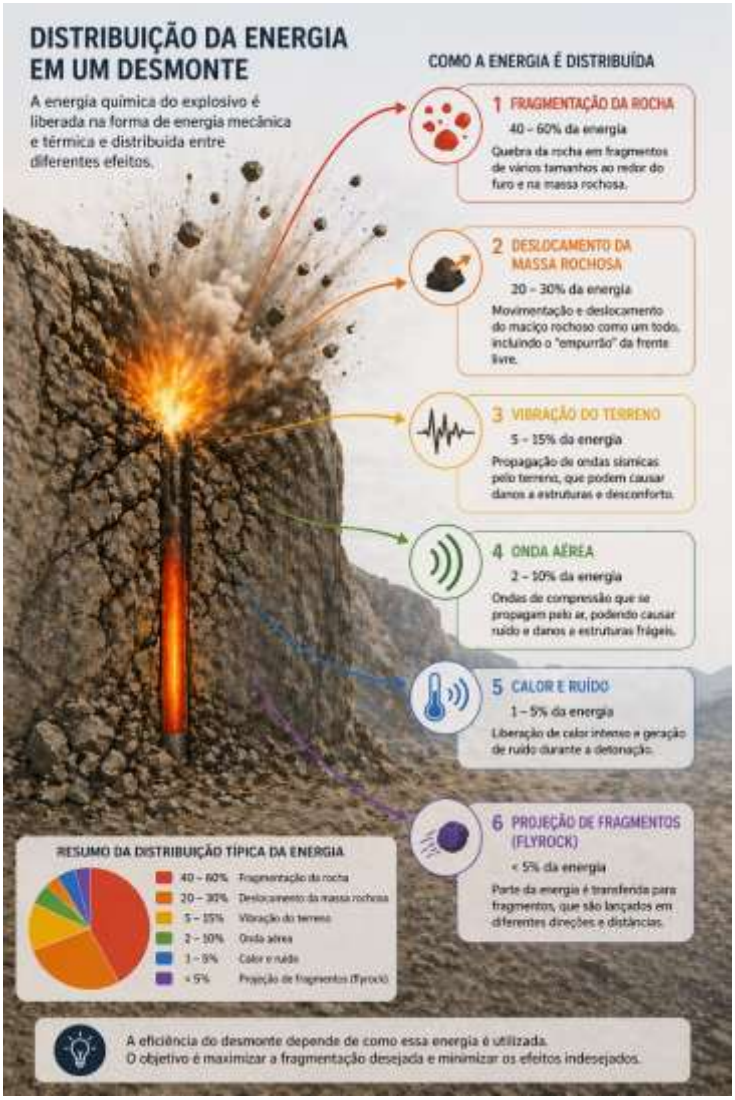
Como já comentamos nos módulos inicias, no contexto do desmonte, essa energia é distribuída entre diferentes efeitos, como:

- fragmentação da rocha
- deslocamento da massa rochosa
- vibração do terreno
- onda aérea
- calor e ruído
- projeção de fragmentos (flyrock)

Essa distribuição não é fixa e depende de diversos fatores, como:

- tipo de explosivo
- geometria do desmonte
- grau de confinamento
- características do maciço rochoso
- qualidade da execução

O ponto central é que toda a energia liberada precisa ser “consumida” pelo sistema de alguma forma. Quando essa absorção não ocorre de maneira controlada, surgem os efeitos indesejados.



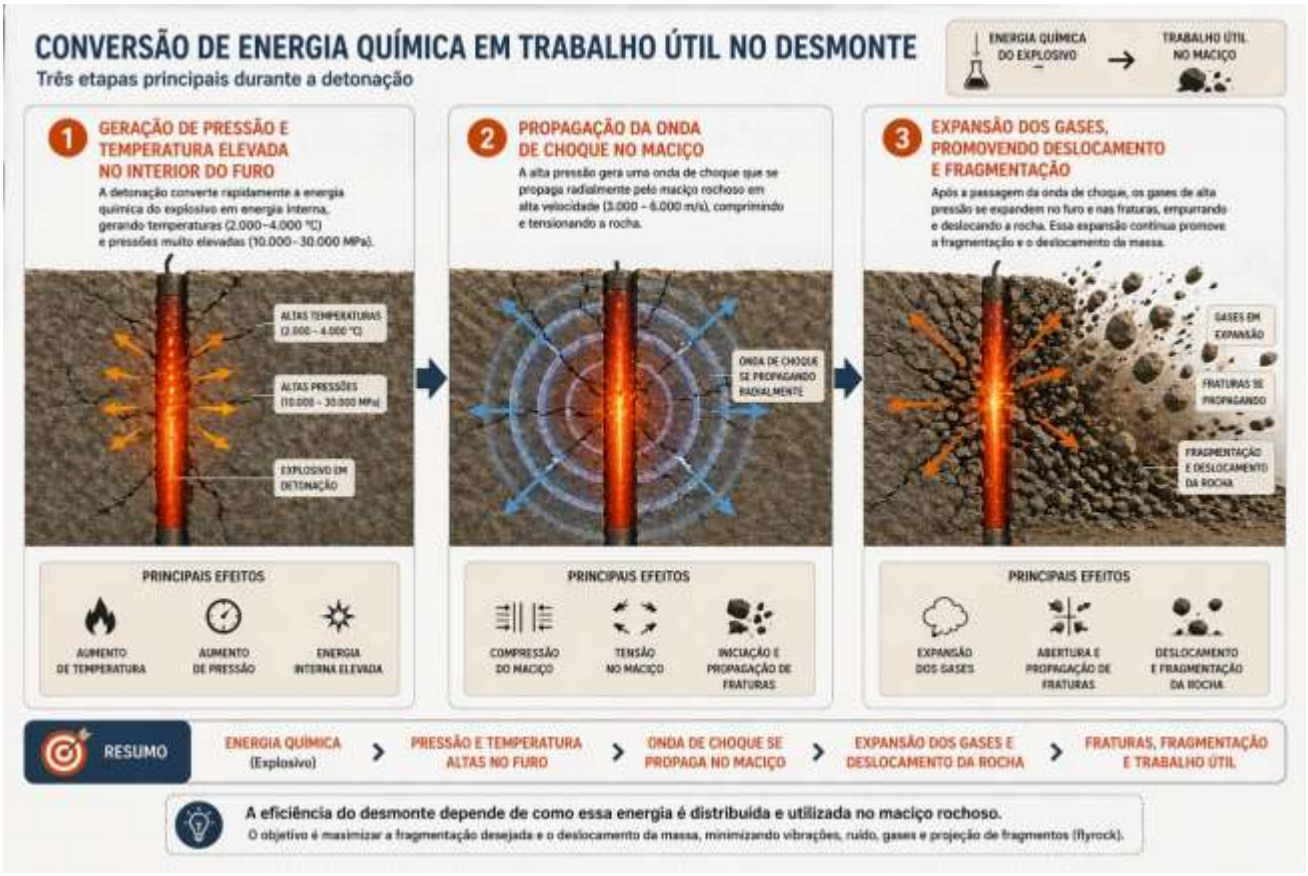

## 5.2.2 Conversão de energia química em pressão, movimento e fragmentação

Durante a detonação, a energia química do explosivo é convertida em uma onda de choque de alta pressão, seguida pela geração e expansão de gases.

Esse processo ocorre em etapas extremamente rápidas:

- geração de pressão e temperatura elevada no interior do furo

- propagação da onda de choque no maciço
- expansão dos gases, promovendo deslocamento




A fragmentação da rocha ocorre principalmente pela ação combinada da onda de choque e da pressão dos gases. O deslocamento da rocha, por sua vez, está fortemente associado à expansão dos gases confinados.

Quando essas etapas ocorrem de forma equilibrada e controlada, a energia é utilizada de maneira eficiente. Quando há desequilíbrio, parte da energia pode ser liberada de forma descontrolada, favorecendo a geração de flyrock.

## 5.2.3 Parcela útil e parcela dissipada da energia

Também, já resumimos no começo do curso que nem toda a energia liberada no desmonte contribui diretamente para o resultado desejado.

Podemos dividir, de forma conceitual, a energia em duas grandes parcelas:

- **energia útil:** Responsável pela fragmentação e pelo deslocamento adequado da rocha.
- **energia dissipada ou não aproveitada:** Associada a efeitos como vibração, onda aérea, calor, ruído e flyrock.

É importante destacar que:

- essa divisão não é rígida, mas ajuda a compreender o comportamento do sistema
- o objetivo do desmonte é maximizar a parcela útil e minimizar a parcela dissipada

O flyrock se insere nesse contexto como uma forma de energia mal direcionada, que foi transferida para fragmentos em vez de contribuir para o resultado desejado.

### 5.2.4 Relação entre energia, fragmentação, deslocamento e emissões indesejadas

A relação entre os diferentes usos da energia é direta e interdependente.

Quando a energia é bem confinada e distribuída:

- a fragmentação tende a ser mais uniforme
- o deslocamento ocorre de forma controlada
- os efeitos indesejados são reduzidos

Por outro lado, quando há perda de controle:

- a fragmentação pode se tornar irregular
- o deslocamento pode ser inadequado
- aumenta a ocorrência de vibração, onda aérea e flyrock

Isso significa que o flyrock não deve ser analisado isoladamente, mas como parte de um sistema energético.

Uma alteração em qualquer variável do desmonte pode redistribuir a energia, aumentando ou reduzindo a probabilidade de projeção de fragmentos.

# 5.3 Geração de velocidade inicial dos fragmentos

Após compreender como a energia explosiva é distribuída no desmonte, o próximo passo é entender como parte dessa energia é transferida para fragmentos específicos, fazendo com que eles adquiram velocidade e sejam projetados.

O flyrock, do ponto de vista físico, é essencialmente um fenômeno de aceleração de fragmentos. Ou seja, mais do que apenas ruptura da rocha, o que caracteriza um evento de flyrock é o fato de determinados fragmentos receberem energia suficiente para atingir velocidades elevadas, passando a se comportar como corpos lançados no espaço.

Compreender a geração dessa velocidade inicial é fundamental para entender por que alguns fragmentos percorrem distâncias muito maiores que outros.

## 5.3.1 Conceito de velocidade inicial do fragmento

A velocidade inicial do fragmento pode ser definida como a velocidade com que um fragmento de rocha é lançado no instante em que deixa a zona de influência direta da detonação.

Essa velocidade resulta da transferência de energia dos gases de detonação para o fragmento.

Durante o processo:

- os gases em alta pressão exercem força sobre a rocha
- essa força impulsiona os fragmentos ao longo de um determinado percurso
- ao serem lançados, os fragmentos passam a ter uma velocidade inicial definida




Essa velocidade inicial é a condição de partida para o movimento do fragmento e influencia diretamente todo o seu comportamento posterior.

## 5.3.2 Papel da velocidade inicial na determinação do alcance

A velocidade inicial é um dos fatores mais determinantes para o alcance do flyrock.

De forma geral:

- quanto maior a velocidade inicial, maior tende a ser a distância percorrida

- quanto menor a velocidade inicial, menor será o alcance

Isso ocorre porque a energia cinética do fragmento está diretamente relacionada à sua velocidade.

Fragmentos com maior velocidade:

- possuem maior capacidade de vencer a resistência do ar
- permanecem mais tempo em movimento
- atingem maiores distâncias

É importante destacar que o alcance não depende apenas da velocidade, mas também do ângulo de lançamento e de outros fatores, que serão discutidos nos próximos tópicos.

Ainda assim, a velocidade inicial é o principal "motor" do deslocamento.

## 5.3.3 Equação de Gurney e sua importância conceitual

Para compreender a geração de velocidade em sistemas envolvendo explosivos, um dos modelos mais conhecidos é a equação de Gurney, que conceitualmente é utilizada para calcular a velocidade de lançamento de projeteis metálicos em função da energia liberada por um explosivo.

De forma conceitual, essa equação relaciona:

- a energia do explosivo
- a massa do explosivo
- a massa do material acelerado

com a velocidade adquirida pelos fragmentos.




O ponto mais importante não é a aplicação matemática direta da equação, mas sim o entendimento do seu significado físico: a velocidade gerada depende da relação entre a energia disponível e a massa que está sendo acelerada.

Isso implica que:

- para uma mesma energia, fragmentos menores tendem a atingir maiores velocidades
- para uma mesma massa, maior energia disponível resulta em maior velocidade

Esse conceito ajuda a entender por que:

- pequenos fragmentos podem ser projetados a grandes distâncias
- concentrações locais de energia podem gerar eventos de flyrock mais severos

A equação de Gurney, portanto, deve ser vista como uma ferramenta conceitual para compreender a transferência de energia e a geração de velocidade.

## 5.3.4 Interpretação prática da geração de velocidade em eventos de flyrock

Na prática, a geração de velocidade inicial não ocorre de forma uniforme em todo o desmonte.

Eventos de flyrock estão associados a situações onde há:

- transferência localizada e intensa de energia
- baixa resistência ou confinamento em determinada região
- aceleração concentrada de fragmentos específicos

Isso significa que o flyrock não é resultado da energia média do desmonte, mas sim de picos locais de energia transferida. Como resultado desses picos de energia:

- determinados fragmentos recebem mais energia do que o esperado
- atingem velocidades mais elevadas
- percorrem distâncias maiores

Essa interpretação reforça que o controle do flyrock depende da capacidade de evitar concentrações indesejadas de energia. Ao entender esse processo, o profissional passa a reconhecer que eventos de flyrock são, essencialmente, eventos de aceleração localizada de fragmentos.

## 5.3.5 Nota técnica – Relação entre energia aplicada e velocidade inicial dos fragmentos

Para compreender de forma mais prática como os fragmentos adquirem velocidade no desmonte, é útil recorrer a uma relação fundamental da mecânica clássica, baseada nos princípios da física newtoniana.

A energia cinética de um corpo em movimento é dada por:

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2$$

onde:
• $E_c$= energia cinética do fragmento

• $m$= massa do fragmento

• $v$= velocidade do fragmento

No contexto do flyrock, essa energia cinética representa a parcela da energia do explosivo que foi efetivamente transferida para o fragmento no momento do lançamento.

Para fins práticos, podemos reorganizar essa equação para isolar a velocidade:

$$v = \sqrt{\frac{2E_c}{m}}$$

Essa forma é mais simples para a engenharia do desmonte, pois permite interpretar diretamente como a energia influencia a velocidade inicial dos fragmentos.

A partir dessa relação, podemos observar que:

- quanto maior a energia transferida ao fragmento, maior será sua velocidade inicial
- quanto maior a massa do fragmento, menor será a velocidade para uma mesma energia aplicada
- a velocidade cresce com a raiz da energia, ou seja, aumentos de energia resultam em aumento de velocidade, porém de forma não linear

Do ponto de vista prático, isso significa que concentrações localizadas de energia, como ocorre em situações de perda de confinamento, podem gerar fragmentos com velocidades significativamente mais elevadas, aumentando o potencial de alcance e de dano.

Para ilustrar de forma simples, considere um fragmento com massa de 2kg que recebe uma energia de 10.000 J:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 10.000}{2}} = \sqrt{10.000} = 100\ m/s$$

Se a energia transferida for duplicada para 20.000 J:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 20.000}{2}} = \sqrt{20.000} \approx 141\ m/s$$

Esse exemplo mostra que, ao aumentar a energia, a velocidade aumenta, mas não de forma proporcional direta, o que reforça a importância de controlar não apenas a quantidade de energia, mas principalmente sua distribuição no maciço.

Essa interpretação pode ser relacionada com a equação de Gurney, desenvolvida por Ronald W. Gurney, que estima a velocidade de fragmentos em sistemas explosivos a partir da relação entre a energia do explosivo e as massas envolvidas. Em uma forma simplificada, a equação pode ser representada como:

$$v = \sqrt{2E_g \cdot \frac{C}{M + \frac{1}{2}C}}$$

onde:

• $v$= velocidade do fragmento

• $E_g$= constante de energia do explosivo (energia de Gurney)

• $C$= massa do explosivo

• $M$= massa do material projetado

Embora mais específica para sistemas ideais, essa equação reforça o mesmo princípio observado anteriormente: a velocidade depende diretamente da energia disponível e da massa que está sendo acelerada.

É importante destacar que essas equações não são utilizadas, na prática operacional, para calcular com precisão a velocidade de fragmentos em desmontes reais. No entanto, elas são extremamente úteis para compreender o comportamento físico do fenômeno e reforçar uma ideia central deste módulo:

*o flyrock está diretamente associado à transferência localizada de energia que gera velocidades inicias elevadas.*

Esse entendimento permite ao profissional interpretar melhor os mecanismos de risco e reforça a importância do controle do confinamento e da distribuição de energia no desmonte.

## 5.3.6 Ordem de grandeza da energia dos explosivos e implicações para o flyrock

Para que os conceitos apresentados no tópico anterior possam ser melhor compreendidos, é importante situar a ordem de grandeza da energia envolvida em explosivos utilizados no desmonte de rochas.

Explosivos comerciais do tipo emulsão encartuchada apresentam, de forma geral, uma energia específica na faixa de:

• aproximadamente 2,5 a 4,0 MJ/kg

Para fins didáticos, pode-se adotar um valor médio representativo de:

*cerca de 3,0 MJ/kg (3.000.000 J/kg)*

Isso significa que mesmo pequenas quantidades de explosivo concentram uma quantidade significativa de energia.

Por exemplo, um cartucho de 200 g (0,2 kg) possui, aproximadamente:

$$E \approx 0{,}2 \times 3.000.000 = 600.000\,J$$

Ou seja:

*um único cartucho pode conter cerca de 600 mil joules de energia*

Em uma situação real de desmonte, onde diversos furos são carregados com colunas de explosivos, a energia total envolvida na detonação pode atingir valores extremamente elevados.

No entanto, é fundamental compreender que:

• apenas uma fração dessa energia é convertida em movimento de fragmentos

• grande parte da energia é consumida no fraturamento da rocha

• outra parcela é dissipada em vibração, onda aérea, calor e perdas

Esse ponto é essencial para a interpretação do flyrock. Embora a energia total disponível seja muito alta, o flyrock está associado à transferência localizada de energia para fragmentos específicos. Isso significa que:

• não é necessário que toda a energia do desmonte esteja mal distribuída

• basta que uma pequena fração da energia seja concentrada em um fragmento

• essa concentração pode gerar velocidades elevadas e grandes distâncias de lançamento

Para ilustrar esse conceito, considere que uma parcela relativamente pequena da energia de um cartucho, por exemplo na ordem de dezenas de milhares de joules, já pode ser suficiente para gerar velocidades significativas em fragmentos de menor massa.

Isso reforça uma conclusão fundamental para a prática do desmonte:

*o risco de flyrock não está apenas na quantidade total de energia, mas principalmente na forma como essa energia é distribuída e transferida no maciço.*

Esse entendimento complementa diretamente o conceito de velocidade inicial apresentado no tópico anterior e reforça a importância do controle da distribuição de energia como elemento central na prevenção do flyrock.

# 5.4 Fundamentos balísticos do lançamento de fragmentos

Após compreender como os fragmentos adquirem velocidade inicial, o próximo passo é entender como esses fragmentos se deslocam no espaço.

Uma vez liberado da zona de influência direta da detonação, o fragmento passa a se comportar como um corpo em movimento, sujeito às leis da mecânica. Esse movimento é, em sua forma mais básica, um movimento balístico.

No entanto, é importante destacar desde o início que o comportamento real do flyrock não segue perfeitamente os modelos ideais da física, sendo influenciado por diversos fatores adicionais que serão discutidos posteriormente.

## 5.4.1 Lançamento balístico de fragmentos

O lançamento balístico ocorre quando um corpo é projetado com uma determinada velocidade inicial e passa a se mover sob a ação da gravidade.

No caso do flyrock:

- o fragmento é lançado com uma velocidade inicial definida
- após o lançamento, a principal força atuante é a gravidade
- o movimento resultante descreve uma trajetória aproximadamente parabólica




Esse comportamento pode ser analisado a partir de dois componentes:

- **componente horizontal da velocidade:** Responsável pelo deslocamento ao longo da superfície.
- **componente vertical da velocidade:** Responsável pela subida e posterior queda do fragmento.

A combinação desses dois componentes define a trajetória do fragmento no espaço.

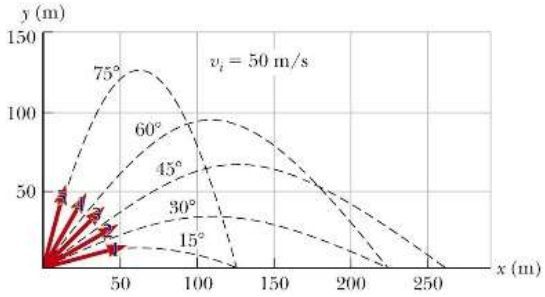
## 5.4.2 Influência do ângulo de lançamento

O ângulo de lançamento é um dos fatores mais importantes na definição da trajetória do fragmento.

Esse ângulo corresponde à direção da velocidade inicial em relação ao plano horizontal.

De forma geral:

- ângulos baixos (próximos ao horizontal): → favorecem maior alcance horizontal, com menor altura.
- ângulos elevados: → favorecem maior altura, com menor alcance horizontal direto.
- ângulos intermediários: → tendem a produzir maior alcance em condições ideais.




Em condições ideais da física clássica, o alcance máximo ocorre para ângulos próximos de 45°, embora, no flyrock real, esse valor possa variar devido às condições do desmonte.

Isso significa que dois fragmentos com a mesma velocidade inicial podem atingir distâncias muito diferentes, dependendo do ângulo com que são lançados.

No contexto do flyrock, o ângulo de lançamento está diretamente relacionado ao mecanismo de geração, conforme visto no módulo anterior.

## 5.4.3 Alcance horizontal, altura máxima e tempo de voo

O comportamento do fragmento em trajetória balística pode ser descrito por dois parâmetros fundamentais para o flyrock:

- **alcance horizontal:** Distância percorrida na direção horizontal.
- **altura máxima:** Ponto mais alto atingido durante a trajetória.

A partir das equações clássicas da mecânica, é possível estimar esses parâmetros em condições ideais.

**Alcance horizontal (R):**

$$R = \frac{v^2 \cdot \sin(2\theta)}{g}$$

**Altura máxima (H):**

$$H = \frac{v^2 \cdot \sin^2(\theta)}{2g}$$

onde:
• $v$= velocidade inicial do fragmento

• $\theta$= ângulo de lançamento

• $g$= aceleração da gravidade (≈ 9,81 m/s²)

Essas equações, derivadas da mecânica clássica newtoniana, permitem interpretar de forma direta como a velocidade e o ângulo influenciam o comportamento do fragmento.

A partir delas, podemos observar que:

• o alcance cresce com o quadrado da velocidade

• pequenas variações na velocidade podem gerar grandes variações na distância

• o ângulo influencia simultaneamente o alcance e a altura

• o alcance máximo ocorre para uma combinação específica entre velocidade e ângulo

Para ilustrar, considere um fragmento lançado a 100 m/s com ângulo de 45°:

$$R \approx \frac{100^2 \cdot \sin(90°)}{9{,}81} \approx \frac{10.000}{9{,}81} \approx 1.019\, m$$

Esse valor não representa a realidade prática, mas mostra o potencial teórico de alcance quando há altas velocidades associadas a condições favoráveis de lançamento.

Esse tipo de análise é extremamente útil para reforçar um ponto importante:

*a velocidade inicial é o principal fator de amplificação do alcance do flyrock*

## 5.4.4 Limitações das equações balísticas simplificadas

As equações balísticas clássicas são baseadas em hipóteses simplificadas, como:

- ausência de resistência do ar
- forma ideal do corpo (geralmente pontual ou esférica)
- movimento em ambiente uniforme
- ausência de rotação do fragmento

Essas condições não representam a realidade do flyrock.

Na prática:

- os fragmentos possuem formas irregulares
- a resistência do ar influencia o movimento
- pode haver rotação e instabilidade durante o voo
- o ângulo de lançamento raramente é bem definido
- o terreno pode alterar o comportamento após o impacto

Por isso, as equações balísticas simples devem ser utilizadas como ferramenta de compreensão e não como previsão exata. Elas ajudam a entender tendências, mas não substituem a análise prática e a abordagem de engenharia.

# 5.5 Fatores que afetam a trajetória real

No tópico anterior, foi apresentada a base do movimento balístico, que permite compreender, de forma simplificada, como um fragmento se desloca após ser lançado. No entanto, esse modelo considera condições ideais que não representam a realidade do desmonte.

Na prática, o comportamento do flyrock é influenciado por diversos fatores físicos, muitas vezes desconhecidos antes de que ocorra o evento, que modificam significativamente a trajetória dos fragmentos, tornando o movimento muito mais complexo do que uma simples parábola.

Compreender esses fatores é fundamental para interpretar corretamente o alcance real do flyrock e evitar análises simplificadas que podem levar a decisões inseguras.

## 5.5.1 Resistência do ar

A resistência do ar, também conhecida como arrasto, é uma das principais forças que alteram a trajetória real dos fragmentos.

Diferentemente do modelo ideal, onde o movimento ocorre sem resistência, na prática:

- o ar exerce uma força contrária ao movimento do fragmento
- essa força reduz a velocidade ao longo da trajetória
- o alcance real tende a ser menor do que o previsto pelo modelo ideal




O efeito do arrasto depende de vários fatores, incluindo:

- velocidade do fragmento
- área exposta ao fluxo de ar
- forma do fragmento

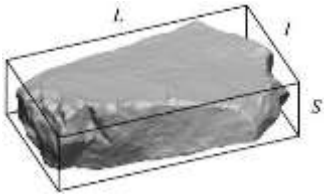
Esse efeito é especialmente relevante para fragmentos leves ou de grande área superficial.

## 5.5.2 Tamanho e forma do fragmento

O tamanho e a forma dos fragmentos têm influência direta sobre o seu comportamento em voo.

Além disso, a forma irregular dos fragmentos:

- altera a interação com o ar
- dificulta a previsão da trajetória
- pode gerar movimentos instáveis durante o voo




Diferentemente de projéteis ideais, os fragmentos de rocha não possuem forma regular, o que aumenta a variabilidade do comportamento.

## 5.5.3 Densidade da rocha

A densidade do fragmento influencia diretamente sua resposta ao movimento e à resistência do ar.

Fragmentos com maior densidade:

- possuem maior massa para um mesmo volume
- apresentam maior inércia

- tendem a ser menos afetados pelo arrasto

Fragmentos com menor densidade:

- desaceleram mais rapidamente
- podem ter alcance reduzido
- apresentam maior sensibilidade às forças aerodinâmicas

Esse fator se torna relevante quando há variação litológica no maciço, com presença de materiais mais densos ou mais alterados.

## 5.5.4 Rugosidade e forma aerodinâmica

A rugosidade superficial e a forma aerodinâmica influenciam a forma como o ar interage com o fragmento.

Fragmentos com superfícies irregulares:

- geram maior turbulência no fluxo de ar
- sofrem maior resistência aerodinâmica
- apresentam maior instabilidade durante o voo

Fragmentos com formas mais compactas:

- podem apresentar menor resistência relativa
- tendem a manter melhor a trajetória

No entanto, como a maioria dos fragmentos de flyrock possui geometria irregular, o comportamento aerodinâmico é altamente variável e difícil de prever com precisão.

## 5.5.5 Possível influência de rotação e ricochete (rebound)

Além dos fatores já discutidos, outros efeitos podem influenciar o comportamento do flyrock:

- **rotação do fragmento durante o voo:** Pode alterar a estabilidade e a trajetória, especialmente em fragmentos irregulares.
- **efeitos aerodinâmicos associados à rotação:** Podem gerar desvios na trajetória.
- **impactos intermediários (rebound ou ricochete):** Fragmentos podem atingir superfícies durante o voo e mudar de direção.

Esses fenômenos tornam o comportamento do flyrock ainda mais complexo, especialmente em ambientes com topografia irregular.

Essa variabilidade reforça uma ideia central do curso:

*o comportamento do flyrock não pode ser previsto com precisão absoluta.*

Por isso, o uso de modelos simplificados deve ser sempre acompanhado de análise crítica, observação de campo e abordagem conservadora.

# 5.6 Influência da topografia no alcance e no impacto

Nos tópicos anteriores, foram apresentados os fundamentos da geração de velocidade e do movimento balístico dos fragmentos. No entanto, esses conceitos, por si só, ainda não são suficientes para avaliar o risco real do flyrock em campo.

Isso ocorre porque o deslocamento dos fragmentos não acontece em um espaço neutro. Ele ocorre sobre um terreno real, com desníveis, variações de cota e irregularidades que alteram significativamente tanto o alcance quanto a energia de impacto.

Assim, compreender a influência da topografia é essencial para transformar o conhecimento físico em avaliação prática de risco.

## 5.6.1 Cotas superiores e inferiores

A posição relativa entre o ponto de detonação e o terreno ao redor, representada pelas cotas superiores e inferiores, tem impacto direto na interpretação do alcance do flyrock.

Quando o terreno ao redor está em cota semelhante à do desmonte:

- o alcance horizontal tende a ser interpretado de forma mais direta
- a distância percorrida representa, de forma aproximada, o deslocamento real do fragmento

Por outro lado, quando há variação de cota:

- o mesmo lançamento pode atingir regiões mais próximas ou mais distantes, dependendo do relevo
- o risco não pode ser avaliado apenas pela distância horizontal




Assim, a análise do risco deve sempre considerar a posição tridimensional do terreno, e não apenas a projeção em planta.

## 5.6.2 Ampliação de alcance em áreas rebaixadas

Quando o terreno à frente do desmonte apresenta áreas rebaixadas, ocorre um fenômeno importante:

*o alcance horizontal efetivo do fragmento pode aumentar significativamente.*

Isso acontece porque:

- o fragmento permanece mais tempo em voo

- a trajetória não encontra imediatamente o solo
- há maior desenvolvimento do deslocamento horizontal

Na prática, isso significa que:

- áreas localizadas em cotas inferiores podem ser atingidas mesmo estando aparentemente distantes
- o risco real pode ser subestimado se a topografia não for considerada

Esse é um dos fatores mais críticos em desmontes próximos a vales, taludes descendentes ou áreas escavadas anteriormente.

## 5.6.3 Aumento de energia de impacto em trajetórias descendentes

Outro efeito importante da topografia é o aumento da energia de impacto em trajetórias descendentes.

Quando um fragmento se desloca em direção a uma área mais baixa:

- ele converte energia potencial em energia cinética
- sua velocidade ao atingir o solo tende a ser maior
- o impacto se torna mais severo

Isso implica que:

- mesmo fragmentos com velocidade inicial moderada podem gerar impactos significativos
- estruturas localizadas em cotas inferiores estão mais expostas a danos severos

Esse aspecto é fundamental na avaliação de risco em operações com desníveis acentuados.

## 5.6.4 Implicações da topografia para o risco real

A influência da topografia leva a uma conclusão essencial para a engenharia de controle do flyrock:

*o risco não depende apenas da distância, mas da combinação entre trajetória e relevo.*

Na prática, isso significa que:

- duas detonações com comportamento semelhante podem gerar riscos completamente diferentes
- a mesma distância horizontal pode representar níveis distintos de perigo
- áreas aparentemente seguras podem, na realidade, estar expostas devido à geometria do terreno

Dessa forma, a avaliação adequada do risco deve sempre considerar:

- o perfil topográfico completo da área
- a posição relativa de pessoas, equipamentos e estruturas
- a possibilidade de trajetórias ampliadas ou energizadas pelo relevo

A análise da influência da topografia reforça que o flyrock não pode ser avaliado apenas com base em modelos simplificados ou distâncias planas. O relevo modifica tanto o alcance quanto a energia de impacto dos fragmentos, podendo ampliar significativamente o risco real.

## 5.7 Relação entre física, mecanismo de geração e potencial de dano

Ao longo dos Módulos 4 e 5, foram apresentados dois pilares fundamentais para a compreensão do flyrock:

- os **mecanismos de geração**, que explicam como a energia é liberada
- os **fundamentos físicos e balísticos**, que explicam como os fragmentos se movimentam

Neste ponto do curso, torna-se essencial integrar esses conhecimentos.

Isso porque o risco real do flyrock não depende apenas da ocorrência de projeção, mas da forma como essa projeção se desenvolve ao longo de todo o processo, desde a liberação da energia até o impacto final.

### 5.7.1 Da geração do mecanismo à velocidade inicial

O primeiro elo da cadeia está no mecanismo de geração do flyrock.

Cada mecanismo, como face burst, cratering ou rifling, define:

- como a energia explosiva é liberada
- em que direção essa energia é direcionada
- com que intensidade ela é transferida para os fragmentos

Quando há perda de confinamento:

- a energia é concentrada de forma localizada
- fragmentos específicos recebem maior impulso
- ocorre a geração de velocidades iniciais elevadas

Assim, o mecanismo de geração é o ponto de partida que condiciona todo o comportamento posterior do flyrock.

### 5.7.2 Da velocidade inicial à trajetória

Uma vez que o fragmento adquire velocidade inicial, entra em cena o comportamento balístico.

A velocidade inicial, combinada com o ângulo de lançamento:

- define o alcance potencial
- determina a altura atingida
- influencia o tempo de voo

De forma geral:

- maiores velocidades resultam em maiores alcances
- determinados ângulos favorecem maior projeção horizontal
- pequenas variações podem alterar significativamente a trajetória

Nesse ponto, o fenômeno deixa de ser apenas um problema de explosivos e passa a ser também um problema de física do movimento.

### 5.7.3 Da trajetória ao impacto real

O último estágio da cadeia é o impacto do fragmento.

Neste ponto, o potencial de dano depende de:

- velocidade no momento do impacto
- massa do fragmento
- ângulo de incidência
- condições do terreno ou da estrutura atingida

Além disso, fatores como topografia influenciam diretamente:

- trajetórias descendentes aumentam a energia de impacto
- áreas rebaixadas ampliam o alcance
- superfícies intermediárias podem alterar o comportamento do fragmento

Assim, o dano não é determinado apenas pela projeção, mas pela forma como o movimento evolui até o impacto final.

## 5.7.4 Integração entre física e avaliação de risco

A integração entre os elementos discutidos leva a uma conclusão fundamental:

*o risco do flyrock é o resultado de uma cadeia contínua de eventos físicos.*

Essa cadeia pode ser resumida como:

- **Mecanismo de geração** → define como a energia é liberada
- **Velocidade inicial** → define o potencial de alcance
- **Trajetória** → define a área potencialmente atingida
- **Impacto** → define o nível real de dano




Na prática, isso significa que:

- o mesmo mecanismo pode gerar diferentes níveis de risco
- a mesma velocidade pode resultar em consequências distintas
- a mesma trajetória pode ser mais ou menos crítica dependendo do entorno

Portanto, a avaliação de risco deve ser sempre integrada, considerando:

- o mecanismo observado
- as condições de lançamento
- o comportamento físico do fragmento
- o contexto espacial da operação

# 5.8 Limitações práticas da análise física simplificada

Ao longo deste módulo, foram apresentados os principais fundamentos físicos e balísticos que explicam o comportamento do flyrock. Esses conceitos são essenciais para compreender como os fragmentos ganham velocidade, como se deslocam e como podem gerar impacto. No entanto, é fundamental reconhecer que esses modelos representam simplificações da realidade.

Na prática, o comportamento do flyrock é muito mais complexo, e a aplicação direta de modelos idealizados pode levar a interpretações equivocadas se não for acompanhada de análise crítica.

## 5.8.1 Utilidade dos modelos simplificados

Os modelos físicos simplificados têm um papel importante na formação técnica.

Eles permitem:

- entender relações fundamentais entre variáveis
- visualizar tendências de comportamento
- construir raciocínio físico estruturado

No contexto do flyrock, esses modelos ajudam a compreender:

- a influência da velocidade inicial
- o efeito do ângulo de lançamento
- a relação entre energia e alcance

Portanto, esses modelos não devem ser descartados, mas sim utilizados como ferramentas de base para o entendimento do fenômeno.

## 5.8.2 Principais limitações da análise física idealizada

Apesar de sua utilidade, os modelos simplificados apresentam limitações importantes quando aplicados à realidade do desmonte.



Esses fatores tornam o comportamento do flyrock altamente variável e, em muitos casos, imprevisível em termos exatos.

## 5.8.3 Diferença entre compreensão física e previsão exata

Um ponto crítico para o desenvolvimento técnico do aluno é entender a diferença entre:

*compreender o fenômeno X prever exatamente o comportamento*

A física permite:

- explicar os mecanismos envolvidos
- identificar tendências
- estimar comportamentos possíveis

Mas não permite, na prática:

- prever com precisão absoluta a trajetória de cada fragmento
- garantir limites exatos de alcance
- eliminar completamente a incerteza

Essa distinção é essencial para evitar uma falsa sensação de controle.

## 5.8.4 Por que o estudo físico é base, mas não solução completa

A partir dessa análise, fica claro que o estudo físico é indispensável, mas não suficiente por si só.

Na prática, o controle do flyrock exige a integração de múltiplos elementos:

- fundamentos físicos
- compreensão dos mecanismos de geração
- leitura de campo
- conhecimento geológico
- controle operacional
- abordagem conservadora

Além disso, essa limitação dos modelos físicos prepara o caminho para uma abordagem mais avançada, baseada em:

- análise probabilística
- gestão de risco
- definição de zonas de segurança

Ou seja, o profissional não deve buscar previsões exatas, mas sim reduzir a probabilidade de ocorrência e mitigar as consequências. Embora a física forneça a base para compreensão do fenômeno, a realidade do campo exige uma abordagem mais ampla, que incorpore incertezas e variabilidade. Essa compreensão é essencial para formar um profissional capaz de tomar decisões seguras, técnicas e responsáveis.

# 5.9 Fechamento do módulo e preparação para os próximos temas

Ao longo deste módulo, foi construída a base física necessária para compreender o comportamento do flyrock após sua geração. Partimos da ideia de que o fenômeno não se limita ao momento da detonação, mas se estende ao movimento dos fragmentos no espaço, envolvendo velocidade, trajetória e condições de impacto.

Neste fechamento, consolidamos os principais conceitos e preparamos o avanço para o próximo passo do curso: o controle físico do fenômeno por meio do confinamento.

## 5.9.1 Síntese dos fundamentos físicos e balísticos

O Módulo 5 mostrou que o flyrock deve ser compreendido também como um fenômeno físico e balístico.

Entre os principais pontos desenvolvidos, destacam-se:

- a energia explosiva é convertida em movimento e pode ser transferida para fragmentos
- a velocidade inicial é determinante para o alcance potencial
- o ângulo de lançamento influencia a forma da trajetória
- o movimento dos fragmentos segue princípios balísticos, ainda que com limitações
- fatores como resistência do ar, forma e tamanho alteram a trajetória real
- a topografia modifica significativamente o alcance e a energia de impacto

Esses elementos mostram que o comportamento do flyrock não depende apenas da detonação, mas da evolução física do movimento após a liberação da energia.

## 5.9.2 O que o aluno deve ter entendido ao final do módulo

Ao final deste módulo, o aluno deve ser capaz de compreender que:

- o flyrock é um fenômeno de transferência de energia e movimento
- a severidade do evento depende da velocidade, da trajetória e do impacto
- modelos físicos ajudam a entender o comportamento, mas não permitem previsão exata
- o comportamento real é influenciado por múltiplos fatores simultâneos
- a análise do risco exige integração entre física, mecanismos de geração e condições de campo

Mais do que dominar conceitos isolados, o aluno deve ter desenvolvido uma visão integrada do fenômeno, reconhecendo suas variáveis e suas limitações.

# Módulo 6. Confinamento e SDoB

## 6.1 Abertura do módulo e papel central do confinamento no controle do flyrock

O desenvolvimento deste curso até o momento permitiu construir uma base sólida sobre o fenômeno do flyrock, seus riscos, seus mecanismos de geração e os fundamentos físicos que governam o comportamento dos fragmentos após a detonação. A partir dessa construção progressiva, torna-se possível avançar para um nível mais profundo de entendimento, voltado não apenas para explicar o fenômeno, mas para compreender como controlá-lo de forma consistente.

Neste contexto, o Módulo 6 representa um ponto de inflexão dentro do curso. Saímos de uma abordagem predominantemente descritiva e passamos a tratar diretamente do núcleo físico que governa o comportamento do desmonte: o confinamento.

O confinamento não deve ser entendido apenas como um detalhe do projeto ou como um parâmetro operacional isolado. Ele é a condição fundamental que permite que a energia explosiva seja transformada em trabalho útil, promovendo fragmentação e deslocamento controlado da rocha. Sem confinamento adequado, essa transformação perde eficiência e, principalmente, perde controle.

Ao longo deste módulo, será desenvolvido o entendimento de que o flyrock, em grande parte dos casos, não é consequência da quantidade de energia utilizada, mas da forma como essa energia é contida, direcionada e liberada. Como já mencionamos anteriormente, quando o confinamento falha, a energia encontra caminhos de menor resistência, resultando em liberação descontrolada e, frequentemente, na ejeção de fragmentos.

Além disso, será introduzido um dos conceitos mais importantes deste curso: o Scaled Depth of Burial (SDoB). Este não será tratado apenas como um índice de cálculo ou uma relação empírica, mas como uma representação física do equilíbrio entre energia e confinamento. Sua correta interpretação será essencial para a compreensão do comportamento do desmonte e para o controle do risco de flyrock.

### 6.1.1 Relação entre os módulos anteriores e o Módulo 6

Os módulos anteriores foram estruturados de forma a conduzir o aluno por uma sequência lógica de aprendizado.

Inicialmente, foi apresentado o fenômeno do flyrock, sua importância e seus impactos. Em seguida, foram discutidos os riscos associados, as responsabilidades técnicas e os aspectos normativos. Posteriormente, o curso avançou para a análise dos mecanismos de geração do flyrock, mostrando como diferentes condições podem levar à ejeção de fragmentos. Por fim, foram abordados os fundamentos físicos e o comportamento balístico, explicando como os fragmentos se movimentam após serem lançados.

Essa sequência permitiu responder, de forma progressiva, a duas perguntas fundamentais:

- como o flyrock é gerado?
- como os fragmentos se comportam após serem lançados?

No entanto, permanece uma questão central:

- por que a energia, em determinados casos, deixa de atuar de forma controlada e passa a gerar esses efeitos indesejados

É exatamente essa questão que introduz o Módulo 6.

A partir deste ponto, o foco deixa de ser apenas o fenômeno observado e passa a ser o fator que condiciona o comportamento da energia dentro do maciço rochoso. Esse fator é o confinamento.

### 6.1.2 Por que o confinamento é um tema central no estudo do flyrock

O confinamento é o elemento que define como a energia explosiva interage com o maciço rochoso.

Durante a detonação, a energia liberada pelo explosivo tende naturalmente a se expandir. No entanto, essa expansão não ocorre de forma livre. Ela é condicionada pela resistência do meio que envolve o explosivo, ou seja, pelo confinamento.

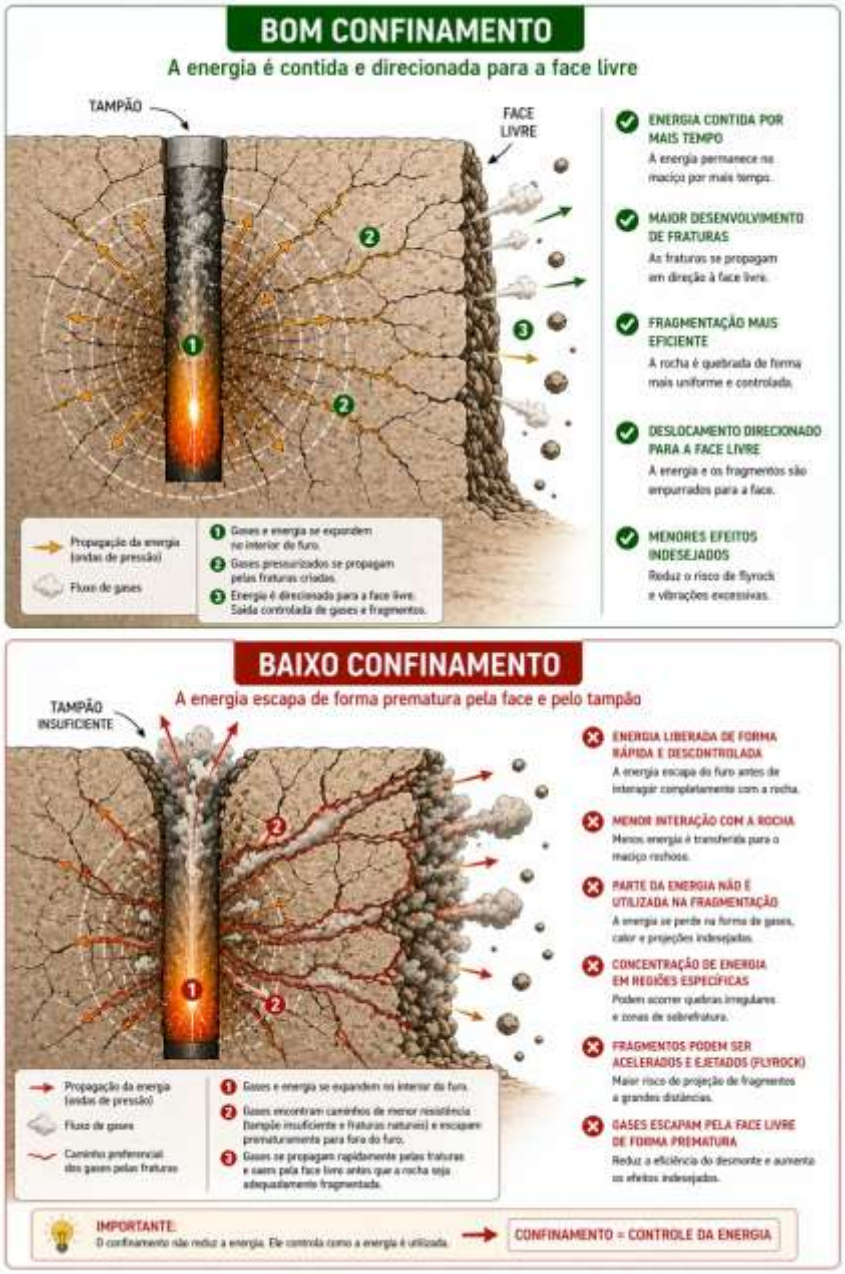
Quando o confinamento é adequado:

- a energia permanece por mais tempo no interior do maciço
- há maior desenvolvimento de fraturas
- a fragmentação ocorre de forma mais eficiente
- o deslocamento é direcionado para a face livre
- os efeitos indesejados são reduzidos

Por outro lado, quando o confinamento é insuficiente ou falha localmente:

- a energia é liberada de forma rápida e descontrolada
- a interação com a rocha é reduzida
- parte da energia deixa de ser utilizada na fragmentação
- ocorre concentração de energia em regiões específicas
- fragmentos podem ser acelerados e ejetados

Essa relação deixa claro que o confinamento não atua reduzindo a energia, mas controlando sua utilização.




Portanto, o confinamento pode ser entendido como o principal mecanismo de controle do desmonte. Ele define se a energia será utilizada de forma produtiva ou se será convertida em efeitos indesejados, como o flyrock.

## 6.1.3 O desequilíbrio entre energia e contenção como origem do problema

Um dos conceitos mais importantes deste módulo é o entendimento do desmonte como um sistema de equilíbrio entre dois elementos principais:

- a energia disponível
- a capacidade de contenção dessa energia

Esse equilíbrio é dinâmico e depende das condições específicas de cada desmonte.

Quando há compatibilidade entre a energia aplicada e o nível de confinamento:

- o sistema consegue absorver e redistribuir a energia

- a fragmentação ocorre de forma eficiente
- o deslocamento é controlado
- o risco de flyrock é reduzido

No entanto, quando ocorre um desequilíbrio, especialmente quando a energia supera a capacidade de contenção:

- o sistema perde a capacidade de absorção
- a energia busca caminhos de menor resistência
- ocorre liberação abrupta de energia
- fragmentos podem ser lançados com alta velocidade

Esse desequilíbrio pode ocorrer por diferentes motivos, como:

- afastamento insuficiente
- falhas no tamponamento
- presença de descontinuidades no maciço
- carregamento inadequado
- variações geológicas não identificadas

Independentemente da causa específica, o resultado é o mesmo: perda de controle da energia. Dessa forma, o flyrock pode ser interpretado, em muitos casos, como a manifestação visível de um desequilíbrio entre energia e confinamento.

## 6.1.4 Visão geral do papel do SDoB neste módulo

Dentro desse contexto, o Scaled Depth of Burial (SDoB) surge como uma ferramenta conceitual importante para representar a relação entre energia e confinamento.

Tradicionalmente, o SDoB é tratado como uma relação geométrica entre o tampão e o comprimento de carga, que representa o que chamamos de "profundidade de enterramento", ou seja, o quanto a carga explosiva está "enterrada" e confinada na rocha. No entanto, essa abordagem, quando utilizada de forma isolada, pode levar a interpretações limitadas.

Neste módulo, o SDoB será tratado de forma mais ampla, como uma expressão do nível de confinamento relativo do sistema.

Isso significa que o SDoB deve ser entendido como um indicador que reflete:

- a capacidade de contenção da energia
- o tempo de interação entre gases e rocha
- a tendência de liberação controlada ou descontrolada da energia

Valores mais elevados de confinamento relativo tendem a favorecer:

- maior aproveitamento da energia
- melhor fragmentação
- menor probabilidade de ejeção de fragmentos

Por outro lado, condições de baixo confinamento relativo tendem a:

- facilitar a fuga de energia
- reduzir a eficiência do desmonte
- aumentar o risco de flyrock

Ao longo deste módulo, o SDoB será desenvolvido como uma ponte entre a teoria e a prática, permitindo interpretar o comportamento do desmonte de forma mais estruturada.

# 6.2 Conceito de confinamento

No desmonte com explosivos, não basta apenas gerar energia. O resultado desejado depende diretamente da capacidade de manter essa energia dentro do sistema por tempo suficiente para que ela realize trabalho útil. Isso significa que a eficiência do desmonte não está apenas na quantidade de energia liberada, mas na forma como essa energia é contida, distribuída e direcionada no interior do maciço rochoso.

O confinamento, portanto, não deve ser entendido como um elemento isolado, como o tamponamento do furo, mas sim como o resultado de um conjunto de fatores que atuam conjuntamente para resistir à expansão dos gases de detonação. Ele envolve:

- a geometria do desmonte
- as características do maciço rochoso
- a qualidade da execução em campo.

Ao longo deste tópico, será desenvolvido o entendimento de que o confinamento é a condição que permite transformar energia em fragmentação eficiente e deslocamento controlado. Quando essa condição não é atendida, a energia tende a escapar de forma desordenada, dando origem a efeitos indesejados, entre eles o flyrock.

## 6.2.1 O que significa confinar a energia explosiva

Do ponto de vista físico, confinar a energia explosiva significa impor resistência à expansão dos gases gerados pela detonação, mantendo essa energia contida no interior do maciço rochoso por um intervalo de tempo suficiente para que ela atue na fragmentação e no deslocamento da rocha.

Durante a detonação, ocorre uma rápida geração de gases sob alta pressão. Esses gases tendem naturalmente a se expandir em todas as direções. No entanto, essa expansão não ocorre livremente, pois encontra resistência no meio ao redor do furo. Essa resistência é o que chamamos de confinamento.

Ela é composta por diferentes elementos, entre os quais se destacam:

- o próprio maciço rochoso ao redor do furo
- o afastamento, que representa a massa de rocha entre o furo e a face livre
- o tampão, que impede a saída direta dos gases pela parte superior
- a geometria do plano de fogo
- as condições geológicas locais

O confinamento atua, portanto, como uma barreira física que retarda a liberação da energia. Esse retardamento é fundamental, pois aumenta o tempo de interação entre os gases de detonação e a rocha, permitindo que a energia seja transferida de forma mais eficiente.

É importante destacar que confinar não significa impedir completamente a saída da energia, mas sim controlar o modo e o momento em que essa energia é liberada.

## 6.2.2 Relação entre contenção da energia e eficiência do desmonte

A eficiência do desmonte está diretamente relacionada à capacidade de manter a energia no interior do sistema pelo tempo necessário para que ela seja convertida em trabalho útil.

Quando o confinamento é adequado:

- a energia permanece atuando no maciço por mais tempo
- há maior desenvolvimento de fraturas
- a fragmentação tende a ser mais homogênea
- o deslocamento da rocha ocorre de forma direcionada

- a energia é melhor aproveitada

Nesse cenário, a maior parte da energia liberada é convertida em fragmentação e deslocamento, reduzindo a parcela de energia desperdiçada.

Por outro lado, quando o confinamento é inadequado:

- a energia escapa rapidamente
- o tempo de interação com a rocha é reduzido
- a fragmentação tende a ser ineficiente
- ocorre maior dissipação em formas indesejadas
- há aumento do risco de projeção de fragmentos

Isso significa que a perda de confinamento está diretamente associada à perda de eficiência do desmonte.

Esse entendimento reforça um ponto fundamental: um desmonte eficiente não é aquele que utiliza mais energia, mas aquele que consegue reter e utilizar melhor a energia disponível.

## 6.2.3 Desequilíbrio entre energia e resistência do maciço

O confinamento deve ser analisado como a capacidade do sistema de resistir à energia gerada pela detonação.

Quando a energia liberada é compatível com essa capacidade de resistência:

- o sistema consegue absorver e redistribuir a energia
- o comportamento do desmonte tende a ser estável
- os efeitos são mais previsíveis

No entanto, quando a energia excede a capacidade de contenção do sistema:

- ocorre ruptura prematura das zonas de confinamento
- a energia encontra caminhos preferenciais de fuga
- há liberação abrupta de energia
- fragmentos podem ser acelerados de forma significativa

Esse desequilíbrio pode ocorrer tanto por excesso de energia quanto por redução da resistência do sistema, como em casos de:

- afastamento insuficiente
- tampão mal executado
- presença de zonas fraturadas
- variações geológicas não identificadas

Portanto, o problema não está apenas na energia, mas na relação entre energia e resistência do meio.

## 6.2.4 Confinamento como base do controle físico do flyrock

O flyrock pode ser interpretado, em grande parte dos casos, como uma consequência direta da perda de confinamento.

Quando o sistema não consegue conter adequadamente a energia:

- ocorre liberação localizada e descontrolada
- fragmentos podem ser submetidos a altas acelerações

- a energia é convertida em movimento balístico
- o material pode ser lançado além da área prevista

Isso significa que o confinamento é o principal mecanismo físico de controle do flyrock. Mais do que um parâmetro de projeto, ele representa a condição que determina se a energia será:

*utilizada para fragmentação e deslocamento controlado ou convertida em lançamento de fragmentos*.

Essa visão permite interpretar o flyrock não como um evento isolado, mas como o resultado de uma falha no sistema de contenção da energia. Assim, o controle do flyrock passa, necessariamente, pelo controle do confinamento.

# 6.3 Conceito de SDoB

Dando continuidade ao entendimento do confinamento como elemento central no controle do comportamento da energia explosiva, este tópico introduz um dos conceitos mais importantes de todo o módulo e, possivelmente, de todo o curso: o Scaled Depth of Burial, ou SDoB.

O SDoB não deve ser tratado apenas como um parâmetro de cálculo ou uma relação empírica. Ele representa uma forma estruturada de interpretar o equilíbrio entre a energia disponível no sistema e a capacidade de contenção oferecida pelo maciço rochoso.

Ao longo deste tópico, será desenvolvido o entendimento de que o SDoB funciona como uma ponte entre a geometria do desmonte, a quantidade de explosivo e o nível de confinamento. Mais do que um número, ele deve ser compreendido como uma expressão física do comportamento do sistema.

Esse conceito será fundamental para interpretar por que determinados desmontes resultam em fragmentação controlada, enquanto outros tendem a gerar condições de instabilidade e aumento do risco de flyrock.

## 6.3.1 Origem do conceito de SDoB e sua aplicação no desmonte de rochas

O conceito de *Scaled Depth of Burial* (SDoB), ou profundidade escalonada de enterramento, tem sua origem em estudos experimentais de cargas explosivas enterradas, especialmente em ensaios de crateramento. Esses estudos buscavam compreender como a profundidade de enterramento da carga, em relação à quantidade de explosivo, influenciava os efeitos observados na superfície, como formação de cratera, empolamento, ejeção de material, ruído, onda aérea e projeção de fragmentos.

A base física do conceito está na ideia de que a profundidade absoluta da carga não é suficiente para interpretar o comportamento do desmonte. Uma mesma profundidade pode representar bom confinamento para uma carga pequena, mas confinamento insuficiente para uma carga maior. Por isso, o SDoB normaliza a profundidade de enterramento pela raiz cúbica da massa de explosivo envolvida no processo, permitindo comparar diferentes condições de carga sob uma mesma lógica física.

Na literatura técnica de desmonte, o conceito é frequentemente associado aos trabalhos de Chiappetta e colaboradores, especialmente a partir de estudos de crateramento publicados na década de 1980, nos quais se observou que a redução do SDoB aumenta a probabilidade de ejeção de material, o alcance dos fragmentos projetados e a velocidade inicial de lançamento. Nessa abordagem, a carga que contribui para o crateramento é considerada de forma limitada à porção superior da coluna explosiva, relacionada ao tampão e ao comprimento de carga efetivamente envolvido na formação da cratera.

Posteriormente, o conceito foi incorporado a aplicações práticas no desmonte de rochas e em estudos voltados ao controle do flyrock. Nesse contexto, destaca-se o trabalho de McKenzie (2009), que utilizou o SDoB como base para desenvolver formulações empíricas de estimativa do alcance máximo de fragmentos, tamanho crítico de partícula e distância de segurança. Essa aplicação contribuiu para difundir o SDoB como uma ferramenta prática de análise do confinamento e de apoio à definição de zonas de exclusão.

É importante destacar, entretanto, que o SDoB não surgiu como um modelo completo de previsão de flyrock, mas como um conceito físico de interpretação do equilíbrio entre energia explosiva e confinamento. Sua principal contribuição é permitir que o profissional avalie se a carga está muito rasa, adequadamente confinada ou excessivamente confinada para determinado contexto. Por essa razão, o SDoB deve ser entendido como um indicador de tendência e não como garantia absoluta de comportamento do desmonte.

Com o avanço dos estudos sobre flyrock, o SDoB passou a ser utilizado em modelos empíricos e ferramentas de engenharia, mas também recebeu críticas e revisões. Pesquisas mais recentes destacam que a previsão do flyrock continua limitada, pois depende não apenas do confinamento, mas também da massa e forma dos fragmentos, velocidade inicial, ângulo de lançamento, resistência do maciço, estruturas geológicas, qualidade da execução e condições reais da face.

Dessa forma, ao estudar o SDoB, o profissional não está apenas aprendendo uma fórmula, mas sim um conceito essencial para interpretar a relação entre energia e confinamento no desmonte. Esse entendimento será fundamental para os próximos tópicos, nos quais o SDoB será analisado como ferramenta de leitura técnica do risco de flyrock, sempre associado à análise crítica do plano de fogo, da execução e das condições reais do maciço rochoso.

## 6.3.2 Definição de Scaled Depth of Burial

O Scaled Depth of Burial, ou profundidade escalonada de enterramento, é um parâmetro que relaciona a profundidade de enterramento da carga explosiva (comprimento do tampão ou altura de confinamento) com a quantidade de explosivo utilizada.

De forma simplificada, o SDoB pode ser entendido como uma medida relativa do nível de confinamento do sistema.

A ideia central é que não basta considerar apenas a profundidade absoluta em que o explosivo está posicionado. Essa profundidade precisa ser analisada em conjunto com a quantidade de energia que será liberada.

Assim, o SDoB estabelece uma relação entre:

- a profundidade ou espessura de material que confina o explosivo
- a quantidade de explosivo (ou energia) presente no sistema

Essa relação permite comparar diferentes condições de desmonte, mesmo quando há variações de escala, diâmetro de furo ou quantidade de carga.

Em termos conceituais, o SDoB responde à seguinte pergunta:

*o nível de confinamento é suficiente para a energia que está sendo liberada?*

Essa interpretação é muito mais importante do que a própria fórmula associada ao parâmetro, pois permite ao profissional avaliar, de forma crítica, o equilíbrio entre energia e confinamento, que é um dos fatores centrais no controle do flyrock.

## 6.3.3 Interpretação prática do conceito

Na prática, o SDoB pode ser interpretado como um indicador do grau de confinamento relativo do sistema.

Valores que indicam maior confinamento relativo estão associados a:

- maior retenção da energia
- maior tempo de interação entre gases e rocha
- melhor aproveitamento da energia na fragmentação
- menor tendência à ejeção de fragmentos

Por outro lado, valores que indicam baixo confinamento relativo estão associados a:

- liberação mais rápida da energia
- menor interação com o maciço
- maior dissipação em formas indesejadas
- maior probabilidade de flyrock

Essa interpretação permite ao profissional avaliar, de forma qualitativa e quantitativa, o comportamento esperado do desmonte.

É importante reforçar que o SDoB não define sozinho o resultado do desmonte, mas fornece uma referência importante sobre a tendência do sistema.

Ele deve sempre ser analisado em conjunto com outros fatores, como:

- condições geológicas
- qualidade do tamponamento
- distribuição da carga

- execução em campo

Ainda assim, o SDoB se destaca como uma das formas mais diretas de relacionar energia e confinamento em um único conceito.

## 6.3.4 Relação entre profundidade equivalente de enterramento, carga e geometria

O SDoB depende diretamente da interação entre três elementos principais:

- a profundidade de enterramento
- a quantidade de carga explosiva
- a geometria do sistema

A profundidade de enterramento representa a espessura de material que atua como barreira à expansão dos gases. Quanto maior essa espessura, maior tende a ser o confinamento.

A carga explosiva, por sua vez, define a quantidade de energia disponível no sistema. Quanto maior a carga, maior a pressão gerada e maior a tendência de expansão.

A geometria do desmonte influencia como essa energia é distribuída e como o confinamento se organiza no espaço. Elementos como afastamento, espaçamento, altura de bancada e posição da carga interferem diretamente no comportamento do sistema.

O conceito de profundidade equivalente de enterramento surge justamente da necessidade de integrar esses fatores.

Não se trata apenas de medir uma distância física, mas de interpretar essa distância em relação à energia presente no sistema.

Dessa forma:

- uma mesma profundidade pode representar alto confinamento para uma carga pequena
- ou baixo confinamento para uma carga maior

Essa relação é o que torna o SDoB um conceito escalonado, ou seja, ajustado à escala do problema.

Essa característica é fundamental para permitir comparações entre diferentes desmontes e para interpretar o comportamento do sistema de forma mais consistente.

## 6.3.5 Explicação simples do cálculo do SDoB

De forma geral, o Scaled Depth of Burial (SDoB) pode ser expresso pela seguinte relação:

$$SDoB = \frac{St}{\sqrt[3]{Q}}$$

Onde:
• **St** = profundidade de enterramento (m)

• **Q** = carga explosiva equivalente (kg)

Essa formulação representa a ideia central do conceito: **a profundidade de enterramento não deve ser analisada de forma isolada, mas sempre em relação à energia da carga explosiva**.

Um ponto importante é que o valor de **ST** não deve ser confundido automaticamente com a altura do tampão. A profundidade efetiva de enterramento deve representar a distância entre a superfície livre e a região da carga que efetivamente controla o comportamento de crateramento e projeção de material.

Por isso, de forma prática:

**ST ≈ altura de tampão + metade da carga equivalente**

Considerando que, nesta abordagem, a carga equivalente será associada a um comprimento da coluna explosiva de aproximadamente:

**Leq ≈ 10 · d**

Temos:

**ST = T + 0,5 · Leq**

Onde:

• **T** = altura de tampão (m)

• **Leq** = comprimento equivalente da carga explosiva (m)

• **d** = diâmetro do furo (m)

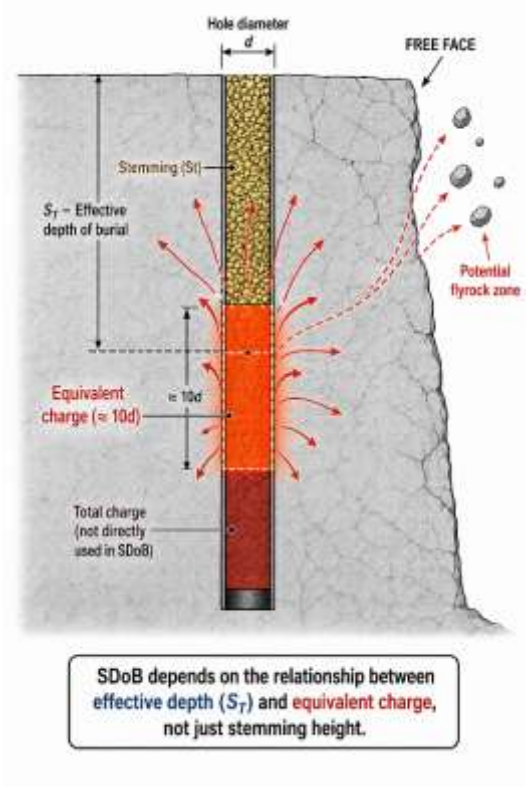
Como **Leq ≈ 10 · d**, também podemos escrever:

**ST = T + 0,5 · (10 · d)**

Ou, de forma simplificada:

**ST = T + 5d**

Essa expressão mostra que o SDoB não considera apenas a espessura do tampão, mas a profundidade até o centro da porção superior da carga explosiva que participa de forma mais direta do processo de crateramento e ejeção.




A carga explosiva, por sua vez, define a quantidade de energia disponível no sistema. Quanto maior a carga, maior a pressão gerada e maior a tendência de expansão.

O SDoB não utiliza necessariamente a carga total do furo, mas sim uma carga equivalente associada à região de crateramento / ejeção, definida como:

Q = carga correspondente a um comprimento equivalente da coluna explosiva

Assim:

$$Q = \rho \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} . Leq$$

Onde:

• **Q** = carga explosiva equivalente (kg)

• **ρ** = densidade do explosivo (kg/m³)

• **d** = diâmetro do furo (m)

• **Leq** = comprimento equivalente da carga (m), adotado como aproximadamente **10 · d**

Substituindo **Leq = 10d**, temos:

**Q = ρ · (π · d² / 4) · (10d)**

Em termos operacionais:

• furos maiores tendem a concentrar mais energia

• explosivos mais densos aumentam a energia por unidade de volume

• colunas maiores aumentam a energia total disponível

Como consequência:

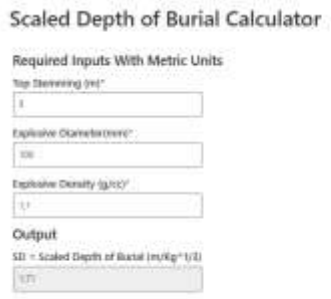
• para um mesmo tampão, aumentar o diâmetro ou a densidade reduz o SDoB

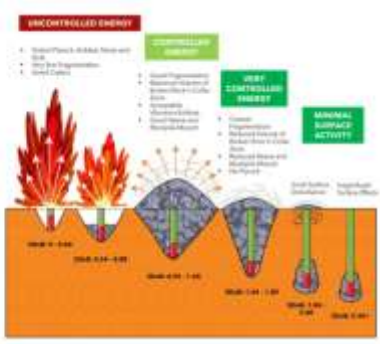
• isso indica menor confinamento relativo e maior risco de projeção

Essa interpretação aproxima o conceito do dia a dia da operação, permitindo uma leitura mais intuitiva do comportamento do desmonte.

Como mencionado diversas vezes, o objetivo do curso não é ensinar o aluno a calcular fórmulas gerais, mas antes trazer o entendimento sobre os conceitos que a envolvem e como representam o risco de flyrock. Mas vamos aproveitar e deixar aqui como referencia dois sites onde podem encontrar uma "Calculadora de SDoB" que podem usar facilmente no dia a dia como referência:

- https://ergindustrial.com/scaled-depth-of-burial/?srsltid=AfmBOoqBGktn0gNgnIEHTtt6uXIUlj2FoCyk6l8j5rDtQMJ_y8acifep
- https://blasting101.com/sdob/



Seguindo, é importante entender que a geometria do desmonte influencia como essa energia é distribuída e como o confinamento se organiza no espaço. Elementos como afastamento, espaçamento, altura de bancada e posição da carga interferem diretamente no comportamento do sistema, e isso não é claramente representado por essa formula, assim que ela deve servir como uma referencia inicial e não como a regra principal do jogo.

Vamos para alguns exemplos para entender os conceitos:

**Exemplo 1 – Cálculo do SDoB**

Considere:

• diâmetro do furo: d = 100 mm = 0,10 m

• altura de tampão: T = 3,0 m

• densidade do explosivo: $\rho = 1.100\ kg/m^3$

• comprimento equivalente: $Leq = 10 \cdot d = 1,0\ m$

Primeiro, calcula-se a profundidade efetiva:

$ST = T + 0,5 \cdot Leq$

$ST = 3,0 + 0,5 \cdot 1,0$

$ST = 3,5\ m$

Em seguida, calcula-se a carga equivalente:

$Q = \rho \cdot (\pi \cdot d^2 / 4) \cdot Leq$

$Q = 1.100 \cdot (\pi \cdot 0,10^2 / 4) \cdot 1,0$

$Q \approx 1.100 \cdot 0,00785 \cdot 1,0$

$Q \approx 8,64\ kg$

Agora, calcula-se o SDoB:

$SDoB = ST / \sqrt[3]{Q}$

$$SDoB = \frac{3,5}{\sqrt[3]{8,63}} = \frac{3,5}{2,05} = 1,71$$

Esse resultado indica um nível de confinamento relativo associado à carga equivalente considerada. Se o tampão fosse reduzido, ou se o diâmetro do furo fosse aumentado mantendo o mesmo tampão, o valor de SDoB tenderia a diminuir, indicando maior potencial de ejeção e maior risco de flyrock.

**Exemplo 2 – Aumento do diâmetro**

Agora considere:

• d = 115 mm → 0,115 m

• mesma densidade

• mesmo tampão

**Comprimento equivalente**

$L_eq = 10 \cdot 0,115 = 1,15$ m

**Carga equivalente**

$Q = 1100 \cdot (\pi \cdot 0,115^2 / 4) \cdot 1,15$

$Q \approx 1100 \cdot (0,0104) \cdot 1,15$

$Q \approx 13,15$ kg

**ST**

$ST = 3,0 + 0,5 \cdot 1,15$

$ST \approx 3,58$ m

**SDoB**

$$SDoB = \frac{3,58}{\sqrt[3]{13,15}} = \frac{3,58}{2,36} = 1,52$$

Mesmo com o mesmo tampão:

• o SDoB efetivo do furo B será menor (porque ele é dividido pela carga que é maior)

• o confinamento relativo será inferior (porque o SDoB é menor = indicando um menor confinamento)

• o risco de flyrock será maior (maior carga/energia + menor confinamento = maior risco de fuga da energia)

Esses exemplos reforçam um ponto fundamental:

O comportamento do desmonte não depende apenas da geometria ou apenas da carga, mas da relação entre ambos.

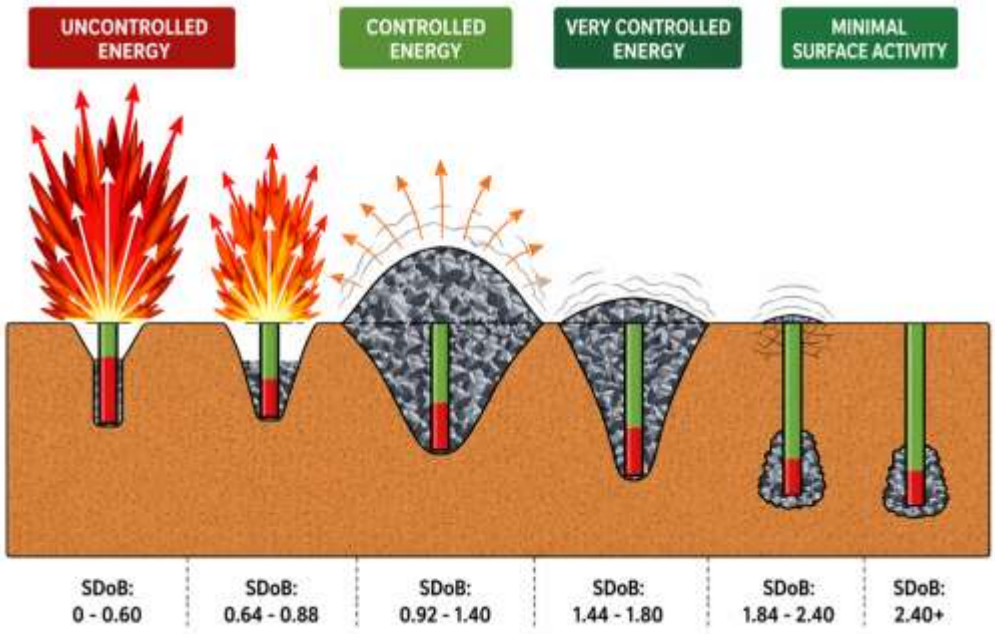
O SDoB surge exatamente como uma ferramenta para interpretar essa relação de forma integrada, permitindo avaliar o nível de confinamento de maneira mais consistente e comparável entre diferentes condições de desmonte.

Mais importante do que o valor exato é a leitura do conceito:

- maior carga para o mesmo confinamento → menor SDoB → maior risco
- maior confinamento para mesma carga → maior SDoB → menor risco

## 6.3.6 Interpretação do SDoB a partir do comportamento do desmonte

Uma forma extremamente útil de compreender o conceito de SDoB é por meio da interpretação visual do comportamento do desmonte em função de diferentes níveis de confinamento, conforme ilustrado na figura abaixo:




A figura representa as faixas principais consideradas para análise do SDoB, desde condições de baixo confinamento até níveis elevados de confinamento, permitindo associar diretamente os valores numéricos aos efeitos observados.

**SDoB muito baixo (≈ 0,0 – 0,6)**

Nessa faixa, o sistema apresenta **confinamento extremamente baixo**.

Características principais:

• liberação violenta de energia

• ocorrência intensa de flyrock

• elevada onda aérea e ruído

• formação de crateras

• fragmentação geralmente deficiente

Aqui, a energia não encontra resistência suficiente e é liberada de forma descontrolada, sendo a condição de maior risco.

**SDoB baixo a intermediário (≈ 0,64 – 0,88)**

Nessa condição, ainda há **baixo confinamento**, porém menos crítico.

Características:

• ainda há ocorrência de flyrock

• energia parcialmente controlada

• fragmentação começa a melhorar

• presença de cratering

O sistema ainda está desequilibrado, com tendência à ejeção de material.

**SDoB intermediário a ideal (≈ 0,92 – 1,4)**

Essa faixa representa a condição mais desejável na maioria dos desmontes.

Características:

• boa fragmentação

• deslocamento adequado do material

• formação de pilha eficiente

• níveis aceitáveis de vibração e onda aérea

• ausência ou mínima ocorrência de flyrock

Aqui ocorre o melhor equilíbrio entre energia e confinamento.

**SDoB elevado (≈ 1,84 – 2,40)**

Nessa condição, o confinamento já começa a ser elevado.

Características:

• mínima movimentação do material

• fragmentação mais grosseira

• menor eficiência do desmonte

• pouca ou nenhuma ocorrência de flyrock

A energia começa a ser "retida" pelo sistema.

**SDoB muito elevado (> 2,40)**

Aqui o sistema apresenta **confinamento excessivo**.

Características:

• movimentação superficial praticamente nula

• pouca fragmentação

• baixa eficiência do desmonte

• energia dissipada sem aproveitamento adequado

Nesse caso, o problema deixa de ser segurança e passa a ser desempenho.

**Síntese técnica do comportamento**

A figura reforça um conceito fundamental:

• SDoB baixo → excesso de energia liberada → maior risco de flyrock

• SDoB ideal → equilíbrio energia/confinamento → melhor desempenho

• SDoB alto → excesso de confinamento → baixa eficiência

Essa interpretação permite ao engenheiro:

• avaliar rapidamente o comportamento esperado do desmonte

• identificar condições de risco antes da detonação

• ajustar parâmetros como tampão, carga e geometria

• tomar decisões mais seguras e fundamentadas

Mais do que um parâmetro matemático, o SDoB passa a ser um **indicador direto do equilíbrio entre energia e confinamento**, permitindo interpretar, ajustar e controlar o desmonte com maior segurança e eficiência.

## 6.3.7 Diferença entre cálculo de SDoB e compreensão física do problema

Um dos erros mais comuns na aplicação do SDoB é tratá-lo apenas como um valor numérico a ser calculado e comparado com referências. Embora o cálculo seja importante, ele representa apenas uma parte do processo.

A verdadeira utilidade do SDoB está na sua interpretação física.

Utilizar o SDoB apenas como número pode levar a:

- aplicação mecânica de parâmetros
- falta de adaptação às condições reais de campo
- falsa sensação de controle

Por outro lado, compreender o SDoB como expressão do equilíbrio entre energia e confinamento permite:

- interpretar o comportamento do desmonte
- identificar situações de risco
- ajustar parâmetros de forma mais consciente
- antecipar tendências de liberação de energia

Essa diferença é fundamental dentro da filosofia deste curso. O objetivo não é apenas fornecer ferramentas de cálculo, mas desenvolver a capacidade de interpretar o sistema físico do desmonte.

Nesse contexto, o SDoB deve ser visto como:

*uma ferramenta para pensar o desmonte, e não apenas para calcular.*

# 6.4 Regimes de desmonte em função do confinamento

Após compreender o conceito de confinamento e a forma como o SDoB representa o equilíbrio entre energia e contenção, torna-se possível avançar para uma interpretação mais prática do comportamento do desmonte.

Uma das formas mais didáticas e eficientes de entender esse comportamento é organizar o sistema em regimes, definidos a partir da relação entre a energia disponível e a capacidade de confinamento.

Essa abordagem permite ao profissional interpretar rapidamente o que está acontecendo em campo e, principalmente, identificar tendências de risco.

O desmonte, sob essa ótica, não é apenas um conjunto de parâmetros isolados, mas um sistema que pode operar em diferentes condições de equilíbrio. Dependendo dessa relação entre energia e confinamento, o comportamento do desmonte muda de forma significativa.

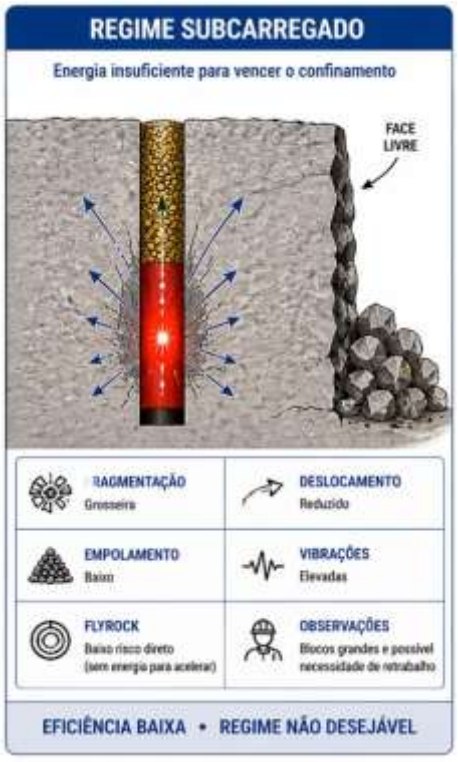
De maneira geral, podemos identificar três regimes principais:

- regime subcarregado
- regime ótimo
- regime sobrecarregado

Cada um desses regimes apresenta características próprias em termos de fragmentação, deslocamento, projeção e risco de flyrock.

## 6.4.1 Regime subcarregado

O regime subcarregado ocorre quando a energia disponível no sistema é insuficiente em relação ao nível de confinamento imposto pelo maciço rochoso.




Nessa condição:

- a energia não é capaz de vencer adequadamente a resistência do maciço
- o desenvolvimento de fraturas é limitado
- a fragmentação tende a ser grosseira
- o deslocamento da rocha é reduzido

Do ponto de vista físico, a energia permanece confinada por mais tempo, mas não é suficiente para produzir o trabalho necessário.

Como consequência, observa-se:

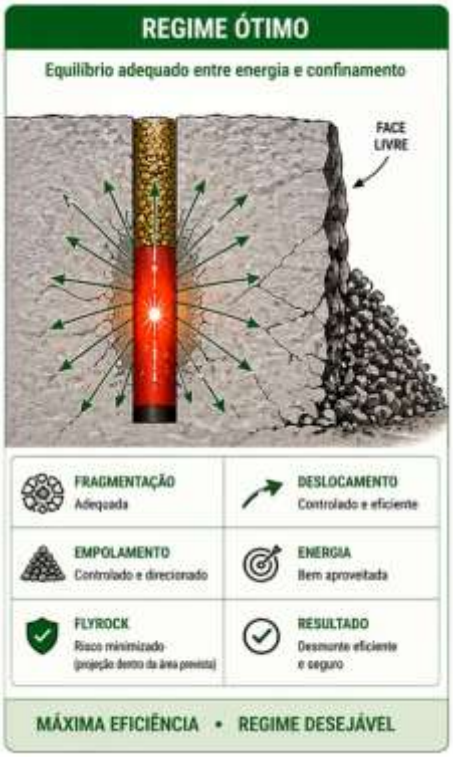
- baixo empolamento
- pouca movimentação da pilha
- presença de blocos grandes
- possível necessidade de retrabalho

Em relação ao flyrock, o regime subcarregado tende a apresentar baixo risco direto de ultralançamento, uma vez que não há energia suficiente para acelerar significativamente os fragmentos, mas também pode apresentar elavas vibrações, pois a energia confinada pode se propagar mais ao longo do maciço rochoso.

No entanto, é importante destacar que normalmente esse regime não é desejável, pois compromete a eficiência do desmonte e pode gerar problemas operacionais posteriores.

## 6.4.2 Regime ótimo

O regime ótimo ocorre quando há um equilíbrio adequado entre a energia disponível e a capacidade de confinamento do sistema.




Nessa condição:

- a energia é suficiente para promover a fragmentação
- o confinamento é capaz de reter e direcionar essa energia
- há bom desenvolvimento de fraturas
- o deslocamento ocorre de forma controlada

Esse é o cenário ideal do desmonte.

Os resultados típicos incluem:

- fragmentação adequada
- empolamento controlado e bem direcionado
- formação de pilha com geometria favorável
- melhor aproveitamento da energia

Do ponto de vista do controle, a energia é liberada de forma progressiva, permitindo que o sistema absorva e redistribua as tensões.

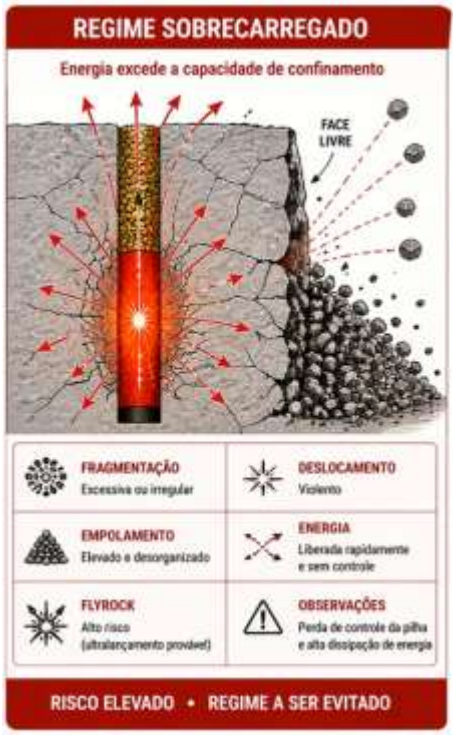
Em relação ao flyrock:

- o risco é minimizado
- a projeção de fragmentos permanece dentro da área prevista
- não há concentração significativa de energia em pontos específicos

Esse regime representa o objetivo do projeto de desmonte, onde eficiência e segurança estão alinhados.

## 6.4.3 Regime sobrecarregado

O regime sobrecarregado ocorre quando a energia disponível excede a capacidade de confinamento do sistema.




Nessa condição:

- a energia é maior do que a resistência oferecida pelo maciço
- ocorre ruptura prematura das zonas de confinamento
- a energia encontra caminhos de menor resistência
- há liberação rápida e descontrolada

Do ponto de vista físico, o sistema perde a capacidade de reter a energia por tempo suficiente, resultando em:

- fragmentação excessiva ou irregular
- deslocamento violento
- projeção significativa de material

Os efeitos típicos incluem:

- empolamento elevado e desorganizado
- lançamento excessivo de fragmentos

- perda de controle da pilha
- maior dissipação de energia em formas indesejadas

Em relação ao flyrock, esse é o regime mais crítico:

- há aumento significativo da probabilidade de ultralançamento
- fragmentos podem ser ejetados com alta velocidade
- a trajetória dos fragmentos torna-se mais imprevisível

Esse regime representa uma condição de risco elevado e deve ser evitado por meio de ajustes no projeto e na execução.

## 6.4.4 Comportamento típico de cada regime em relação a projeção, empolamento e flyrock

A compreensão dos regimes se torna ainda mais clara quando analisamos seus efeitos práticos no comportamento do desmonte.

**Tabela comparativa dos regimes de carregamento e comportamento do desmonte**

| Parâmetro | Regime Subcarregado | Regime Ótimo | Regime Sobrecarregado |
|---|---|---|---|
| **Projeção** | Limitada | Controlada e dentro da área prevista | Excessiva |
| **Empolamento** | Baixo | Adequado e bem direcionado | Elevado e desorganizado |
| **Fragmentação** | Grosseira | Equilibrada | Irregular ou excessiva |
| **Flyrock** | Baixa probabilidade | Risco reduzido | Alta probabilidade |

Essa comparação permite ao profissional interpretar rapidamente os resultados de uma detonação e identificar em qual regime o desmonte. Além disso, ela evidencia que o melhor desempenho do desmonte não está associado à maior quantidade de energia, mas sim ao equilíbrio adequado entre carga e confinamento. está operando. Mais do que uma classificação teórica, esses regimes funcionam como uma ferramenta prática de diagnóstico.

Ao observar o comportamento da pilha, da fragmentação e da projeção, é possível inferir se o sistema está:

- com energia insuficiente
- em equilíbrio
- ou com excesso de energia em relação ao confinamento

Fica evidente que o regime ótimo é aquele em que há equilíbrio entre eficiência e controle, enquanto os regimes subcarregado e sobrecarregado representam, cada um à sua forma, condições indesejadas.

Além disso, o regime sobrecarregado se destaca como o mais crítico do ponto de vista do flyrock, reforçando a importância do controle do confinamento como base da segurança no desmonte.

# 6.5 Relação direta entre confinamento, SDoB e flyrock

Após compreender o conceito de confinamento, o papel do SDoB e os diferentes regimes de desmonte, torna-se possível estabelecer de forma clara e aplicada a relação direta entre esses elementos e a geração do flyrock.

Este é um dos pontos mais importantes de todo o módulo, pois conecta os conceitos físicos com o comportamento real observado em campo.

O flyrock não deve ser interpretado apenas como consequência de falhas operacionais ou erros de execução. Na maioria dos casos, ele é resultado de uma condição física específica: o desequilíbrio entre a energia disponível e a capacidade de confinamento do sistema.

Quando esse equilíbrio é perdido, a energia deixa de ser utilizada de forma controlada e passa a se manifestar como ejeção de fragmentos.

O SDoB, nesse contexto, atua como uma ferramenta que permite interpretar esse equilíbrio e antecipar tendências de comportamento do desmonte.

## 6.5.1 Como a perda de confinamento favorece a ejeção

A ejeção de fragmentos está diretamente associada à perda, total ou parcial, do confinamento.

Quando o sistema consegue manter a energia contida:

- os gases de detonação permanecem atuando no interior do maciço
- há maior transferência de energia para fraturamento
- o deslocamento ocorre de forma distribuída

No entanto, quando ocorre perda de confinamento:

- a resistência ao redor do furo é reduzida ou rompida precocemente
- formam-se caminhos preferenciais para a fuga de energia
- os gases escapam de forma localizada e abrupta

Essa fuga localizada gera concentração de energia em determinados fragmentos, que passam a ser acelerados de forma significativa.

Nessas condições, a energia não é distribuída de forma uniforme. Em vez disso, ela se concentra e se direciona, favorecendo a ejeção de material.

Portanto, a perda de confinamento não apenas reduz a eficiência do desmonte, mas altera o modo como a energia é liberada, criando condições propícias para o flyrock.

## 6.5.2 Como o excesso de energia mal contida aumenta o risco de projeção

O risco de flyrock não está apenas associado à perda de confinamento, mas também à presença de energia em excesso em relação à capacidade de contenção do sistema.

Quando há mais energia do que o sistema consegue absorver:

- ocorre ruptura antecipada das zonas de confinamento
- a energia excedente não é dissipada por fraturamento
- há liberação rápida e concentrada

Essa condição é típica do regime sobrecarregado.

Nesses casos:

- o sistema entra em instabilidade

- a energia busca rotas de menor resistência
- fragmentos podem ser submetidos a acelerações elevadas

O resultado é:

- aumento da projeção de material
- maior variabilidade nas trajetórias
- aumento significativo do risco de flyrock

É importante destacar que não é apenas o excesso absoluto de energia que causa o problema, mas o excesso relativo ao confinamento disponível.

Isso reforça o princípio central do módulo:

*o problema não é apenas quanta energia existe, mas como ela se relaciona com a capacidade de contenção do sistema.*

## 6.5.3 Relação entre SDoB e mecanismos como cratering e rifling

O SDoB permite interpretar diretamente a tendência do sistema a desenvolver determinados mecanismos de liberação de energia.

Quando o confinamento relativo é baixo (baixo SDoB):

- a energia tende a se liberar rapidamente em direção à superfície
- ocorre formação de crateras (cratering)
- há ejeção vertical de material
- o risco de flyrock aumenta

O cratering é, portanto, uma manifestação clássica de baixo confinamento.

Outro mecanismo importante é o rifling, caracterizado pela ejeção de material ao longo do eixo do furo, muitas vezes associado a falhas no tamponamento ou à presença de caminhos preferenciais.

Nessas situações:

- os gases escapam de forma direcionada
- fragmentos são lançados com alta velocidade
- a trajetória tende a ser mais concentrada

O rifling representa uma forma ainda mais localizada de perda de confinamento.

Ambos os mecanismos estão diretamente relacionados ao desequilíbrio entre energia e contenção, e o SDoB atua como um indicador dessa condição.

## 6.5.4 SDoB e sensibilidade à qualidade do tampão

Não só o tamanho, mas a qualidade do tampão exerce influência direta sobre o confinamento e, consequentemente, sobre o comportamento do sistema.

O tampão funciona como uma das principais barreiras à fuga de energia pela parte superior do furo. Ele é como a tampa da panela de pressão, você quer que ele segure a pressão e só libere o suficiente para a panela não arrebentar toda.

Quando o tampão é bem executado:

- aumenta o confinamento

- prolonga o tempo de retenção da energia
- reduz a probabilidade de ejeção vertical

No entanto, quando o tampão apresenta falhas:

- o confinamento é reduzido localmente
- o sistema se torna mais sensível
- pequenas variações podem gerar grandes efeitos

Nesse contexto, o SDoB ajuda a interpretar essa sensibilidade.

Em condições de baixo confinamento relativo:

- o sistema já está próximo de um estado crítico
- falhas no tampão podem desencadear ejeção imediata

Por outro lado, em condições de maior confinamento relativo:

- o sistema possui maior capacidade de absorver variações
- o impacto de pequenas falhas tende a ser menor

Isso significa que o SDoB não apenas indica o nível de confinamento, mas também a robustez do sistema frente a imperfeições de execução.

# 6.6 Comportamento não linear do sistema

Após compreender a relação entre energia, confinamento e SDoB, bem como sua influência direta na geração do flyrock, é fundamental avançar para um aspecto que explica grande parte das dificuldades práticas no controle do desmonte: o comportamento não linear do sistema.

O desmonte de rochas com explosivos não responde de forma proporcional às variações dos seus parâmetros. Isso significa que pequenas mudanças nas condições do sistema podem produzir efeitos muito maiores do que o esperado.

Esse comportamento não linear é resultado da interação complexa entre:

- energia explosiva
- propriedades do maciço rochoso
- condições de confinamento
- variáveis operacionais

Ao contrário de sistemas simples, onde uma pequena variação gera uma pequena resposta, o desmonte pode apresentar mudanças abruptas de comportamento quando determinados limites são ultrapassados.

Compreender essa característica é essencial para o desenvolvimento de maturidade técnica, pois explica por que o controle do flyrock é desafiador e por que a experiência de campo é tão importante.

## 6.6.1 Pequenas variações que produzem grandes mudanças no resultado

Em um sistema não linear, o efeito não cresce de forma proporcional à causa.

No contexto do desmonte, isso significa que:

- uma pequena redução no afastamento pode não causar efeito perceptível em um caso
- mas pode desencadear projeção excessiva em outro

Isso ocorre porque o desmonte opera frequentemente próximo de limites de equilíbrio entre energia e confinamento.

Quando o sistema está próximo desse limite:

- pequenas variações podem deslocá-lo de um regime controlado para um regime instável
- o comportamento pode mudar de forma abrupta

Esse efeito é especialmente relevante na transição entre:

- regime ótimo
- regime sobrecarregado

onde pequenas alterações podem aumentar significativamente o risco de flyrock.

## 6.6.2 Sensibilidade do sistema a erros operacionais

O comportamento não linear torna o sistema altamente sensível a erros operacionais.

Na prática, isso significa que desvios aparentemente pequenos na execução podem ter impactos relevantes no resultado final.

Entre os principais exemplos, destacam-se:

- variações na altura do tampão
- carregamento irregular ao longo do furo

- presença de vazios ou falhas no tamponamento
- desvios na perfuração
- diferenças entre o projetado e o executado

Esses desvios, isoladamente, podem parecer pouco relevantes. No entanto, quando inseridos em um sistema já sensível, podem alterar significativamente o nível de confinamento local.

Essa alteração pode:

- reduzir a capacidade de contenção
- criar caminhos preferenciais para a fuga de energia
- concentrar energia em regiões específicas

O resultado é um aumento da variabilidade do desmonte e, em muitos casos, elevação do risco de flyrock.

### 6.6.3 Implicações desse comportamento para o controle do flyrock

O reconhecimento do comportamento não linear do sistema tem implicações diretas para o controle do flyrock.

Primeiramente, ele mostra que:

- não é possível confiar apenas em valores médios ou parâmetros nominais
- é necessário considerar a variabilidade e as incertezas do sistema

Em segundo lugar, ele reforça a importância de:

- execução rigorosa do plano de fogo
- controle de qualidade no carregamento e tamponamento
- monitoramento contínuo dos resultados

Além disso, esse comportamento justifica a adoção de uma abordagem conservadora.

Como pequenas variações podem gerar grandes consequências:

- é prudente trabalhar com margens de segurança
- evitar operar próximo de limites críticos
- considerar cenários desfavoráveis

Esse entendimento também ajuda a explicar por que o flyrock não pode ser totalmente eliminado, mas sim controlado em termos de probabilidade e consequência.

O sistema não permite previsões perfeitamente determinísticas, e o comportamento não linear é uma das principais razões para isso.

# 6.7 Leitura de campo do confinamento e do SDoB

Após o desenvolvimento dos conceitos de confinamento, SDoB e regimes de comportamento do desmonte, é fundamental dar um passo decisivo: transformar esse conhecimento em capacidade de leitura de campo.

A compreensão teórica só se torna completa quando o profissional consegue identificar, na prática, sinais que indicam o comportamento esperado do desmonte e, principalmente, antecipar situações de risco.

O confinamento e o SDoB não são apenas conceitos abstratos. Eles se manifestam diretamente nas condições observáveis em campo, tanto antes quanto após o disparo.

Um dos pontos mais importantes deste tópico é mostrar que muitos eventos de flyrock não surgem de forma inesperada. Em diversos casos, existem sinais prévios que indicam condição crítica, mas que passam despercebidos por falta de leitura técnica adequada.

Desenvolver essa capacidade de observação é essencial para a prevenção.

## 6.7.1 Análise de exemplos onde o confinamento inadequado foi determinante

Em diversas situações práticas, o flyrock está diretamente associado a condições evidentes de confinamento inadequado.

Alguns exemplos típicos incluem:

**Afastamento insuficiente ou irregular**

- furos muito próximos da face livre
- variações significativas na linha de frente
- presença de reentrâncias ou saliências na face

Nesses casos, a espessura de material que atua como confinamento lateral é reduzida, favorecendo a ruptura prematura e a projeção de fragmentos.

**Tamponamento deficiente**

- altura de tampão insuficiente
- uso de material inadequado
- presença de vazios ou má compactação

Essa condição reduz o confinamento superior, permitindo a fuga direta dos gases e favorecendo ejeções verticais.

**Maciço altamente fraturado ou alterado**

- presença de descontinuidades abertas
- zonas de fraqueza próximas à superfície
- blocos soltos ou instáveis

Essas características criam caminhos preferenciais para a fuga de energia, reduzindo o confinamento efetivo, mesmo quando a geometria do plano de fogo parece adequada.

**Distribuição irregular da carga**

- concentração excessiva de explosivo em determinadas regiões
- variações ao longo da coluna de carga

Isso pode gerar zonas localizadas de sobrecarga, levando a liberação concentrada de energia.

Em todos esses casos, o fator comum é a redução da capacidade do sistema de conter e redistribuir a energia, o que favorece diretamente a ocorrência de flyrock.

## 6.7.2 Relação entre SDoB e observações práticas de campo

O SDoB, quando bem compreendido, pode ser utilizado como uma ferramenta de leitura prática do desmonte.




Apesar do número não representar com exatidão o comportamento no desmonte, o conceito pode ser interpretado por meio de observações como:

- relação entre altura de tampão e comprimento de carga
- proporção entre afastamento e diâmetro do furo
- quantidade de explosivo em relação ao volume de rocha
- geometria geral do desmonte

Por exemplo:

- cargas elevadas com pouco confinamento visível indicam baixo SDoB relativo
- bom volume de material acima da carga e geometria adequada indicam maior confinamento relativo

Essa leitura permite ao profissional identificar tendências:

- sistema mais “contido” e estável
- ou sistema mais “sensível” e propenso à liberação rápida de energia

O SDoB, nesse contexto, deixa de ser apenas um cálculo e passa a ser uma forma de interpretar o comportamento esperado do desmonte.

## 6.7.3 Como interpretar sinais de condição crítica antes do disparo

Uma das habilidades mais importantes no controle do flyrock é a capacidade de identificar sinais de condição crítica antes da detonação.

Entre os principais sinais que devem chamar a atenção, destacam-se:

**Indícios geométricos**

- afastamento reduzido ou variável
- desalinhamento de furos
- irregularidades na face livre
- furos muito rasos em relação à carga

**Indícios relacionados ao tampão**

- altura insuficiente
- material inadequado
- ausência de compactação adequada
- presença de água ou contaminação

**Indícios geológicos**

- fraturas abertas próximas à superfície
- blocos soltos
- zonas de alteração ou baixa resistência
- presença de planos de fraqueza orientados para a face

**Indícios operacionais**

- carregamento fora do padrão
- variações não previstas no plano de fogo
- pressa na execução
- falta de controle de qualidade

Esses sinais indicam, de forma direta ou indireta, redução do confinamento ou aumento da energia relativa, ou seja, condições que aproximam o sistema de um regime crítico.

A identificação desses fatores antes do disparo permite:

- ajustes no plano de fogo
- correções na execução
- adoção de medidas preventivas

## 6.7.4 Valor da leitura técnica de campo para prevenção do flyrock

A leitura técnica de campo é uma das ferramentas mais importantes para o controle do flyrock.

Embora modelos, cálculos e parâmetros sejam fundamentais, o comportamento real do desmonte depende das condições específicas de cada situação.

A capacidade de interpretar o campo permite ao profissional:

- identificar desvios entre o planejado e o executado
- reconhecer sinais de risco antes da detonação
- tomar decisões mais seguras e fundamentadas
- ajustar parâmetros de forma consciente

Essa leitura se baseia na integração de:

- conhecimento técnico
- experiência prática
- observação sistemática

Além disso, ela reforça um dos princípios centrais do curso:

*o controle do flyrock não depende apenas de cálculo, mas da capacidade de interpretar o sistema real.*

Profissionais que desenvolvem essa habilidade conseguem antecipar problemas e atuar de forma preventiva, reduzindo significativamente a probabilidade de ocorrência de eventos indesejados.

# 6.8 Limitações do uso isolado do SDoB

Ao longo deste módulo, o SDoB foi apresentado como um dos conceitos mais importantes para interpretar a relação entre energia explosiva e confinamento. No entanto, para que esse conhecimento seja utilizado de forma correta e segura, é fundamental compreender também suas limitações.

Este tópico tem como objetivo evitar uma interpretação simplificada ou excessivamente determinística do SDoB. Embora seja uma ferramenta extremamente útil, ele não deve ser tratado como uma solução isolada ou como um critério absoluto para o controle do desmonte.

A maturidade técnica está justamente em reconhecer que, no contexto do desmonte de rochas, nenhum parâmetro isolado é capaz de descrever completamente o comportamento do sistema.

## 6.8.1 O valor do SDoB como conceito central

O SDoB ocupa uma posição central dentro da análise do desmonte porque permite relacionar, de forma direta, dois elementos fundamentais:

- a energia disponível
- a capacidade de confinamento

Essa relação fornece uma base consistente para interpretar o comportamento do sistema e identificar tendências de risco.

Quando bem utilizado, o SDoB permite:

- avaliar o nível de confinamento relativo
- comparar diferentes condições de desmonte
- antecipar possíveis desvios de comportamento
- orientar ajustes de projeto

Por esse motivo, ele deve ser reconhecido como uma ferramenta essencial dentro da engenharia de desmonte.

No entanto, sua importância não deve levar à interpretação de que ele é suficiente por si só.

## 6.8.2 Por que o SDoB não deve ser tratado como solução isolada

O principal risco no uso do SDoB é tratá-lo como um valor absoluto, capaz de determinar sozinho o comportamento do desmonte.

Essa abordagem pode levar a:

- aplicação mecânica de valores de referência
- desconsideração das condições reais de campo
- falsa sensação de segurança

Na prática, dois desmontes com valores semelhantes de SDoB podem apresentar comportamentos completamente diferentes.

Isso ocorre porque o SDoB, embora represente a relação entre energia e confinamento, não captura toda a complexidade do sistema.

O desmonte envolve múltiplos fatores interdependentes, e o comportamento final é resultado da interação entre esses fatores.

Portanto, o SDoB deve ser interpretado como:

*um indicador importante, mas não suficiente*

Ele ajuda a entender a tendência do sistema, mas não substitui a análise técnica completa.

## 6.8.3 Influência de variáveis adicionais além do SDoB

Diversas variáveis podem alterar significativamente o comportamento do desmonte, mesmo quando o SDoB indica uma condição aparentemente adequada.

Entre as principais, destacam-se:

**Geologia do maciço**

- presença de fraturas e descontinuidades
- variações de resistência
- zonas de alteração
- orientação de planos de fraqueza

Esses fatores influenciam diretamente a propagação da energia e a forma como a rocha se rompe.

**Qualidade do tampão**

- altura do tampão
- tipo de material utilizado
- grau de compactação
- presença de vazios

O tampão tem papel crítico no confinamento superior, e pequenas falhas podem comprometer o sistema.

**Execução do plano de fogo**

- variações no carregamento
- desvios na perfuração
- diferenças entre o projetado e o executado

Esses fatores introduzem variabilidade no sistema e podem alterar o comportamento esperado.

**Geometria real do desmonte**

- irregularidades na face livre
- variações no afastamento
- desalinhamento de furos

Mesmo pequenas irregularidades podem afetar o confinamento local.

Essas variáveis mostram que o comportamento do desmonte não depende apenas do SDoB, mas de um conjunto de fatores que interagem de forma complexa e, muitas vezes, não linear.

## 6.8.4 Uso técnico e crítico do conceito na prática

O uso adequado do SDoB exige uma abordagem técnica e crítica.

Isso significa que o profissional deve:

- utilizar o SDoB como referência inicial
- interpretar seu valor à luz das condições reais
- integrar essa informação com observações de campo

- considerar a variabilidade do sistema

O SDoB deve ser utilizado como parte de um processo de análise mais amplo, que envolve:

- conhecimento técnico
- experiência prática
- leitura de campo
- postura preventiva

Essa abordagem está alinhada com a filosofia do curso, que busca desenvolver a capacidade de interpretação e não apenas a aplicação de fórmulas.

# 6.9 Fechamento do módulo e preparação para os próximos temas

Ao longo deste módulo, foi desenvolvido um dos pilares mais importantes para a compreensão e o controle do flyrock: o papel do confinamento e sua relação direta com a energia explosiva.

Mais do que apresentar conceitos isolados, o objetivo foi construir uma visão integrada do desmonte como um sistema físico, no qual o comportamento da energia depende diretamente da capacidade de contenção imposta pelo maciço rochoso, pela geometria e pela execução.

Este fechamento tem como propósito consolidar os principais aprendizados e preparar o aluno para a próxima etapa do curso, onde o fenômeno será organizado em termos de causas práticas.

## 6.9.1 Síntese do papel do confinamento e do SDoB

O confinamento foi apresentado como o elemento central que governa o comportamento da energia no desmonte.

Ele não atua reduzindo a energia, mas controlando:

- o tempo de interação entre gases e rocha
- a forma como a energia é distribuída
- o modo como o sistema responde à detonação

Quando o confinamento é adequado:

- a energia é utilizada de forma eficiente
- a fragmentação é favorecida
- o deslocamento é controlado
- o risco de flyrock é reduzido

Por outro lado, quando o confinamento é insuficiente ou falha:

- a energia encontra caminhos de fuga
- ocorre liberação rápida e localizada
- fragmentos podem ser ejetados
- o risco de flyrock aumenta

Dentro desse contexto, o SDoB foi apresentado como uma ferramenta fundamental para interpretar essa relação.

Mais do que um parâmetro de cálculo, ele representa:

- o nível de confinamento relativo
- o equilíbrio entre energia e contenção
- a tendência de comportamento do sistema

O SDoB permite conectar geometria, carga e confinamento em um único conceito, funcionando como uma chave interpretativa para o desmonte.

## 6.9.2 O que o aluno deve ter entendido ao final do módulo

Ao concluir este módulo, o aluno deve ter consolidado alguns princípios fundamentais:

- O flyrock não é aleatório: Ele resulta, na maioria dos casos, de um desequilíbrio entre energia e confinamento.
- O problema central não é apenas a quantidade de energia: Mas a relação entre essa energia e a capacidade do sistema de contê-la e direcioná-la.
- O confinamento é a base do controle físico do desmonte: Sem confinamento adequado, não há controle consistente da energia.
- O SDoB é uma ferramenta de interpretação: Ele ajuda a entender o comportamento do sistema, mas não substitui a análise técnica completa.
- O desmonte opera em diferentes regimes: Subcarregado, ótimo e sobrecarregado, cada um com respostas físicas distintas.
- O sistema é não linear: Pequenas variações podem gerar grandes mudanças no resultado.
- A leitura de campo é essencial: Muitos sinais de risco estão presentes antes do disparo e podem ser identificados por um profissional preparado.

Esses pontos representam a base conceitual necessária para avançar na compreensão do flyrock de forma mais aplicada.

# Módulo 7. Causas do Flyrock

## 7.1 Abertura do módulo e causas principais de flyrock

Após o desenvolvimento do Módulo 6, foi possível compreender que o flyrock não é um fenômeno aleatório, mas sim resultado direto de um desequilíbrio físico entre energia e confinamento. Esse entendimento representa um avanço importante, pois desloca a análise do campo da percepção empírica para uma base técnica estruturada.

No entanto, compreender o fenômeno do ponto de vista físico, embora essencial, não é suficiente para atuar de forma eficaz na prevenção.

Na prática operacional, o profissional não trabalha diretamente com conceitos como energia e confinamento de forma abstrata. Ele lida com:

- parâmetros de projeto,
- condições reais do maciço,
- execução em campo,
- decisões operacionais,
- e limitações humanas e organizacionais.

Dessa forma, o próximo passo natural no desenvolvimento do curso é traduzir essa base física em causas práticas de campo. Este é o objetivo central do Módulo 7.

Ao longo deste módulo, o flyrock será analisado não apenas como um fenômeno físico, mas como o resultado de condições específicas que podem ser identificadas, organizadas e controladas. A proposta é estruturar essas condições em categorias claras, permitindo ao profissional interpretar situações reais com maior precisão.

É importante destacar que, na maioria dos casos, o flyrock não surge de um único fator isolado. Ele é, frequentemente, consequência da combinação de múltiplas variáveis que, juntas, levam o sistema a uma condição crítica.

Essas variáveis podem estar associadas a:

- decisões de projeto,
- desvios operacionais,
- características geológicas,
- ou ao fator humano.

Cada uma dessas dimensões influencia diretamente o equilíbrio entre energia e confinamento, que foi estabelecido no módulo anterior como o núcleo do problema.

Assim, este módulo não abandona a base física já construída. Pelo contrário, ele a utiliza como referência para interpretar as causas. A partir desse ponto, o aluno deve começar a enxergar que:

- um afastamento inadequado representa redução de confinamento,
- um tampão mal executado cria caminhos de fuga para a energia,
- uma geologia fraturada reduz a resistência do sistema,
- uma falha operacional pode deslocar o sistema para um regime crítico.

Ou seja, as causas práticas são, na realidade, manifestações concretas do desequilíbrio físico estudado anteriormente. Outro ponto fundamental que será desenvolvido ao longo deste módulo é que o sistema de desmonte deve ser interpretado como um sistema integrado.

Isso significa que:

- diferentes fatores interagem entre si,

- pequenas falhas podem se somar,
- e o resultado final é frequentemente não linear.

Essa visão é essencial para evitar interpretações simplistas e análises de causa única, que não representam adequadamente a realidade do campo.

## 7.1.1 Relação entre o Módulo 6 e o Módulo 7

O Módulo 6 estabeleceu a base física do problema, mostrando que o comportamento do desmonte é governado pelo equilíbrio entre energia e confinamento, interpretado por meio do SDoB. Já o Módulo 7 tem como função transformar essa base em leitura prática.

Enquanto o módulo anterior respondeu à pergunta:

- como o flyrock acontece?

Este módulo passa a responder:

- por que ele acontece nas situações reais de campo ou quais são as situações típicas que ele acontece?

Essa transição é essencial para que o conhecimento deixe de ser apenas conceitual e passe a ser aplicado.

## 7.1.2 Organização das causas em categorias práticas

Para facilitar a análise e a aplicação em campo, as causas do flyrock serão organizadas em quatro grandes grupos:

- causas de projeto
- causas operacionais
- causas geológicas
- fator humano




Essa organização não é apenas didática, mas funcional. Ela permite ao profissional:

- estruturar análises de eventos,
- identificar pontos críticos,
- direcionar ações corretivas,
- e atuar de forma preventiva.

Além disso, essa divisão ajuda a entender que o problema pode surgir em diferentes etapas do processo, desde o planejamento até a execução.

## 7.1.3 O flyrock como resultado de causalidade combinada

Um dos conceitos mais importantes que será desenvolvido neste módulo é o de causalidade combinada. Na prática, raramente o flyrock é causado por um único fator isolado.

O mais comum é observar situações como:

- projeto com baixa margem de segurança associado a geologia desfavorável,
- execução com desvios sobre um plano de fogo pouco robusto,
- pequenas falhas acumuladas que levam o sistema a uma condição crítica.

Esse entendimento é fundamental para evitar análises simplistas e para desenvolver uma visão mais completa do problema.

O flyrock, portanto, deve ser interpretado como o resultado de um sistema que perdeu o equilíbrio, e não como consequência de um único erro pontual.

## 7.1.4 Papel do profissional na identificação e prevenção das causas

Ao longo deste módulo, será reforçado que o controle do flyrock depende diretamente da capacidade do profissional de:

- identificar condições críticas,
- interpretar sinais de risco,
- compreender a interação entre variáveis,
- e tomar decisões adequadas em campo.

Isso exige:

- conhecimento técnico,
- experiência prática,
- atenção aos detalhes,
- e postura preventiva.

Mais do que aplicar regras, o profissional precisa desenvolver a capacidade de leitura do sistema, entendendo que o flyrock:

- não é aleatório,
- não é monocausal,
- e não pode ser explicado por um único parâmetro.

Ele é resultado da interação entre múltiplos fatores que afetam o equilíbrio entre energia e confinamento. Nos próximos tópicos, essas causas serão analisadas de forma estruturada, iniciando pelas causas de projeto, onde muitas das condições críticas têm origem.

# 7.2 Causas de projeto

Após compreender, na abertura do módulo, que o flyrock é resultado da interação entre múltiplos fatores, torna-se necessário iniciar a análise pelas causas que estão na origem do sistema: as decisões de projeto.

O projeto de desmonte não deve ser entendido apenas como um conjunto de parâmetros definidos em escritório, mas como a etapa onde se estabelece, de forma antecipada, como a energia explosiva será:

- posicionada no maciço,
- confinada pelas condições geométricas,
- distribuída ao longo do desmonte,
- e liberada no tempo e no espaço.

Isso significa que o projeto define, em grande parte, o comportamento físico do sistema.

Quando bem elaborado, ele cria condições para que a energia seja utilizada de forma eficiente e controlada. No entanto, quando apresenta desequilíbrios ou inconsistências, pode introduzir, desde o início, condições favoráveis ao desenvolvimento do flyrock.

As causas de projeto são particularmente críticas porque muitas vezes passam despercebidas. Diferentemente dos erros operacionais, que são visíveis em campo, os problemas de projeto podem estar incorporados ao desmonte de forma estrutural.

Nesse contexto, ao longo dos próximos subitens serão abordados alguns dos principais parâmetros de projeto mais frequentemente associados à ocorrência de flyrock, como afastamento, tampão, carga explosiva, diâmetro dos furos, sequenciamento e distribuição de energia. Esses fatores não esgotam todas as possibilidades, mas representam as condições mais comuns observadas na prática. A análise individual de cada um deles permitirá compreender como decisões aparentemente simples de projeto podem influenciar diretamente o equilíbrio entre energia e confinamento e, consequentemente, o comportamento do desmonte.

## 7.2.1 Afastamento inadequado

O afastamento é um dos parâmetros mais importantes do desmonte, pois representa a principal barreira de contenção frontal da energia.




Quando o afastamento é insuficiente:

- a espessura de material entre o furo e a face livre é reduzida,
- a ruptura da face ocorre de forma prematura,
- o confinamento frontal é perdido rapidamente,
- a energia encontra um caminho facilitado de escape.

Nessas condições, a energia não é devidamente utilizada para fragmentação, sendo majoritariamente convertida em projeção de material. Esse cenário é uma das causas mais clássicas de flyrock, especialmente associado a ejeções direcionadas para a frente da bancada.

Por outro lado, afastamento excessivo também pode gerar problemas.

Quando o afastamento é elevado:

- há maior resistência à ruptura frontal inicial,

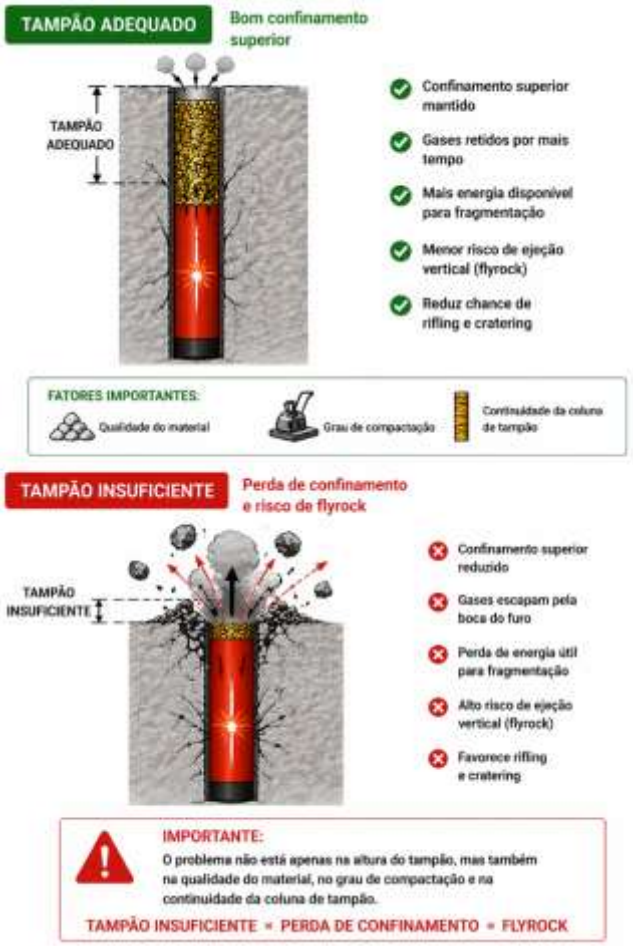
- a energia pode não ser suficiente para promover a fragmentação adequada,
- ocorre acúmulo de energia no sistema e possíveis redirecionamentos da energia,
- o comportamento do desmonte torna-se irregular.

Esse desequilíbrio pode resultar em liberação tardia e desorganizada da energia, criando condições para projeções verticais inesperadas.

Assim, o problema não está apenas em valores baixos ou altos, mas na inadequação do afastamento em relação à carga e à geometria do sistema.

## 7.2.2 Tampão insuficiente

Complementando a função do afastamento, o tampão é o principal elemento de confinamento na parte superior do furo. Sua função é impedir a fuga direta dos gases gerados pela detonação, aumentando o tempo de retenção da energia no interior do maciço.




Quando o tampão é insuficiente ou de má qualidade:

- o confinamento superior é reduzido,
- os gases escapam precocemente pela boca do furo,
- ocorre perda de energia útil para fragmentação,
- aumenta a probabilidade de ejeção vertical de fragmentos.

Essa condição favorece mecanismos como o rifling e o cratering, que estão diretamente associados ao flyrock.

É importante destacar que o problema não está apenas na altura do tampão, mas também:

- na qualidade do material utilizado,
- no grau de compactação,
- e na continuidade da coluna de tampão.

Mesmo quando o projeto prevê um tampão adequado, sua definição incorreta pode introduzir uma condição crítica desde a fase de planejamento.

## 7.2.3 Carga excessiva

A quantidade de explosivo utilizada no desmonte deve estar compatível com a capacidade de confinamento do sistema.

Quando há carga excessiva:

- a energia disponível supera a capacidade de contenção,
- a pressão interna do sistema se eleva,
- ocorre ruptura prematura das zonas de confinamento,
- a energia passa a ser liberada de forma descontrolada.

Esse cenário caracteriza um deslocamento do sistema para um regime sobrecarregado, conforme discutido no módulo anterior.

O excesso de carga pode ocorrer de diferentes formas:

- carga elevada por furo,
- aumento da carga na coluna explosiva,
- alta razão de carga por volume de rocha,

Independentemente da forma, o efeito é o mesmo: aumento do risco de flyrock devido à incapacidade do sistema de conter a energia disponível.

## 7.2.4 Diâmetro do furo e sua influência

O diâmetro do furo influencia diretamente a quantidade de explosivo que pode ser inserida e, consequentemente, a energia liberada.

Furos de maior diâmetro:

- permitem maior volume de carga,
- geram maiores pressões,
- aumentam a intensidade da interação com o maciço,
- exigem maior confinamento para manter o controle do sistema.

Se o aumento do diâmetro não for acompanhado por ajustes adequados em:

- afastamento,
- espaçamento,
- tampão,
- e distribuição de carga,

o sistema pode se tornar mais sensível e propenso a instabilidades.

Além disso, furos maiores tendem a amplificar os efeitos de pequenas variações, reforçando o comportamento não linear do sistema. Portanto, o diâmetro do furo deve ser definido de forma integrada com os demais parâmetros do plano de fogo.

## 7.2.5 Sequenciamento e atraso entre furos e linhas

O sequenciamento de detonação define a forma como a energia é liberada no tempo e como o desmonte evolui.

Uma temporização adequada permite:

- criação progressiva de faces livres,
- redução do confinamento de forma controlada,
- melhor direcionamento do deslocamento,
- menor superposição de efeitos.

Por outro lado, uma temporização inadequada pode:

- manter confinamento excessivo em determinados momentos,
- gerar superposição de ondas de energia,
- alterar a direção de deslocamento da rocha,

- criar condições de liberação abrupta de energia.

Isso pode resultar em:

- aumento da projeção de fragmentos,
- comportamento irregular do desmonte,
- maior variabilidade e imprevisibilidade.

O sequenciamento, portanto, não é apenas um detalhe operacional, mas um elemento central na gestão do confinamento dinâmico do sistema.

## 7.2.6 Distribuição de energia no plano de fogo

Um erro comum na análise de desmontes é considerar apenas a quantidade total de explosivo utilizada.

Na prática, o comportamento do desmonte depende muito mais de como essa energia está distribuída no sistema.

Distribuições inadequadas podem gerar:

- zonas localizadas de excesso de energia,
- regiões com baixo confinamento relativo,
- desbalanceamento entre diferentes partes do desmonte,
- respostas desiguais ao longo da bancada.

Isso pode ocorrer, por exemplo, quando:

- há concentração de carga em determinados furos,
- a distribuição da coluna explosiva não é uniforme,
- existem diferenças significativas entre linhas ou setores,
- o plano de fogo não considera variações do maciço.

Essas condições criam pontos críticos onde a energia pode ser liberada de forma descontrolada, favorecendo a ocorrência de flyrock.

Quando esses elementos são definidos de forma inadequada, o sistema pode nascer com baixa robustez, tornando-se mais sensível a variações e mais propenso a instabilidades.

Esse entendimento reforça um ponto fundamental:

*muitos eventos de flyrock começam antes mesmo da execução, na forma como o desmonte é concebido.*

# 7.3 Causas operacionais

Após analisar as principais causas de projeto, é fundamental avançar para um dos pontos mais críticos do desmonte: a execução em campo.

Mesmo quando o projeto é tecnicamente consistente, o comportamento real do desmonte depende diretamente de como esse projeto é executado. O campo não apenas reproduz o planejamento, mas frequentemente introduz variações que podem alterar significativamente o equilíbrio entre energia e confinamento.

Este tópico tem como objetivo mostrar que muitos eventos de flyrock não decorrem necessariamente de erros de concepção, mas de desvios operacionais que modificam, local ou globalmente, as condições previstas.

Na prática, a execução pode introduzir:

- variações geométricas não previstas,
- alterações na quantidade e distribuição da carga,
- perda localizada de confinamento,
- diferenças entre o projetado e o executado,
- e situações críticas que não foram antecipadas.

Essas variações, muitas vezes consideradas pequenas, podem ser amplificadas pelo comportamento não linear do sistema, deslocando o desmonte para condições mais instáveis. Assim, o controle operacional deve ser entendido como parte essencial do controle do flyrock.

## 7.3.1 Desvios de perfuração

Os desvios de perfuração estão entre as causas operacionais mais frequentes e mais impactantes no comportamento do desmonte.




Esses desvios podem ocorrer em:

- inclinação,
- direção,
- posição,
- profundidade do furo.

Quando isso acontece, há alteração direta de parâmetros fundamentais como:

- afastamento,
- espaçamento,
- subperfuração,
- posição relativa da carga.

Por exemplo:

- um furo inclinado em direção à face reduz o afastamento real,
- um furo mais profundo aumenta a coluna de carga efetiva,
- um desvio lateral altera o espaçamento entre furos.

Essas alterações podem comprometer o confinamento local e gerar zonas de desequilíbrio no sistema. Como consequência:

- a geometria do plano de fogo é alterada,

- a distribuição da energia torna-se irregular,
- surgem pontos de menor resistência,
- aumenta a probabilidade de liberação descontrolada da energia.

Esses desvios mostram que a geometria real do desmonte pode ser significativamente diferente da geometria projetada.

## 7.3.2 Falhas no carregamento

O carregamento dos furos é uma etapa crítica que influencia diretamente a distribuição da energia.

Falhas nessa etapa podem incluir:

- quantidade incorreta de explosivo,
- distribuição irregular da carga ao longo do furo,
- ausência de controle sobre a coluna explosiva,
- mistura inadequada de materiais.

Essas falhas podem gerar:

- concentração de energia em determinados pontos,
- zonas com baixa ou alta carga relativa,
- comportamento irregular do desmonte.

Além disso, a falta de controle de qualidade no carregamento dificulta a previsibilidade do sistema, aumentando a variabilidade dos resultados.

Como consequência, o sistema pode apresentar regiões localizadas de sobrecarga ou baixo confinamento, favorecendo a ocorrência de flyrock.

## 7.3.3 Erros no tamponamento

Erros no tamponamento são mais comuns do que se imaginam, pois apesar de ser um parâmetro critico relacionado ao confinamento, a maioria dos profissionais não dá a importância devida na sua execução por achar o que o principal é o carregamento com os explosivos.

Um dos erros bastante comuns é a formação de “pontes/vazios” dentro do tampão, impedindo que o material preencha adequadamente todo o espaço do furo.

Nessas situações:

- formam-se vazios internos no tampão,
- o confinamento superior é comprometido,
- os gases encontram caminhos preferenciais de fuga.

Outros erros comuns são a penetração do material do tampão dentro do explosivo, a utilização de material inadequado para o tampão, tampão inadequado em furos com muita água, etc. Nessas situações, embora externamente o tampão possa parecer adequado, internamente ele não cumpre sua função de vedação do furo, tendo baixa eficiência e afetando não só o resultado do desmonte, mas aumentando os riscos de flyrock.

Isso torna o sistema particularmente perigoso, pois:

- cria uma falsa sensação de segurança,
- reduz significativamente a eficiência do confinamento,
- favorece ejeções verticais ou inclinadas.

A execução do tampão é um exemplo claro de como pequenas falhas operacionais podem não ser facilmente identificadas e assim gerar grandes consequências.

## 7.3.4 Problemas gerais de execução no campo

Além dos pontos específicos, existem diversas situações operacionais que podem contribuir para a ocorrência de flyrock.

Entre elas, destacam-se:

- improvisações durante a execução,
- ausência de conferência dos parâmetros,
- mudanças não registradas no plano de fogo,
- falhas na limpeza dos furos,
- presença de água não considerada,
- uso inadequado de materiais,
- falta de padronização nos procedimentos.




Essas situações introduzem variabilidade no sistema e reduzem sua previsibilidade. Quando combinadas com outras condições desfavoráveis, podem levar o desmonte a uma condição crítica.

Essas alterações, muitas vezes locais e aparentemente pequenas, podem ser amplificadas pelo comportamento não linear do sistema, aumentando o risco de flyrock.

Esse entendimento reforça um ponto fundamental:

*o campo não apenas executa o projeto, ele redefine o comportamento real do sistema.*

# 7.4 Causas geológicas

Após analisar as causas de projeto e operacionais, é fundamental incorporar um terceiro elemento que exerce influência decisiva no comportamento do desmonte: a geologia do maciço rochoso.

Diferentemente do projeto e da execução, que podem ser controlados diretamente pelo profissional, a geologia representa uma condição natural, muitas vezes variável e parcialmente desconhecida, que pode alterar profundamente a resposta do sistema.

Este tópico tem como objetivo mostrar que o maciço rochoso não é um meio homogêneo e passivo. Pelo contrário, ele responde à detonação de forma ativa, influenciando:

- a resistência local à ação da energia,
- a forma como as tensões se propagam,
- a abertura e o fechamento de fraturas,
- a retenção ou fuga dos gases,
- e a estabilidade do confinamento natural.

Assim, muitos eventos de flyrock não decorrem exclusivamente de erro humano ou falha de projeto, mas de condições geológicas que reduzem o confinamento efetivo e criam caminhos preferenciais para a liberação da energia. A capacidade de reconhecer, interpretar e compensar essas condições é essencial para o controle do fenômeno.

## 7.4.1 Fraturas

As fraturas são uma das principais características que influenciam o comportamento do maciço durante o desmonte.

Quando presentes, elas:

- reduzem a integridade estrutural da rocha,
- facilitam a propagação das tensões,
- criam planos de fraqueza,
- e funcionam como caminhos preferenciais para a fuga de gases.




Em maciços altamente fraturados:

- o confinamento efetivo é reduzido, mesmo que a geometria do desmonte esteja adequada,
- a energia pode se dissipar de forma irregular,
- há maior variabilidade no comportamento do desmonte.

Além disso, fraturas abertas próximas à superfície aumentam significativamente o risco de ejeção de fragmentos, pois facilitam a liberação rápida da energia.

## 7.4.2 Falhas

As falhas geológicas representam zonas de descontinuidade mais significativas, que podem alterar de forma marcante o comportamento do sistema.

Essas estruturas:

- introduzem assimetrias no maciço,
- modificam a resistência local,
- influenciam a direção de propagação das tensões,
- e podem concentrar ou dissipar energia de forma diferenciada.




Quando um desmonte intercepta uma falha:

- o comportamento pode se tornar imprevisível,
- a resposta do maciço pode variar entre regiões próximas,
- e o confinamento pode ser reduzido localmente.

Essas condições favorecem a ocorrência de respostas desiguais, com possibilidade de projeção de material em direções não previstas.

## 7.4.3 Cavidades

A presença de cavidades, sejam naturais ou induzidas, representa uma condição crítica para o confinamento.

Esses vazios:

- reduzem drasticamente a resistência local,
- interrompem a continuidade do maciço,
- e desorganizam a distribuição da energia.




Quando a energia explosiva interage com uma cavidade:

- parte da energia pode ser dissipada no vazio,
- outra parte pode ser liberada de forma abrupta,
- e o comportamento do sistema se torna altamente irregular.

Além disso, cavidades podem não ser identificadas previamente, aumentando o grau de incerteza do desmonte.

Essa condição está diretamente associada ao aumento do risco de flyrock, especialmente em regiões onde o confinamento já é limitado.

## 7.4.4 Mudanças abruptas de litologia

A transição entre diferentes tipos de rocha é outro fator importante.

Quando há mudanças abruptas de litologia:

- diferentes materiais respondem de forma distinta à detonação,
- a propagação das tensões se torna irregular,
- a fragmentação ocorre de maneira desigual,



- e o confinamento varia ao longo do desmonte.

Por exemplo:

- uma rocha mais resistente pode manter maior confinamento,
- enquanto uma rocha mais fraca pode romper prematuramente.

Essa diferença cria desequilíbrios no sistema, podendo gerar:

- liberação localizada de energia,
- variações no deslocamento da rocha,
- e aumento da probabilidade de projeção.

## 7.4.5 Zonas alteradas, com preenchimento e descontinuidades

Maciços alterados ou com presença de preenchimento apresentam características particularmente desafiadoras.

Nessas condições:

- a rocha pode ter baixa resistência,
- a presença de vazios é mais frequente,
- a continuidade do maciço é reduzida,
- e o comportamento torna-se altamente variável.




Esses fatores resultam em:

- baixa capacidade de confinamento,
- elevada imprevisibilidade,
- maior sensibilidade a pequenas variações operacionais.

O sistema, nesses casos, tende a operar próximo de condições críticas, aumentando o risco de flyrock.

## 7.4.6 Água e zonas de fraqueza

A presença de água no maciço pode influenciar o desmonte de diversas formas.

A água pode:

- reduzir a resistência da rocha,
- alterar o comportamento das fraturas,
- interferir na qualidade do tampão,
- afetar a estabilidade da coluna explosiva.




Além disso:

- zonas saturadas podem apresentar menor capacidade de contenção,
- a interação entre explosivo e água pode modificar a liberação de energia,

- e a presença de lama ou material fino pode comprometer o confinamento.

Essas condições aumentam a complexidade do sistema e exigem maior atenção na interpretação do comportamento do desmonte.

As causas geológicas mostram que o maciço rochoso desempenha um papel ativo e determinante no comportamento do desmonte. Esse entendimento reforça um ponto fundamental:

*o maciço não é um meio passivo, ele responde, condiciona e pode redefinir o resultado do desmonte.*

No próximo tópico, avançaremos para o fator humano, analisando como decisões, comunicação e disciplina operacional influenciam diretamente a ocorrência do flyrock.

# 7.5 Fator humano

Após analisar as causas de projeto, operacionais e geológicas, torna-se evidente que existe um elemento transversal que conecta todas essas dimensões: o fator humano.

O desmonte de rochas com explosivos não é apenas um processo técnico, mas também um processo organizacional e decisório. Mesmo quando os parâmetros estão corretamente definidos e as condições geológicas são conhecidas, o comportamento do sistema depende diretamente de como as pessoas interpretam, executam e controlam cada etapa.

Este tópico tem como objetivo mostrar que o fator humano não é um elemento secundário, mas parte central do sistema causal do flyrock.




Na prática, o fator humano atua em todas as fases do desmonte:

- na preparação do trabalho,
- na conferência das condições reais,
- na leitura de anomalias,
- na comunicação entre equipes,
- no registro de informações,
- e, principalmente, na decisão de corrigir ou seguir adiante.

Dessa forma, o flyrock pode surgir não apenas por falhas técnicas, mas por falhas na forma como o sistema é conduzido.

## 7.5.1 Disciplina operacional

A disciplina operacional é a base para a execução consistente do desmonte. Ela envolve:

- cumprimento rigoroso de procedimentos,
- padronização das atividades,
- atenção aos detalhes,
- repetibilidade das operações.



Essa perda de controle operacional aumenta a probabilidade de criação de condições críticas, favorecendo o flyrock.

## 7.5.2 Comunicação entre perfuração e desmonte

A integração entre as equipes de perfuração e desmonte é fundamental para o controle do sistema.

A perfuração é a etapa que primeiro interage com o maciço e, portanto, é responsável por gerar informações importantes sobre:

- condições geológicas reais,
- presença de fraturas ou vazios,
- variações de material,
- dificuldades encontradas durante a execução.

Quando essa informação não é corretamente comunicada:

- o carregamento é realizado com base em premissas incorretas,
- condições críticas deixam de ser consideradas,
- o projeto não é ajustado à realidade do campo.




Essa falta de comunicação cria um descolamento entre o que foi planejado e o que está sendo executado, aumentando o risco de comportamento inesperado.

## 7.5.3 Registros mal feitos

O registro adequado das informações de campo é essencial para a gestão do desmonte. Registros confiáveis permitem:

- acompanhar o histórico das operações,
- identificar padrões de comportamento,
- corrigir desvios recorrentes,
- melhorar continuamente o processo.




Quando os registros são falhos:

- informações importantes são perdidas,
- a análise de eventos fica comprometida,

- decisões passam a ser baseadas em suposições,
- erros tendem a se repetir.

A ausência de dados consistentes dificulta a prevenção do flyrock, pois impede a compreensão completa das causas.

## 7.5.4 Interpretação inadequada de anomalias

A leitura de campo é uma habilidade essencial, mas depende da capacidade de interpretação. Nem toda anomalia é evidente, e nem todo sinal é corretamente compreendido.

Entre as situações mais comuns, destacam-se:

- subestimação de condições geológicas adversas,
- interpretação incorreta de desvios de perfuração,
- desconsideração de sinais de baixo confinamento,
- confiança excessiva em parâmetros de projeto.

Quando as anomalias são mal interpretadas:

- o risco não é reconhecido,
- decisões inadequadas são tomadas,
- o sistema pode evoluir para uma condição instável.




Esse tipo de falha é particularmente crítico, pois ocorre mesmo quando os sinais estão presentes.

## 7.5.5 Ausência de correções em campo

Identificar uma anomalia e não agir sobre ela é uma das situações mais críticas no desmonte.

Na prática, é comum observar:

- furos fora de posição que não são corrigidos,
- variações de afastamento que são ignoradas,
- tampões inadequados que não são refeitos,
- presença de água ou vazios sem ajuste de carregamento.

Essas situações representam desvios conhecidos que poderiam ser corrigidos antes do disparo.

Quando não há ação corretiva:

- o sistema segue operando em condição crítica,
- o risco deixa de ser potencial e passa a ser real,

- a probabilidade de flyrock aumenta significativamente.




Esse ponto reforça que a prevenção não depende apenas de identificar problemas, mas de agir sobre eles.

No próximo tópico, será desenvolvido o conceito de causalidade combinada, consolidando a ideia de que o flyrock normalmente resulta da interação entre diferentes fatores e não de uma única causa isolada.

# 7.6 Causalidade combinada

Após a análise das causas de projeto, operacionais, geológicas e do fator humano, torna-se possível consolidar uma das ideias mais importantes de todo o módulo: o flyrock raramente é resultado de uma única variável isolada.

Na prática, o fenômeno deve ser entendido como consequência de um sistema que perdeu o equilíbrio. Esse desequilíbrio, na maioria das vezes, não é provocado por um único fator dominante, mas pela combinação de diferentes condições que, juntas, levam o sistema a um estado crítico.

Este tópico tem como função integrar todos os conteúdos anteriores e apresentar o flyrock como um problema de natureza sistêmica.

Ao longo deste desenvolvimento, será reforçado que:

- um projeto que opera próximo do limite pode se tornar crítico quando encontra geologia desfavorável,
- uma condição geológica adversa pode ser compensada por uma boa leitura de campo e ajustes operacionais,
- pequenos desvios, quando somados, podem produzir efeitos significativos,
- e o evento final geralmente é resultado de um encadeamento causal.

Essa visão é essencial para evitar interpretações simplistas e para desenvolver uma abordagem mais madura e eficaz na prevenção.

## 7.6.1 Por que o flyrock raramente decorre de uma única variável

A análise monocausal, ou seja, a tentativa de atribuir o flyrock a um único fator, é uma simplificação que raramente representa a realidade.

Em muitos casos, após um evento, observa-se a tendência de buscar uma causa isolada, como:

- afastamento insuficiente,
- falha no tampão,
- erro de carregamento.




Embora esses fatores possam estar presentes, eles geralmente não explicam, sozinhos, o comportamento observado. Na prática:

- o afastamento pode estar reduzido, mas dentro de uma margem tolerável,
- o tampão pode ter pequenas falhas, mas não críticas isoladamente,
- o carregamento pode apresentar variações, mas não extremas.

No entanto, quando esses fatores ocorrem simultaneamente:

- suas influências se somam,
- o confinamento é reduzido de forma mais significativa,
- o sistema perde robustez,
- e o risco de flyrock aumenta de forma expressiva.

Isso mostra que a análise monocausal tende a subestimar a complexidade do sistema.

## 7.6.2 Combinação entre projeto, geologia e execução

O comportamento do desmonte é resultado da interação entre três grandes eixos:

- projeto,
- geologia,
- execução.




O projeto define as condições iniciais do sistema.

A geologia estabelece as condições reais do meio onde o sistema atua.

A execução determina como essas condições são efetivamente materializadas em campo.

Quando esses três elementos estão alinhados:

- o sistema tende a operar de forma estável,
- a energia é melhor controlada,
- o risco de flyrock é reduzido.

No entanto, quando há desalinhamento:

- um projeto limítrofe pode se tornar crítico em uma geologia desfavorável,
- uma execução com desvios pode comprometer um projeto adequado,
- uma geologia complexa pode exigir ajustes que não foram realizados.

Essa interação mostra que o comportamento do sistema não depende de um único fator, mas do conjunto.

## 7.6.3 Conceito de falha sistêmica

A partir dessa visão integrada, é possível introduzir o conceito de falha sistêmica. Uma falha sistêmica ocorre quando:

- diferentes componentes do sistema apresentam pequenas deficiências,
- essas deficiências não são necessariamente críticas isoladamente,
- mas sua combinação leva a um resultado indesejado.




No contexto do flyrock, isso pode ocorrer, por exemplo, quando:

- o projeto apresenta baixa margem de segurança,
- a geologia reduz o confinamento efetivo,

- a execução introduz pequenas variações adicionais,
- e o fator humano não identifica ou não corrige essas condições.

O resultado final é um sistema que perde a capacidade de controlar a energia, levando à ejeção de fragmentos.

Esse conceito é fundamental porque desloca o foco da análise:

*de um erro isolado para o funcionamento do sistema como um todo.*

## 7.6.4 Valor da análise integrada para prevenção

A prevenção do flyrock exige uma abordagem integrada.

Isso significa que o profissional deve:

- considerar simultaneamente projeto, geologia e execução,
- avaliar como esses fatores interagem,
- identificar combinações de risco,
- e atuar de forma preventiva em múltiplas frentes.

Essa abordagem envolve:

- leitura crítica do plano de fogo,
- interpretação das condições do maciço,
- controle rigoroso da execução,
- comunicação eficiente entre equipes,
- e tomada de decisão consciente.

Além disso, exige a capacidade de reconhecer que:

- pequenas falhas não devem ser ignoradas,
- desvios devem ser corrigidos,
- e condições críticas devem ser tratadas com cautela.

A análise integrada permite antecipar problemas antes que eles se manifestem, reduzindo significativamente a probabilidade de ocorrência de flyrock. Esse entendimento é essencial para o desenvolvimento de uma abordagem mais completa e eficaz na prevenção do flyrock.

# 7.7 Fechamento do tema

Ao longo deste módulo, foi desenvolvido um dos aspectos mais importantes para a compreensão prática do flyrock: a identificação e organização das suas causas.

Partindo da base física construída nos módulos anteriores, especialmente do entendimento de que o fenômeno está diretamente associado ao desequilíbrio entre energia e confinamento, foi possível traduzir esse conceito em condições reais observadas no campo.

O flyrock deixou de ser tratado apenas como um efeito do desmonte e passou a ser compreendido como resultado de um conjunto de fatores que atuam sobre o sistema.

Foram analisadas, de forma estruturada, quatro dimensões principais:

- as causas de projeto, que definem as condições iniciais do sistema,
- as causas operacionais, que representam a execução real do desmonte,
- as causas geológicas, que refletem o comportamento do maciço rochoso,
- e o fator humano, que conecta e influencia todas as etapas do processo.




A partir dessa organização, tornou-se possível compreender que o flyrock raramente é resultado de um único erro ou falha isolada.

Na maioria dos casos, ele surge da combinação de fatores que, individualmente, podem parecer pouco significativos, mas que, quando associados, levam o sistema a uma condição crítica.

Esse entendimento reforça alguns pontos fundamentais:

- o problema não está apenas nos parâmetros isolados, mas na forma como eles interagem,
- o comportamento do desmonte depende da integração entre projeto, geologia e execução,
- e o controle do flyrock exige visão sistêmica e abordagem preventiva.

Também foi possível perceber que muitas condições de risco estão presentes antes mesmo do disparo, seja na forma como o desmonte foi projetado, seja nas condições reais encontradas em campo.

Isso reforça a importância da:

- leitura técnica,
- conferência das condições reais,

- comunicação entre equipes,
- e tomada de decisão consciente.

Outro ponto central consolidado neste módulo é que o flyrock não deve ser analisado de forma simplista.

A busca por uma única causa tende a limitar a compreensão do problema. Em vez disso, é necessário desenvolver a capacidade de interpretar o sistema como um todo, identificando combinações de fatores que levam à perda de controle da energia.

Essa abordagem representa um avanço importante na maturidade técnica do profissional, pois permite atuar não apenas de forma corretiva, mas principalmente preventiva.

## 7.7.1 O que o aluno deve ter consolidado

Ao final deste módulo, o aluno deve ter desenvolvido uma visão clara de que:

- O flyrock é resultado de um sistema
- Ele não ocorre de forma isolada, mas como consequência da interação entre múltiplos fatores.
- As causas podem ser organizadas
- Projeto, operação, geologia e fator humano formam uma estrutura clara para análise.
- O sistema é sensível e não linear
- Pequenas variações podem gerar grandes consequências.
- A análise deve ser integrada
- Nenhum fator isolado explica completamente o fenômeno.
- A prevenção exige ação antecipada
- Identificar e corrigir condições críticas antes do disparo é fundamental.

Até aqui, o aluno percorreu uma trajetória que envolveu:

- compreensão do fenômeno,
- análise dos mecanismos,
- entendimento da física do sistema,
- e identificação das causas práticas.

Esse conjunto de conhecimentos estabelece uma base sólida para avançar nos próximos temas, que irão aprofundar:

- a análise de risco,
- os métodos de controle,
- e as estratégias de prevenção do flyrock.

A partir deste ponto, o foco deixa de ser apenas entender o problema e passa a ser atuar de forma estruturada para controlá-lo. Ao organizar as causas do flyrock de forma estruturada, ele permite ao profissional enxergar o desmonte como um sistema integrado, onde diferentes variáveis interagem e influenciam o resultado final.

Esse entendimento é essencial para desenvolver uma abordagem técnica mais completa, baseada em:

- análise crítica,
- leitura de campo,
- e tomada de decisão consciente.

Com essa base consolidada, o aluno estará preparado para avançar para os próximos módulos com maior clareza, segurança e capacidade de atuação no controle do flyrock.

# Módulo 8. Controle e Mitigação do Flyrock

## 8.1 Abertura do módulo e lógica do controle do flyrock

Após o desenvolvimento do Módulo 7, foi possível compreender que o flyrock é resultado de um conjunto de causas que atuam de forma combinada sobre o sistema de desmonte. Essas causas, organizadas em projeto, operação, geologia e fator humano, mostraram que o fenômeno não é aleatório, mas sim consequência de condições específicas que levam ao desequilíbrio entre energia e confinamento.

A partir desse entendimento, surge a próxima etapa natural do curso: estabelecer como controlar esse fenômeno na prática.

Este módulo marca uma transição importante. Se anteriormente o foco foi compreender **por que o flyrock acontece**, agora o objetivo passa a ser entender **como evitar que ele aconteça ou como reduzir seus efeitos quando não for possível eliminá-lo completamente**.

O ponto central deste tópico é deixar claro que o controle do flyrock não ocorre no momento da detonação. Ele é construído antes, ao longo de todo o processo de preparação do desmonte.

Controlar o flyrock significa, essencialmente:

- controlar a forma como a energia é introduzida no sistema,
- controlar o nível e a qualidade do confinamento,
- e controlar a variabilidade entre o que foi planejado e o que será executado.

Esses três elementos, quando bem gerenciados, reduzem significativamente a probabilidade de ocorrência de projeções indesejadas. Outro ponto fundamental é compreender que o controle eficaz é predominantemente preventivo.

A tentativa de controlar o flyrock apenas por medidas reativas, aplicadas no momento final ou após a identificação de risco iminente, tende a ser limitada e, muitas vezes, insuficiente.

Da mesma forma, é importante destacar que medidas de mitigação não substituem um projeto adequado e uma execução controlada. Elas devem ser vistas como uma camada adicional de segurança, e não como a principal estratégia de controle.

Ao longo deste módulo, será desenvolvida a ideia de que o controle do flyrock deve ser construído em camadas, envolvendo:

- decisões de engenharia,
- controle operacional,
- práticas preventivas,
- e medidas mitigadoras quando necessário.

Essa abordagem multicamada é essencial para lidar com a complexidade e a variabilidade do sistema.

### 8.1.1 Relação entre causas e medidas de controle

As causas do flyrock analisadas no módulo anterior fornecem a base para a definição das estratégias de controle. Cada causa identificada aponta diretamente para uma necessidade específica de ação.

Por exemplo:

- um afastamento inadequado indica a necessidade de ajuste geométrico,
- falhas no tampão indicam necessidade de controle de tampão,
- desvios de perfuração indicam necessidade de QA/QC mais rigoroso,
- condições geológicas críticas indicam necessidade de adaptação do projeto e da execução.

Essa relação mostra que o controle do flyrock não é genérico, mas direcionado. Ou seja, controlar o fenômeno exige entender suas causas e atuar sobre elas de forma específica e consciente.

## 8.1.2 Controle como processo anterior ao disparo

Um dos conceitos mais importantes deste módulo é que a maior parte do controle do flyrock ocorre antes da detonação.

Isso inclui:

- definição dos parâmetros do plano de fogo,
- análise das condições do maciço,
- execução da perfuração,
- carregamento dos furos,
- verificação do tampão,
- e conferência das condições reais do desmonte.

Quando essas etapas são bem executadas:

- o sistema tende a operar de forma mais estável,
- a energia é melhor controlada,
- e o risco de flyrock é reduzido.

Por outro lado, quando essas etapas apresentam falhas:

- o sistema pode entrar em condição crítica antes mesmo do disparo,
- e nenhuma ação posterior será capaz de corrigir completamente o problema.

Isso reforça a ideia de que a detonação não é o momento de controle, mas o resultado de um processo já definido.




## 8.1.3 Diferença entre prevenção, mitigação e contenção

Para uma compreensão adequada do controle do flyrock, é importante diferenciar três conceitos que frequentemente são tratados como equivalentes, mas que possuem funções distintas.

A **prevenção** atua na origem do problema. Seu objetivo é evitar que o sistema atinja condições críticas. Isso envolve:

- ajuste de projeto,
- controle de execução,
- eliminação de mecanismos de ejeção.




A **mitigação** atua quando o risco não pode ser completamente eliminado. Seu objetivo é reduzir as consequências caso ocorra projeção. Isso pode incluir:

- uso de barreiras,
- ajustes operacionais em áreas sensíveis,
- redução da energia aplicada.

A **contenção** está relacionada à tentativa de limitar fisicamente a projeção de fragmentos, muitas vezes por meio de dispositivos ou soluções específicas, como uso de mantas de cobertura ou abafamento com material fino.

Esses três níveis devem ser entendidos como complementares, mas com prioridades distintas. A prevenção deve sempre ser a primeira linha de atuação.




O controle do flyrock não depende de uma única medida, mas da integração de diferentes elementos que atuam de forma conjunta. Isso envolve:

- engenharia de projeto,
- execução em campo,
- leitura técnica das condições reais,
- comunicação entre equipes,
- e tomada de decisão.

No próximo tópico, avançaremos para o controle de projeto, analisando como as decisões de engenharia podem reduzir significativamente a probabilidade de ocorrência de flyrock desde a concepção do desmonte.

# 8.2 Controle de projeto

Após compreender que o controle do flyrock é construído antes da detonação, o próximo passo é analisar a primeira e mais importante camada desse controle: o projeto do desmonte.

O projeto não deve ser entendido apenas como uma definição inicial de parâmetros, mas como a estrutura que determina como a energia será introduzida, confinada e distribuída no sistema. É nesse momento que se estabelece a base física do comportamento do desmonte.

Um projeto bem elaborado cria um sistema robusto, capaz de:

- manter o equilíbrio entre energia e confinamento,
- direcionar o deslocamento da rocha,
- reduzir a sensibilidade a variações de campo,
- e absorver pequenas incertezas operacionais.

Por outro lado, um projeto mal ajustado pode introduzir fragilidade desde o início, tornando o sistema mais suscetível a instabilidades e aumentando significativamente o risco de flyrock.

Dessa forma, o controle de projeto atua diretamente sobre:

- a geometria do desmonte,
- o nível de confinamento,
- a quantidade e distribuição da carga,
- a sensibilidade do sistema,
- e sua capacidade de responder à variabilidade real do campo.




Ao longo deste tópico, será desenvolvido o entendimento de que a prevenção do flyrock começa no projeto, e que decisões bem fundamentadas nesta etapa reduzem drasticamente a necessidade de medidas corretivas posteriores.

## 8.2.1 Definição correta de afastamento e espaçamento

O afastamento e o espaçamento são os principais parâmetros geométricos que controlam a distribuição da energia no desmonte.

O afastamento define a espessura de material que atua como contenção frontal da energia, enquanto o espaçamento define a interação entre os furos e a uniformidade da distribuição dessa energia.

Quando corretamente definidos:

- o confinamento frontal é adequado,
- a energia é distribuída de forma equilibrada,
- a fragmentação ocorre de maneira mais homogênea,
- o deslocamento da rocha é direcionado de forma controlada.




Além disso, a relação entre afastamento e espaçamento deve ser coerente com:

- o diâmetro do furo,
- o tipo de explosivo,
- as características do maciço.

Essa coerência é essencial para garantir o equilíbrio do sistema.

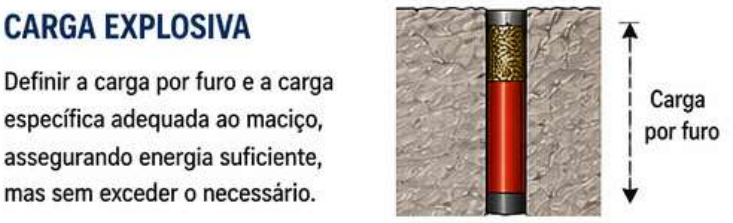
## 8.2.2 Ajuste da coluna explosiva

A coluna explosiva representa a forma como a energia está distribuída ao longo do furo.

Seu ajuste adequado é fundamental para garantir que a energia esteja compatível com o confinamento disponível em cada região do desmonte.

Um bom ajuste considera:

- a altura da bancada,
- a posição da face livre,
- a qualidade do maciço,
- e a geometria geral do plano de fogo.




Quando a coluna explosiva é bem definida:

- a energia é distribuída de forma controlada,
- evita-se concentração excessiva em regiões críticas,
- melhora-se o aproveitamento da energia para fragmentação.

Por outro lado, quando há excesso de carga ou distribuição inadequada:

- ocorre aumento da pressão interna do sistema,
- o confinamento pode ser superado,
- a energia tende a ser liberada de forma descontrolada,
- aumenta o risco de flyrock.

Assim, o ajuste da coluna explosiva é uma ferramenta direta de controle do equilíbrio entre energia e confinamento.

## 8.2.3 Escolha adequada do explosivo

O tipo de explosivo utilizado influencia diretamente o comportamento do desmonte.

Diferentes explosivos apresentam características distintas, como:

- densidade,
- velocidade de detonação,
- energia disponível,
- sensibilidade,
- comportamento em presença de água.

A escolha adequada deve considerar:

- as condições do maciço,
- a geometria do desmonte,
- o nível de confinamento disponível,
- e os objetivos do desmonte.

Explosivos com maior energia ou maior pressão de detonação podem:

- aumentar a eficiência da fragmentação,
- mas também elevar o risco de sobrecarga se o confinamento não for suficiente.

Portanto, a escolha do explosivo deve ser feita de forma integrada com os demais parâmetros do projeto.

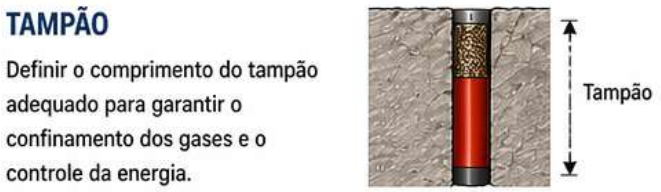
## 8.2.4 Definição do tampão

O tampão é o principal elemento de confinamento na parte superior do furo.

Sua função é reter os gases gerados pela detonação, aumentando o tempo de interação da energia com o maciço.

Uma definição adequada do tampão envolve:

- altura suficiente,
- escolha correta do material,
- compatibilidade com o diâmetro do furo,
- e consideração das condições do maciço.




| Quando bem definido: | Quando mal definido: |
|---|---|
| o confinamento superior é mantido, | ocorre fuga precoce de gases, |
| a energia é melhor aproveitada, | o sistema perde confinamento, |
| reduz-se a probabilidade de ejeção vertical de fragmentos. | aumenta o risco de mecanismos como rifling e cratering. |

Assim, o tampão deve ser tratado como um elemento essencial do projeto, e não apenas como um detalhe operacional.

## 8.2.5 Controle geométrico do plano de fogo

O controle geométrico do plano de fogo envolve a coerência entre todos os elementos que compõem o desmonte.

Isso inclui:

- posição da face livre,
- alinhamento dos furos,
- profundidade e inclinação,
- relação entre afastamento e espaçamento,

- altura de bancada,
- distribuição espacial da carga.

Quando essa geometria é consistente:

- o sistema apresenta comportamento mais previsível,
- a energia é distribuída de forma equilibrada,
- o confinamento é mantido de forma uniforme.

Por outro lado, inconsistências geométricas podem gerar:

- zonas de baixo confinamento,
- variações locais de energia,
- comportamento irregular do desmonte,
- aumento do risco de flyrock.

O controle geométrico é, portanto, essencial para garantir que o sistema funcione como um conjunto integrado.

Quando bem definidos, esses elementos constroem um sistema robusto, capaz de operar de forma estável e previsível. Quando mal ajustados, introduzem fragilidade desde a origem, aumentando a sensibilidade do sistema e o risco de projeção de fragmentos.



# 8.3 Controle operacional

Após estabelecer que o projeto representa a primeira linha de defesa contra o flyrock, é fundamental compreender que sua eficácia depende diretamente da qualidade da execução em campo.

O plano de fogo define como o sistema deveria se comportar. No entanto, é a operação que determina como o sistema realmente irá se comportar.

Esse é um ponto crítico do desmonte:

*a diferença entre o planejado e o executado.*

O controle operacional tem justamente a função de reduzir essa diferença, garantindo que:

- os parâmetros definidos no projeto sejam efetivamente respeitados,
- desvios sejam identificados e corrigidos,
- condições reais sejam verificadas antes da detonação,
- e decisões sejam tomadas com base em dados confiáveis.

Sem controle operacional, mesmo um projeto tecnicamente adequado pode evoluir para uma condição crítica, aumentando o risco de flyrock.

Dessa forma, o controle operacional atua diretamente sobre:

- a conformidade entre planejado e executado,
- a correção de desvios,
- a verificação de parâmetros críticos,
- a rastreabilidade das atividades,
- e a decisão consciente sobre continuar ou interromper o processo.

Ao longo deste tópico, será desenvolvido o entendimento de que o campo não apenas executa o projeto, mas válida e, quando necessário, ajusta o comportamento do sistema.

## 8.3.1 QA/QC em perfuração

A perfuração é a etapa que define a geometria real do desmonte.

Qualquer desvio nessa fase impacta diretamente o equilíbrio de todo o sistema e, consequentemente, a distribuição da energia.

O controle de qualidade em perfuração deve verificar:

- posicionamento dos furos,
- alinhamento,
- profundidade real,
- inclinação,
- e presença de desvios significativos.

| Quando o QA/QC é bem executado: | Quando não há controle: |
|---|---|
| a geometria do plano de fogo é preservada, | o desmonte passa a operar com uma geometria desconhecida, |
| o sistema mantém coerência com o projeto, | surgem regiões críticas não previstas, |
| o risco de zonas de baixo confinamento é reduzido. | e a probabilidade de flyrock aumenta significativamente. |

## 8.3.2 Conferência da coluna explosiva

A altura real da coluna explosiva é um dos parâmetros mais críticos do desmonte.

Ela define:

- a quantidade de energia efetivamente presente no furo,
- a posição da carga em relação à face livre,
- e a altura disponível para o tampão.




A conferência da coluna explosiva permite:

- verificar se a carga está conforme o planejado,
- identificar excessos ou deficiências de explosivo,
- garantir que o tampão terá altura adequada.

Pequenas variações nesse parâmetro podem:

- reduzir significativamente o confinamento,
- alterar o regime do desmonte,
    - aumentar a probabilidade de ejeção.

Por isso, essa verificação deve ser tratada como um ponto de controle crítico.

## 8.3.3 Medição e verificação do tampão

O tampão é um dos principais elementos de confinamento do sistema.

No entanto, sua eficácia depende não apenas da definição em projeto, mas da sua execução real.

O controle operacional deve garantir:

- que a altura do tampão seja medida,
- que o material utilizado seja adequado,
- que não existam vazios ou falhas na coluna de tampão,
- que não houve contaminação da coluna de explosivos pelo material do tampão.

Falhas no tampão são uma das causas mais frequentes de perda de confinamento e, consequentemente, de flyrock.

## 8.3.4 Procedimentos para furos críticos

Nem todos os furos apresentam as mesmas condições.

Durante a execução, é comum identificar furos com características críticas, como:

- presença de água,
- vazios ou cavidades,
- desvios de perfuração,
- proximidade excessiva da face,

- instabilidade do material.

Esses furos não devem ser tratados de forma padrão. O controle operacional deve prever procedimentos específicos, como:

- ajuste da carga,
- alteração do tampão,
- uso de materiais diferenciados,
- ou até exclusão do furo, quando necessário.

Ignorar essas condições significa permitir que o sistema opere em regime não controlado.

## 8.3.5 Revisão da face e da crista antes do carregamento

A face livre e a crista representam elementos fundamentais do confinamento do sistema.

Antes do carregamento, é essencial realizar uma leitura técnica dessas regiões, avaliando:

- estabilidade da face,
- presença de fraturas ou blocos soltos,
- irregularidades geométricas,
- alterações em relação ao projeto.




Essa análise permite:

- identificar zonas de baixo confinamento,
- ajustar o carregamento conforme a condição real,
- prevenir mecanismos de ejeção associados à ruptura prematura.

A ausência dessa verificação pode fazer com que o desmonte seja executado com base em uma geometria que já não corresponde à realidade.

## 8.3.6 Logs e rastreabilidade

O registro das atividades realizadas em campo é uma ferramenta essencial para o controle operacional.




Logs confiáveis permitem:

- documentar o que foi executado,
- identificar desvios em relação ao projeto,
- analisar eventos após o disparo,
- e promover melhoria contínua.

A rastreabilidade envolve:

- registro de perfuração,
- dados de carregamento,
- condições dos furos,

- ajustes realizados,
- e decisões tomadas em campo.

Sem esses registros:

- o controle perde consistência,
- a análise de falhas fica comprometida,
- e o aprendizado operacional é limitado.

O controle operacional é o elemento que transforma o projeto em prática segura. É a combinação entre planejamento e execução disciplinada que permite manter o equilíbrio entre energia e confinamento.

# 8.4 Medidas preventivas

Após compreender o papel do projeto e da execução no controle do flyrock, é possível avançar para um conjunto de práticas cujo foco principal é atuar antes que o sistema atinja uma condição crítica.

As medidas preventivas representam a essência do controle do flyrock. Elas não atuam sobre as consequências, mas sobre as condições que levam à geração do fenômeno.

Prevenir significa intervir no sistema de forma antecipada, buscando:

- remover ou reduzir causas,
- diminuir a sensibilidade do desmonte,
- aumentar o nível de confinamento,
- eliminar ou dificultar rotas de fuga de energia,
- e construir um sistema mais robusto frente às variabilidades do campo.




Esse ponto é fundamental:

*quanto mais cedo se atua, maior é a eficiência do controle.*

Em muitos casos, medidas preventivas são simples em conceito, mas altamente eficazes quando aplicadas com critério técnico e consistência operacional.




Ao longo deste tópico, será desenvolvido o entendimento de que a prevenção é a forma mais eficiente e confiável de reduzir o risco de flyrock.

## 8.4.1 Eliminação de mecanismos críticos

Os mecanismos de geração de flyrock, como cratering e rifling, estão diretamente associados a condições de baixo confinamento ou excesso de energia mal contida. A prevenção começa pela identificação dessas condições antes do disparo.




Entre os principais pontos a observar, destacam-se:

- carga excessiva em relação ao afastamento,
- tampão insuficiente ou mal executado,
- presença de zonas de fraqueza no maciço,
- furos com baixa cobertura de material,
- irregularidades geométricas que favorecem ruptura prematura.

Eliminar ou reduzir esses mecanismos significa:

- ajustar parâmetros de projeto,
- corrigir desvios operacionais,
- adaptar o carregamento às condições reais.

Quando esses mecanismos são controlados:

- a energia permanece confinada por mais tempo,
- o sistema responde de forma mais previsível,
- e a probabilidade de ejeção é significativamente reduzida.

## 8.4.2 Controle de furos de borda

Os furos localizados próximos à face livre ou à crista operam com menor nível de confinamento natural.

Isso ocorre porque:

- a espessura de material à frente do furo é reduzida,
- a energia encontra menor resistência,
- a ruptura tende a ocorrer de forma mais rápida e menos controlada.

Por esse motivo, os furos de borda são naturalmente mais sensíveis ao flyrock.

O controle preventivo nesses casos pode incluir:

- redução da carga,
- aumento do tampão,
- ajuste do afastamento local,
- uso de distribuição diferenciada de energia,
- ou até a redefinição do layout nesses setores.

A atenção especial a esses furos é essencial para evitar que zonas localizadas de baixo confinamento comprometam o comportamento global do desmonte.




## 8.4.3 Aumento de tampão em áreas sensíveis

O tampão é um dos principais elementos de confinamento do sistema, especialmente na região superior do furo.

Em áreas sensíveis ou em condições críticas, o aumento do tampão pode ser utilizado como medida preventiva para reforçar esse confinamento.

Essa prática pode ser aplicada em situações como:

- proximidade de estruturas ou áreas com restrição,
- presença de geologia desfavorável,
- incertezas na execução,
- ou regiões com maior risco de ejeção.

O aumento do tampão:

- eleva a resistência à fuga de gases,
- prolonga o tempo de confinamento da energia,
- reduz a probabilidade de projeção vertical.

No entanto, essa medida deve ser aplicada com critério, considerando:



- o impacto na fragmentação,
- a altura da bancada,
- e o equilíbrio geral do sistema.

## 8.4.4 Buffers e práticas de amortecimento

Em determinadas situações, pode ser necessário reduzir a agressividade do desmonte em regiões específicas.

Isso pode ser feito por meio da criação de zonas de amortecimento, também chamadas de buffers.

Essas zonas têm como objetivo:

- reduzir a energia transmitida a setores sensíveis,
- suavizar a resposta do desmonte,
- aumentar a segurança operacional.

As práticas de amortecimento podem incluir:

- redução local da carga,
- aumento da malha,
- alteração do sequenciamento,
- uso de explosivos com menor energia em determinadas regiões.

Essas estratégias permitem adaptar o comportamento do desmonte de forma localizada, sem comprometer o desempenho global.

As medidas preventivas representam a forma mais eficiente de controle do flyrock, pois atuam diretamente sobre as condições que geram o fenômeno.



# 8.5 Medidas mitigadoras

Mesmo com um projeto bem elaborado, execução controlada e aplicação de medidas preventivas, existem situações em que o risco de flyrock não pode ser completamente eliminado.

Isso pode ocorrer devido a:

- restrições operacionais,
- condições geológicas adversas,
- limitações de espaço,
- ou exigências específicas do empreendimento.

Nesses casos, torna-se necessário adotar medidas mitigadoras.

A mitigação não atua sobre a origem do problema, mas sobre suas possíveis consequências. Seu objetivo é reduzir o impacto de um eventual evento de projeção, limitando a distância, a energia ou os efeitos dos fragmentos lançados.

É fundamental reforçar que:

*mitigação não substitui prevenção.*

Ela deve ser entendida como uma camada adicional de segurança, utilizada quando o sistema ainda apresenta risco residual relevante, mesmo após a aplicação de boas práticas de projeto e operação.

As medidas mitigadoras podem atuar de diferentes formas:

- como barreiras físicas,
- como contenção adicional,
- como ajustes operacionais,
- ou como redução intencional da energia aplicada.

Ao longo deste tópico, será desenvolvido o entendimento de que a mitigação é parte integrante de uma abordagem conservadora e responsável no controle do flyrock.

## 8.5.1 Barreiras físicas e mantas de proteção (blast mats)

As barreiras físicas são medidas mitigadoras utilizadas com o objetivo de interceptar ou limitar a trajetória de fragmentos projetados durante o desmonte.

Seu uso é mais comum em situações específicas, como:

• desmontes próximos a estruturas

• áreas com circulação de pessoas ou equipamentos

• ambientes com restrições espaciais




Essas barreiras podem ser naturais ou artificiais, dependendo do contexto, e atuam como uma linha adicional de proteção.

Entre as soluções mais utilizadas nesse contexto, destacam-se as mantas de proteção (blast mats), que consistem em estruturas posicionadas sobre a área de detonação com o objetivo de:

• conter fragmentos

• reduzir a projeção vertical

• aumentar o confinamento local

Sua aplicação é comum em:

• desmontes urbanos

• obras civis

• situações com alta sensibilidade ao entorno




No entanto, é importante destacar que essas medidas apresentam limitações relevantes:

• sua eficácia depende do posicionamento e da resistência

• exigem logística de instalação e remoção

• podem não ser eficazes para grandes volumes ou altas energias

• dependem da integridade estrutural e correta aplicação

• não eliminam o risco, apenas o reduzem

Dessa forma, tanto as barreiras físicas quanto as mantas de proteção devem ser entendidas como medidas complementares. Elas não substituem um bom projeto de desmonte nem o controle adequado da energia, devendo ser utilizadas como uma camada adicional de mitigação dentro de uma estratégia mais ampla de segurança.

## 8.5.2 Ajuste de procedimentos em áreas críticas

Em situações específicas, a mitigação pode envolver mudanças no modo de operação.

Esses ajustes podem ser:

- temporários, aplicados a um desmonte específico,
- ou setoriais, restritos a determinadas regiões do plano de fogo.

Entre as possíveis ações, destacam-se:

- alteração do sequenciamento,
- redução de carga em áreas sensíveis,
- aumento de tampão,
- modificação da ordem de detonação,
- isolamento de determinadas zonas.

Essas adaptações permitem:

- reduzir a agressividade do desmonte em pontos críticos,
- aumentar a segurança local,

- e ajustar o sistema às condições reais do campo.

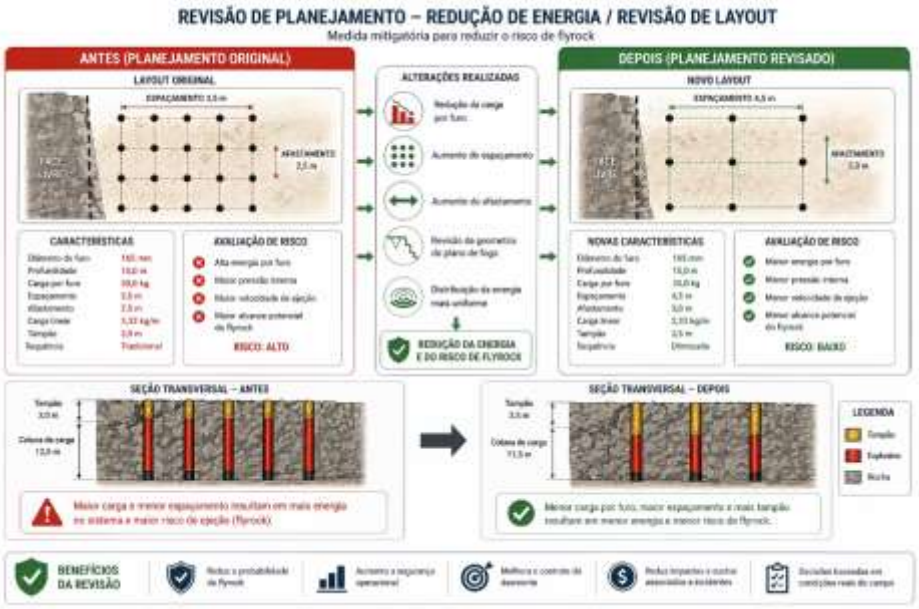
A mitigação, nesse caso, atua como uma resposta técnica a restrições específicas.

## 8.5.3 Redução de energia ou revisão de layout

Uma das formas mais diretas de mitigação é a redução intencional da energia aplicada no sistema.

Isso pode ser feito por meio de:

- diminuição da carga por furo,
- alteração da distribuição da energia,
- aumento do espaçamento,
- revisão da geometria do plano de fogo.




Essas ações têm como objetivo:

- reduzir a pressão interna do sistema,
- diminuir a velocidade de ejeção de fragmentos,
- e limitar o alcance potencial do flyrock.

Em alguns casos, pode ser necessário revisar completamente o layout do desmonte, buscando uma configuração mais conservadora.

Essa abordagem é especialmente importante em:

- áreas com alta sensibilidade,
- desmontes próximos a estruturas,
- ou contextos com baixa tolerância ao risco

.

# 8.6 Controle em áreas sensíveis

Até este ponto, foram apresentadas as principais estratégias de controle e mitigação do flyrock aplicáveis de forma geral. No entanto, nem todos os desmontes operam sob as mesmas condições.

Existem contextos em que as consequências de um evento de flyrock são significativamente mais graves, seja pela presença de pessoas, estruturas, vias de circulação ou restrições operacionais. Nessas situações, a tolerância ao erro é muito menor.

Esses cenários são definidos como áreas sensíveis.

O controle do flyrock nessas áreas exige uma abordagem mais conservadora, baseada em:

- aumento da margem de segurança,
- maior rigor na definição do projeto,
- intensificação da verificação em campo,
- e, frequentemente, adaptação do método de desmonte.

O ponto central aqui é compreender que:

*o nível de controle deve ser proporcional ao nível de risco e às consequências potenciais.*

Ao longo deste tópico, será desenvolvido o entendimento de que o controle do flyrock não é uniforme e deve ser ajustado conforme o contexto operacional.

## 8.6.1 Proximidade de vias

A presença de vias próximas ao desmonte introduz um risco significativo, especialmente quando há circulação de veículos, pessoas ou equipamentos.

As vias representam:

- elementos lineares expostos,
- áreas de difícil controle total,
- e locais com potencial de impacto direto em caso de projeção.




O controle nessas situações deve considerar:

- isolamento adequado da área,
- definição rigorosa do perímetro de segurança,
- ajuste de parâmetros para reduzir o alcance de projeção,
- e, quando necessário, uso de medidas mitigadoras adicionais.

A proximidade de vias exige planejamento cuidadoso e execução disciplinada, pois qualquer falha pode resultar em consequências imediatas.

## 8.6.2 Comunidades

Quando o desmonte ocorre próximo a comunidades, o nível de exigência aumenta significativamente.

Além do risco físico, entram em jogo fatores como:

- segurança de pessoas,
- percepção de risco pela população,
- impacto social e reputacional,
- exigências regulatórias mais rigorosas.

Nesses casos, o controle do flyrock deve ser conduzido com postura altamente conservadora, incluindo:

- aumento das distâncias de segurança,
- revisão de parâmetros de projeto,
- intensificação das verificações operacionais,
- e, frequentemente, adoção de medidas mitigadoras adicionais.

A gestão adequada desses cenários é fundamental não apenas para a segurança, mas também para a sustentabilidade da operação.

## 8.6.3 Estruturas

A proximidade de estruturas, como instalações industriais, edifícios ou equipamentos fixos, impõe restrições importantes ao desmonte.

Esses elementos:

- não possuem mobilidade,
- podem sofrer danos mesmo com fragmentos de menor energia,
- e representam alto custo em caso de impacto.

O controle nesses casos deve incluir:

- análise detalhada da posição relativa do desmonte,
- ajuste da geometria e da carga,
- reforço do confinamento,
- e avaliação do uso de medidas mitigadoras.

A presença de estruturas exige que o desmonte opere com maior previsibilidade e menor margem de variação.

## 8.6.4 Áreas urbanas

Desmontes em ambiente urbano representam um dos cenários mais críticos em termos de controle do flyrock.

Esses contextos envolvem:

- alta densidade de pessoas e estruturas,
- espaço limitado para operação,
- restrições legais e ambientais mais rigorosas,
- elevada sensibilidade a qualquer ocorrência.



Nessas condições, o controle deve ser extremamente rigoroso, incluindo:

- projetos altamente conservadores,
- controle operacional intensificado,
- uso frequente de medidas mitigadoras,
- e planejamento detalhado de segurança.

Além disso, a execução deve ser conduzida com alto nível de disciplina e supervisão, pois a margem para erro é mínima.

## 8.6.5 Áreas com forte restrição operacional

Existem também cenários em que o desmonte ocorre sob limitações operacionais relevantes, como:

- restrições de espaço,
- proximidade de diferentes frentes de trabalho,
- interferência com outras atividades,
- limitações logísticas ou regulatórias.




Nessas situações, o controle do flyrock exige:

- adaptação do método de desmonte,
- ajustes no plano de fogo,
- maior integração entre equipes,
- e tomada de decisão mais criteriosa.

A presença de múltiplas restrições aumenta a complexidade do sistema e exige abordagem ainda mais cuidadosa.

O controle do flyrock em áreas sensíveis exige uma abordagem diferenciada, baseada em maior rigor técnico e operacional.

Esse entendimento reforça um princípio fundamental:

*não existe controle padrão aplicável a todos os cenários.*

# 8.7 Fechamento do módulo e consolidação da lógica de controle

Ao longo deste módulo, foi desenvolvido um dos pilares mais importantes para a atuação prática no desmonte de rochas com explosivos: o controle do flyrock.

Partindo da compreensão das causas apresentada no módulo anterior, avançamos para a construção de uma lógica de atuação voltada à prevenção e mitigação do fenômeno. Essa transição representa um passo fundamental na evolução técnica do profissional, pois desloca o foco da análise do problema para o controle efetivo das condições que o geram.

O ponto central consolidado neste módulo é claro:

*o controle do flyrock não ocorre no momento da detonação.*

Ele é construído antes, ao longo de todas as etapas que antecedem o disparo, por meio de decisões técnicas, execução disciplinada e verificação contínua.

Controlar o flyrock significa, portanto:

- controlar a forma como a energia é introduzida no sistema,
- garantir que o confinamento seja adequado,
- reduzir a variabilidade entre o planejado e o executado,
- e atuar preventivamente sobre as condições críticas.

Esse entendimento reforça que o fenômeno não deve ser tratado como um evento isolado, mas como resultado de um sistema que pode e deve ser controlado.

## 8.7.1 Síntese das camadas de controle

Ao longo do módulo, o controle do flyrock foi apresentado como um sistema construído em camadas complementares.

Essas camadas podem ser organizadas da seguinte forma:

- **O controle de projeto define a base do sistema***:* É nessa etapa que se estabelece o equilíbrio entre energia e confinamento, por meio da geometria, da distribuição da carga e da definição dos parâmetros principais.
- **O controle operacional garante a execução conforme o planejado**: Ele atua na verificação, correção de desvios e confirmação das condições reais em campo.
- **As medidas preventivas reduzem a probabilidade de ocorrência**: Elas atuam diretamente sobre as causas, eliminando mecanismos críticos e aumentando a robustez do sistema.
- **As medidas mitigadoras reduzem as consequências**: São aplicadas quando o risco não pode ser totalmente eliminado, funcionando como uma camada adicional de proteção.

Essas camadas não atuam de forma isolada. Pelo contrário, seu efeito é cumulativo. Quanto maior a consistência entre elas, maior a capacidade de controle do sistema.

## 8.7.2 O que o aluno deve ter entendido ao final do módulo

Ao final deste módulo, o aluno deve ter consolidado alguns princípios fundamentais:

- **O controle começa antes do disparo**: A maior parte das decisões que influenciam o flyrock ocorre antes da detonação.
- **Projeto, operação e leitura de campo são inseparáveis**: Nenhuma dessas dimensões, isoladamente, é suficiente para garantir o controle.
- **A prevenção é a principal estratégia**: Atuar na origem do problema é mais eficaz do que tentar conter suas consequências.

- **A mitigação é complementar**: Ela deve ser utilizada quando há risco residual, mas não substitui boas práticas de projeto e execução.
- **O controle deve ser proporcional ao risco**: m áreas sensíveis, a abordagem deve ser mais conservadora e rigorosa.
- **O sistema é integrado e sensível**: Pequenas falhas podem se combinar e gerar eventos críticos.

Esse conjunto de aprendizados representa uma base sólida para a atuação segura e consciente no desmonte.

# Módulo 9. Predição e Modelagem de Flyrock

## 9.1 Abertura do módulo e lógica da predição do flyrock

Após o desenvolvimento do Módulo 8, ficou claro que o controle do flyrock é construído antes da detonação, por meio de projeto, execução, prevenção e mitigação. No entanto, mesmo com todas essas camadas de controle, permanece uma questão fundamental na prática do desmonte:

*até onde os fragmentos podem ser lançados?*

Responder a essa pergunta é essencial para:

- definir zonas de segurança,
- planejar o isolamento da área,
- proteger pessoas, equipamentos e estruturas,
- e apoiar a tomada de decisão em contextos críticos.

É nesse ponto que entra a predição de lançamento, mas também conhecida como predição de flyrock.

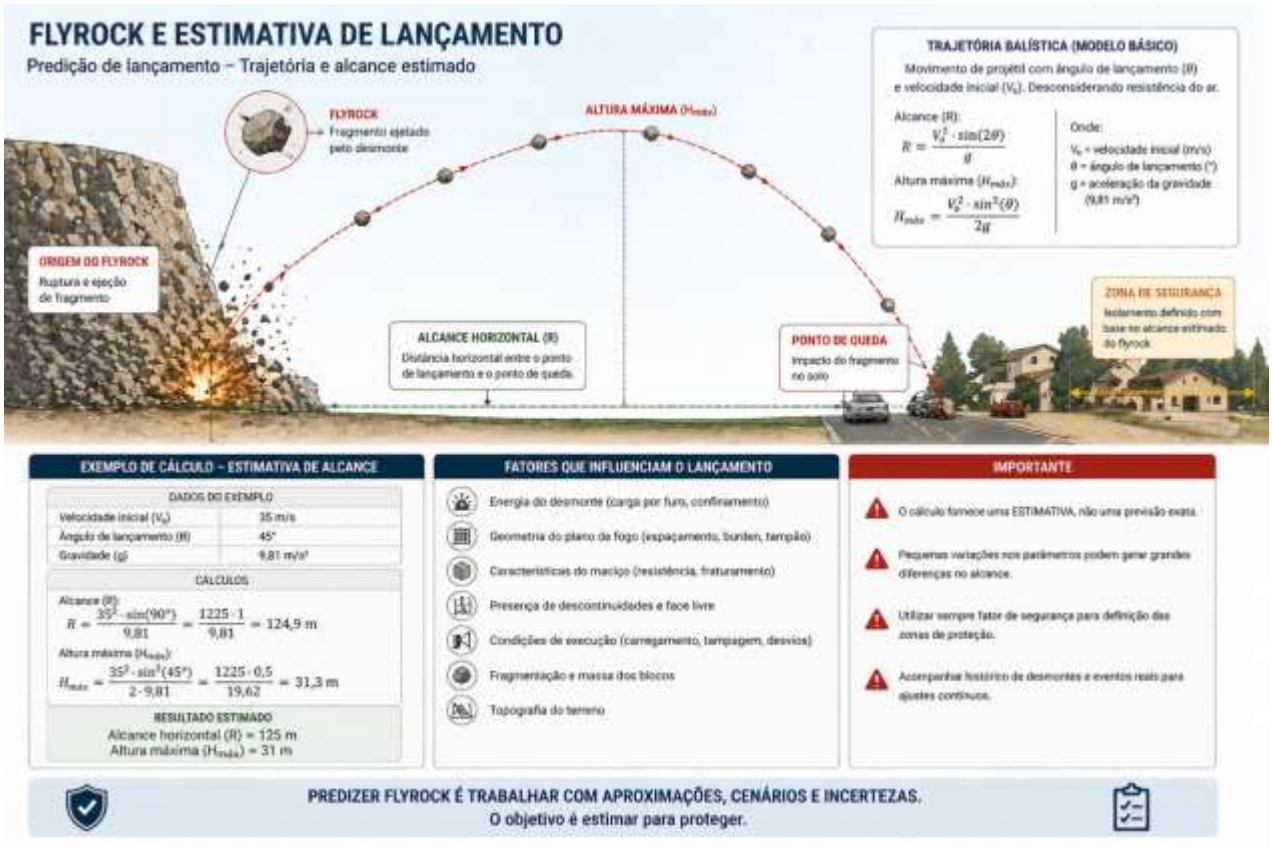
Este módulo tem como objetivo apresentar as principais abordagens de modelagem e estimativa do fenômeno, mas com uma premissa fundamental:

***o flyrock pode ser estimado, mas não pode ser previsto com exatidão.***

Isso ocorre porque o fenômeno é:

- sensível a pequenas variações,
- dependente de múltiplos fatores,
- influenciado por condições difíceis de medir,
- e governado por um comportamento não linear.

Portanto, prever flyrock significa trabalhar com aproximações, cenários e incertezas.



Os modelos surgem como ferramentas que ajudam a:

- organizar o raciocínio técnico,
- estruturar análises de risco,
- comparar diferentes condições de desmonte,
- e apoiar decisões mais seguras.

No entanto, sua utilidade prática depende diretamente:

- da qualidade dos dados utilizados,
- da compreensão das hipóteses envolvidas,
- e da capacidade de interpretação dos resultados.

Mais do que fornecer um número exato, a modelagem tem valor ao ajudar o engenheiro a entender:

- o comportamento esperado do sistema,
- os limites de segurança,
- e o grau de incerteza associado à operação.

É importante destacar que, na prática, os modelos de predição não estimam o flyrock como fenômeno em si, mas sim a **distância máxima de lançamento esperada para fragmentos**, com base em parâmetros do desmonte, características do maciço e condições operacionais. Essa distinção é fundamental, pois o foco da modelagem está na definição de limites de alcance e não na reprodução exata do comportamento do evento. Dessa forma, os resultados obtidos não devem ser interpretados como previsões determinísticas, mas como referências técnicas utilizadas para estabelecer critérios de segurança, sendo a base para a definição de zonas de exclusão e para o gerenciamento do risco associado ao flyrock.

## 9.1.1 Por que modelar flyrock

A modelagem do flyrock ou da distância máxima de lançamento possui um papel essencial no planejamento do desmonte.

Ela permite:

- estimar distâncias potenciais de projeção,
- definir zonas de exclusão,
- avaliar cenários mais conservadores,
- e antecipar condições de risco.

Sem algum tipo de estimativa:

- a definição de áreas seguras torna-se arbitrária,
- o planejamento perde base técnica,
- e a tomada de decisão fica mais exposta à incerteza.

Dessa forma, modelar não é apenas uma atividade teórica, mas uma ferramenta prática de engenharia voltada à segurança.

## 9.1.2 Diferença entre explicar o risco e prever seu alcance

Ao longo dos módulos anteriores, foi desenvolvido um entendimento detalhado dos mecanismos de geração do flyrock.

No entanto, compreender como o fenômeno ocorre não significa ser capaz de prever exatamente seu comportamento em cada detonação. Essa distinção é fundamental.

Explicar o risco envolve:

- entender os mecanismos físicos,
- identificar causas,
- analisar o papel do confinamento e da energia.

Prever o alcance envolve:

- estimar velocidade inicial,
- definir ângulo de lançamento,
- considerar tamanho e forma dos fragmentos,
- e projetar sua trajetória no espaço.




Cada uma dessas etapas envolve incertezas significativas. Por isso, a predição do flyrock sempre será uma aproximação, e não uma determinação exata.

## 9.1.3 Modelos como ferramentas de apoio, não de certeza

Um dos maiores riscos na utilização de modelos é tratá-los como respostas definitivas.

Os modelos são construídos com base em:

- simplificações,
- hipóteses,
- e representações idealizadas do fenômeno.

Eles não conseguem capturar completamente:

- a variabilidade geológica,
- os desvios operacionais,
- as irregularidades geométricas,
- e as incertezas inerentes ao sistema.

Por isso, seu uso deve ser sempre crítico.

O modelo deve ser entendido como:

- uma ferramenta de apoio à análise,
- um meio de explorar cenários,
- uma base para decisões mais conservadoras.

Nunca como uma garantia de resultado.

### 9.1.4 Relação entre modelagem, risco e decisão

A modelagem do flyrock está diretamente conectada à gestão de risco.

Ela permite:

- estimar o alcance potencial de fragmentos,
- avaliar probabilidades de ocorrência,
- definir limites de segurança,
- e apoiar a tomada de decisão em campo.

Nesse contexto, o valor da modelagem não está apenas na previsão, mas na sua capacidade de:

- estruturar o raciocínio,
- explicitar incertezas,
- e orientar escolhas mais seguras.

A decisão final, no entanto, não deve ser baseada apenas no modelo.

Ela deve considerar:

- dados reais,
- experiência de campo,
- condições específicas do desmonte,
- e abordagem conservadora frente às incertezas.

Outro aspecto fundamental a ser considerado é que os modelos, em sua maioria, representam o comportamento esperado do sistema em condições típicas ou médias de operação. No entanto, eventos de flyrock frequentemente estão associados a condições não usuais, desvios locais ou combinações específicas de fatores que não são plenamente capturados pelas modelagens. Isso significa que, mesmo quando um modelo indica uma distância máxima estimada, ainda existe a possibilidade de ocorrências além desse limite. Por essa razão, a aplicação prática dos modelos deve sempre ser acompanhada de uma abordagem conservadora, considerando margens de segurança adequadas frente à variabilidade e à incerteza do processo. A modelagem deve ser integrada ao processo de engenharia, como ferramenta de apoio à gestão de risco, e não como substituta do julgamento técnico.

# 9.2 Classificação dos modelos de predição de flyrock

Após compreender, no item anterior, que a predição do flyrock está associada à estimativa de distâncias máximas de lançamento e não à previsão exata do fenômeno, torna-se necessário organizar os diferentes tipos de modelos utilizados na prática.

Isso é importante porque não existe um único modelo universal capaz de representar todas as condições de desmonte. Ao contrário, diferentes abordagens foram desenvolvidas ao longo do tempo, cada uma com seus pressupostos, limitações e níveis de aplicação.

Dessa forma, compreender a classificação dos modelos permite ao profissional:

• entender a lógica por trás de cada abordagem

• escolher ferramentas mais adequadas ao contexto

• interpretar corretamente os resultados obtidos

• evitar aplicações inadequadas ou interpretações equivocadas

De forma geral, os modelos de predição de flyrock podem ser agrupados em quatro grandes categorias:

• modelos empíricos

• modelos balísticos

• modelos semi-empíricos

• modelos probabilísticos

Cada um desses grupos será apresentado a seguir.

## 9.2.1 Modelos empíricos

Os modelos empíricos são baseados em observações de campo e dados históricos de desmontes anteriores.

Nesse tipo de abordagem, a predição é construída a partir da relação entre:

• parâmetros do desmonte

• registros de eventos de flyrock

• distâncias observadas

A partir desses dados, são desenvolvidas expressões ou regras práticas que permitem estimar o alcance máximo esperado.




As principais características dos modelos empíricos são:

• simplicidade de aplicação

• forte dependência de dados reais

• boa aderência a condições específicas de operação

No entanto, apresentam limitações importantes:

• são válidos apenas para condições semelhantes às que originaram os dados

• possuem baixa capacidade de generalização

• não explicam os mecanismos físicos do fenômeno

Na prática, são amplamente utilizados como referência inicial, especialmente em operações que já possuem histórico consistente.

## 9.2.2 Modelos balísticos

Os modelos balísticos são baseados nas leis da mecânica e tratam o fragmento como um corpo lançado com determinada velocidade inicial e ângulo.




Essa abordagem considera que, após o lançamento, o fragmento se desloca sob a ação da gravidade, permitindo a aplicação de equações clássicas para estimar:

• alcance horizontal

• altura máxima

Nesse tipo de modelo, os principais parâmetros são:

• velocidade inicial do fragmento

• ângulo de lançamento

• aceleração da gravidade

As principais vantagens dessa abordagem são:

• base física clara

• facilidade de interpretação

• utilidade para compreensão do fenômeno

No entanto, suas limitações são relevantes:

• não considera a geração real da velocidade inicial

• não incorpora variáveis do desmonte, como confinamento e distribuição de energia

• desconsidera efeitos como resistência do ar e forma irregular dos fragmentos

Assim, os modelos balísticos são mais adequados como ferramenta de entendimento e análise conceitual do comportamento do flyrock.

## 9.2.3 Modelos semi-empíricos

Os modelos semi-empíricos representam uma combinação entre fundamentos físicos e dados experimentais.




Essa abordagem busca integrar:

• conceitos da física do desmonte

• parâmetros operacionais

• ajustes baseados em observações reais

Nesse grupo estão alguns dos modelos mais utilizados na engenharia de desmonte, incluindo:

• modelos baseados em SDoB

• equações propostas por McKenzie

• abordagens mais recentes como o modelo Terrock

Esses modelos procuram estabelecer relações entre:

• energia do explosivo

• confinamento

• geometria do desmonte

• mecanismos de geração do flyrock

As principais vantagens são:

• maior capacidade de representação do fenômeno

• melhor adaptação a diferentes condições

• aplicação prática mais robusta

Por outro lado:

• dependem de calibração

• ainda simplificam a realidade

• não eliminam as incertezas

Na prática, os modelos semi-empíricos representam o equilíbrio mais adequado entre teoria e aplicação operacional.

## 9.2.4 Modelos probabilísticos

Os modelos probabilísticos abordam o flyrock sob a perspectiva da variabilidade e da incerteza.

Em vez de fornecer uma única distância estimada, esses modelos buscam:

• representar a distribuição possível de lançamentos

• estimar probabilidades de ocorrência

• quantificar níveis de risco

Essa abordagem considera que o flyrock é influenciado por múltiplos fatores com comportamento variável, como:

• condições geológicas

• variações operacionais

• heterogeneidade do maciço

As principais características são:

• abordagem mais realista do ponto de vista estatístico

• capacidade de incorporar incertezas

• aplicação em análises de risco

No entanto:

• exigem grande volume de dados

• possuem maior complexidade

• são menos utilizados no dia a dia operacional




Por essa razão, são mais comuns em estudos avançados, análises acadêmicas ou avaliações de risco em projetos sensíveis.

## 9.2.5 Síntese da classificação e aplicação prática

A classificação apresentada não deve ser vista como uma divisão rígida, mas como uma forma de organizar o entendimento das diferentes abordagens disponíveis.

Na prática:

• modelos empíricos oferecem referências rápidas baseadas na experiência, normalmente usados como uma forma de acompanhar o histórico e monitorar a operação

• modelos balísticos ajudam a compreender o comportamento do lançamento, normalmente usados para entender os eventos e analises mais acadêmicas

• modelos semi-empíricos fornecem ferramentas mais completas para análise, normalmente usados em estudos mais práticos e nas revisões periódicas de procedimento e analises de risco

• modelos probabilísticos permitem avaliar o risco de forma mais abrangente, normalmente utilizados em estudos mais profundos, consultorias e analises mais avançadas e especificas.

É importante destacar que nenhum desses modelos, isoladamente, é capaz de representar completamente o fenômeno do flyrock.

Por isso, a aplicação mais eficaz ocorre quando:

• os modelos são utilizados de forma complementar

• seus resultados são interpretados criticamente

• e suas limitações são devidamente consideradas

Esse entendimento é fundamental para o próximo passo do módulo, onde serão apresentados os principais modelos de predição utilizados na prática e suas respectivas aplicações.

# 9.3 Modelos clássicos de predição

Após compreender a classificação geral dos modelos de predição, torna-se necessário avançar para a análise dos modelos clássicos mais utilizados na prática. Esses modelos representam algumas das principais tentativas de estimar a distância máxima de lançamento de fragmentos, partindo de diferentes formas de interpretar o fenômeno.

Alguns modelos procuram descrever apenas o movimento do fragmento após o lançamento, como ocorre nas formulações balísticas. Outros procuram relacionar o alcance com parâmetros do desmonte, como diâmetro do furo, carga explosiva, tampão, afastamento, profundidade escalonada de enterramento e constantes empíricas ajustadas por observações de campo.

Diversos autores contribuíram para essa evolução, incluindo Lundborg, Workman e Calder, Richards e Moore, McKenzie, St George e Gibson, além de estudos posteriores apresentados em eventos da ISEE e em relatórios técnicos aplicados à definição de zonas de exclusão. A literatura mostra que esses modelos são utilizados para estimar distâncias de lançamento, avaliar cenários de risco e apoiar a definição de distâncias de segurança, mas também reforça que seus resultados dependem fortemente das hipóteses adotadas e da qualidade dos dados de entrada.

Esses modelos variam em complexidade, aplicação e nível de fundamentação física, mas todos buscam responder à mesma pergunta:

*até que distância fragmentos podem ser lançados?*

É fundamental compreender que nenhum desses modelos representa completamente a realidade do flyrock. O ultralançamento é influenciado por fatores difíceis de medir com precisão, como geometria real da face, fraturas, vazios, variações no tampão, desvios de perfuração, acoplamento da carga, forma e massa do fragmento, velocidade inicial e ângulo de lançamento. Por isso, os modelos devem ser entendidos como ferramentas de apoio à decisão técnica, e não como garantias absolutas de alcance máximo.

O valor desses modelos está em fornecer estimativas iniciais, comparar cenários, identificar condições críticas de confinamento e apoiar a definição conservadora de zonas de segurança. A seguir, serão apresentados os principais modelos clássicos, com suas fórmulas, lógica de aplicação, exemplo de cálculo e limitações.

Aqui reforçamos mais uma vez que a ideia não é apresentar formulas prontas, vamos apenas apresentar de forma superficial os modelos e recomendamos fortemente que para aqueles que querem se aprofundar no tema, que façam uma pesquisa especifica sobre o modelo que deseja se aprofundar, busque artigos acadêmicos e referências bibliográficas que foquem especificamente em cada modelo, assim é possível entender a origem, a metodologia de aplicação completa e claro que a finalidade para qual cada modelo foi desenvolvido e aplicado.

## 9.3.1 Modelos balísticos de trajetória

Os modelos balísticos representam a forma mais simples de análise do flyrock. Eles descrevem o movimento do fragmento após o lançamento, assumindo que o fragmento se comporta como um projétil submetido à ação da gravidade.

Essa abordagem não explica como o fragmento recebeu sua velocidade inicial. Ela apenas calcula o alcance a partir de uma velocidade inicial e de um ângulo de lançamento. Por isso, o modelo balístico é muito útil para compreender a influência da velocidade e do ângulo, mas não deve ser usado sozinho como modelo completo de predição de flyrock.

**Apresentação da fórmula**

$$R = \frac{V_0^2 \cdot \sin(2\theta)}{g}$$

Onde:

• R = alcance horizontal do fragmento (m)

• $V_0$ = velocidade inicial do fragmento (m/s)

• θ = ângulo de lançamento em relação à horizontal

• g = aceleração da gravidade, aproximadamente 9,81 m/s²

Esse modelo descreve o comportamento do fragmento após o lançamento.

Ele parte do princípio de que:

• o fragmento possui uma velocidade inicial

• o movimento é governado pela gravidade

• a trajetória é aproximadamente parabólica

• o terreno de lançamento e de impacto está aproximadamente no mesmo nível

• a resistência do ar, a rotação e o formato do fragmento são desconsiderados

Quanto maior a velocidade inicial, maior o alcance. O ângulo controla a trajetória e, em condições ideais, o ângulo de 45° maximiza a distância horizontal.

**Como estimar a velocidade inicial $V_0$**

A principal dificuldade prática do modelo balístico está justamente na estimativa da velocidade inicial do fragmento. Em uma aplicação real, o engenheiro raramente conhece $V_0$ diretamente. Esse valor pode ser estimado de algumas formas, cada uma com seu nível de precisão, custo e limitação.

A primeira forma é por meio de **registros de vídeo e análise de imagem**. Câmeras de alta velocidade podem ser utilizadas para acompanhar o deslocamento inicial dos fragmentos ou da face, permitindo estimar velocidade e ângulo de lançamento. Essa abordagem é mais adequada para estudos técnicos, calibração de modelos e investigação de eventos, pois exige posicionamento seguro da câmera, escala de referência, boa resolução, taxa de quadros adequada e visibilidade da trajetória. Câmeras convencionais de 30 fps podem registrar a ocorrência, mas geralmente são limitadas para medir fragmentos pequenos e rápidos com precisão.

A segunda forma é por meio de **retroanálise balística**. Quando se conhece a distância real atingida por um fragmento e se assume um ângulo de lançamento, a fórmula balística pode ser reorganizada para estimar a velocidade inicial necessária para produzir aquele alcance:

$$V_0 = \sqrt{(R \cdot g / \operatorname{sen} 2\theta)}$$

Essa abordagem é útil em estudos de caso e investigações após uma ocorrência. Por exemplo, se um fragmento atingiu 250 m e se admite, de forma conservadora, um ângulo de 45°, então:

$$V_0 = \sqrt{(250 \cdot 9{,}81 / 1)}$$

$$V_0 \approx 49{,}5 \text{ m/s}$$

Ou seja, para atingir 250 m em condição ideal de lançamento a 45°, o fragmento precisaria de uma velocidade inicial aproximada de 50 m/s, desconsiderando resistência do ar e diferenças de elevação.

A terceira forma é utilizar **faixas típicas de velocidade observadas na literatura técnica**. Alguns estudos indicam que velocidades iniciais relativamente baixas já podem produzir alcances significativos. Por exemplo, considerando lançamento a 45°, uma velocidade de 30 m/s pode resultar em alcance de aproximadamente 92 m; uma velocidade de 50 m/s, em cerca de 255 m; e uma velocidade de 70 m/s, em cerca de 500 m. Essas estimativas não devem ser interpretadas como valores universais, mas como referências didáticas para compreender a sensibilidade do alcance à velocidade.

A quarta forma é utilizar **relações mecanísticas ou energéticas**, em que parte da energia ou do impulso dos gases é associada à energia cinética do fragmento:

$$E_k = 1/2 \cdot M \cdot V_0^2$$

A partir dessa relação:

$$V_0 = \sqrt{(2 \cdot E_k / M)}$$

Onde:

• $E_k$ = energia cinética transferida ao fragmento (J)

• M = massa do fragmento (kg)

• $V_0$ = velocidade inicial (m/s)

Essa formulação ajuda a entender o conceito físico, mas sua aplicação prática é limitada porque é difícil saber qual fração da energia explosiva foi efetivamente transferida para um fragmento específico. Pequenas mudanças nessa fração resultam em grandes diferenças na velocidade estimada. Por isso, essa abordagem é mais útil para análise conceitual e sensibilidade do que para definição direta de zona de exclusão.

**Exemplo de cálculo**

Considere:

• $V_0 = 50$ m/s

• $\theta = 45°$

• $g = 9{,}81$ m/s²

Como sen 90° = 1:

$R = 50^2 / 9{,}81$

$R \approx 255$ m

Isso significa que um fragmento lançado a 50 m/s, em ângulo próximo de 45°, poderia atingir aproximadamente 255 m, desconsiderando resistência do ar, forma do fragmento, rotação, vento, relevo e colisões.

**Exemplo complementar: estimando $V_0$ a partir de uma distância observada**

Considere agora que, após uma detonação, um fragmento foi encontrado a 180 m do ponto provável de lançamento. Admitindo, para uma primeira estimativa, que o ângulo de lançamento tenha sido próximo de 45°:

$V_0 = \sqrt{(R \cdot g / \text{sen } 2\theta)}$

$V_0 = \sqrt{(180 \cdot 9{,}81 / 1)}$

$V_0 \approx 42$ m/s

Esse resultado indica que, em condição ideal, uma velocidade inicial da ordem de 42 m/s seria suficiente para lançar um fragmento até 180 m. Na prática, se houver resistência do ar, diferença de elevação, colisões ou fragmento irregular, a velocidade real pode ser diferente.

**Quando funciona (aplicação recomendada)**

Os modelos balísticos são mais indicados para análise conceitual do fenômeno, permitindo compreender como a velocidade e o ângulo influenciam diretamente o alcance dos fragmentos. Eles são úteis para fins didáticos, comparação entre cenários teóricos e retroanálise inicial de ocorrências.

Além disso, servem como base para modelos mais avançados, que incorporam parâmetros adicionais relacionados ao desmonte, como energia, confinamento, geometria, mecanismo de ruptura e propriedades aerodinâmicas do fragmento.

Esse modelo é indicado para:

• explicar o efeito da velocidade inicial e do ângulo de lançamento

• comparar cenários teóricos

• realizar estimativas iniciais de retroanálise

• apoiar o entendimento físico da trajetória

• servir como base conceitual para modelos mais avançados

**Quando NÃO funciona (limitações)**

O modelo balístico não deve ser usado isoladamente para definir zona de exclusão, porque não estima a velocidade inicial a partir dos parâmetros do plano de fogo. Além disso, ignora efeitos importantes como arrasto aerodinâmico, forma do fragmento, massa, rotação, relevo e mecanismos reais de geração do flyrock.

Também ignora fatores fundamentais do desmonte, como distribuição de energia, confinamento, afastamento efetivo, tampão, condições geológicas, vazios, fraturas e qualidade da execução. Por essa razão, sua aplicação isolada pode levar a interpretações equivocadas, especialmente quando utilizada para estimativas reais de distância.

**Observação importante**

Diversos modelos mais avançados utilizam a base balística, mas incorporam parâmetros adicionais, como:

• energia do explosivo

• afastamento e espaçamento

• confinamento

• mecanismos de ruptura

• velocidade de face

• propriedades do fragmento

• resistência do ar

Ou seja, o modelo balístico é a base da compreensão da trajetória, mas não é suficiente sozinho para representar a geração e o alcance real do flyrock em desmontes de rochas com explosivos.

## 9.3.2 Modelo de Lundborg

O modelo de Lundborg é uma das referências históricas mais importantes na predição de alcance máximo de flyrock. Ele foi desenvolvido a partir de estudos experimentais e observações de campo, buscando relacionar o diâmetro do furo, a carga específica do desmonte, o tamanho do fragmento e a distância máxima de lançamento.

Esse modelo é frequentemente utilizado como referência para compreender condições extremas de lançamento, especialmente em situações de baixo confinamento, afastamento insuficiente, tampão insuficiente, crateramento ou desmonte pouco controlado. Por isso, seu principal valor está em mostrar o potencial de alcance dos fragmentos em cenários desfavoráveis, servindo como ferramenta conservadora de análise e comparação.

**Fórmulas principais**

Lundborg apresentou uma relação para estimar o lançamento associado à carga específica do desmonte:

$$\mathbf{L = 143 \cdot d \cdot (q - 0{,}2)}$$

Onde:

• **L** = distância estimada de lançamento (m)
• **d** = diâmetro do furo (polegadas)
• **q** = carga específica ou razão de carga (kg/m³)

Essa equação deve ser interpretada como uma estimativa associada à carga específica do desmonte. O termo **(q - 0,2)** indica que a fórmula passa a ter sentido prático quando a carga específica está acima de um valor de referência de **0,2 kg/m³**. Portanto, não se trata de uma equação universal para qualquer condição, mas de uma relação empírica que busca representar o aumento do lançamento à medida que a carga específica cresce acima desse patamar.

Lundborg também propôs uma relação para estimar o tamanho ótimo do fragmento lançado:

$$\mathbf{\varphi = 0{,}1 \cdot d^{2/3}}$$

Onde:

• **φ** = diâmetro do fragmento ótimo (m)
• **d** = diâmetro do furo (polegadas)

Essa equação não calcula a distância de lançamento. Sua função é estimar o tamanho do fragmento que, segundo o modelo, apresenta a combinação mais favorável entre massa, momento e resistência do ar para atingir as

maiores distâncias. Em outras palavras, ela indica o tipo de fragmento que teria maior potencial de alcançar o lançamento máximo.

Para a condição de lançamento máximo desse fragmento ótimo, Lundborg propôs:

$$\mathbf{L_{max} = 260 \cdot d^{2/3}}$$

Onde:

• **Lmax** = distância máxima prática de lançamento (m)
• **d** = diâmetro do furo (polegadas)

Essa equação representa uma condição extrema de lançamento, associada ao fragmento ótimo e a situações em que o confinamento é muito desfavorável. Ela deve ser entendida como uma referência conservadora de alcance máximo e não como a distância esperada em todo desmonte bem controlado.

**Diferença entre as fórmulas**

As três fórmulas se complementam, mas não devem ser usadas como se fossem equivalentes.

A equação $\mathbf{L = 143 \cdot d \cdot (q - 0{,}2)}$ relaciona o lançamento com a **carga específica** do desmonte. Ela é útil quando se deseja avaliar como o aumento da energia por volume de rocha pode influenciar o potencial de lançamento.

A equação $\mathbf{\varphi = 0{,}1 \cdot d^{2/3}}$ estima o **tamanho ótimo do fragmento** associado às maiores distâncias. Ela não fornece o alcance, mas ajuda a entender qual fragmento, em termos de tamanho, tende a ter melhor condição para viajar mais longe.

A equação $\mathbf{L_{max} = 260 \cdot d^{2/3}}$ fornece uma estimativa de **alcance máximo prático** para esse fragmento ótimo, especialmente em condições extremas ou pouco controladas. Ela é mais conservadora e deve ser usada como referência de potencial máximo, e não como previsão rotineira de cada detonação.

**Exemplo de cálculo**

Considere um furo de:

• d = 4 polegadas

Primeiro, calcula-se o tamanho ótimo do fragmento:

$\varphi = 0{,}1 \cdot 4^{2/3}$

$\varphi \approx 0{,}25$ m

Esse resultado indica que, para um furo de 4 polegadas, o fragmento com maior potencial de atingir distâncias extremas teria dimensão aproximada de 25 cm, segundo a lógica do modelo.

Agora, calcula-se o alcance máximo prático para esse fragmento ótimo:

$L_{max} = 260 \cdot 4^{2/3}$

$L_{max} \approx 655$ m

Esse valor representa uma condição extrema de lançamento, não necessariamente o alcance esperado em uma detonação controlada.

Agora, usando a equação associada à carga específica, considere:

• $q = 0{,}5$ kg/m³

$L = 143 \cdot 4 \cdot (0{,}5 - 0{,}2)$

$L = 143 \cdot 4 \cdot 0{,}3$

$L \approx 172$ m

**Interpretação do exemplo**

O exemplo mostra duas leituras diferentes do modelo.

A equação com carga específica estimou um lançamento de aproximadamente **172 m**, associado ao valor de **q = 0,5 kg/m³**. Já a equação de alcance máximo indicou aproximadamente **655 m**, mas para uma condição extrema relacionada ao fragmento ótimo.

Isso não significa contradição entre as fórmulas. Elas respondem a perguntas diferentes:

**1. Com essa carga específica, qual lançamento o modelo estima?**
Resposta: usa-se $\mathbf{L = 143 \cdot d \cdot (q - 0,2)}$.

**2. Qual seria o fragmento com maior potencial de atingir longas distâncias?**
Resposta: usa-se $\mathbf{\varphi = 0,1 \cdot d^{2/3}}$.

**3. Qual seria o alcance máximo prático desse fragmento ótimo em condição extrema?**
Resposta: usa-se $\mathbf{Lmax = 260 \cdot d^{2/3}}$.

Essa distinção é essencial para evitar uso inadequado do modelo. O valor de **Lmax** não deve ser tratado como a distância normal de lançamento de qualquer desmonte, mas como uma referência extrema de potencial de projeção.

**Quando usar**

O modelo de Lundborg pode ser usado para:

• estimativas conservadoras iniciais

• análise de cenários críticos

• comparação com outros modelos

• avaliação didática do efeito do diâmetro do furo

• compreensão do papel do tamanho do fragmento no alcance

• avaliação do potencial máximo de lançamento em condições desfavoráveis

**Quando não usar**

O modelo de Lundborg não deve ser usado como única base para definir zona de exclusão em operações controladas. Ele não considera diretamente afastamento real, altura de tampão, geometria da face, sequência de iniciação, qualidade do carregamento, desvios de perfuração, variações geológicas, calibração local ou controle operacional.

Além disso, por trabalhar com relações empíricas amplas e condições de lançamento máximo, pode gerar estimativas excessivamente conservadoras quando aplicado diretamente a desmontes bem projetados e bem executados.

**Fechamento**

O modelo de Lundborg deve ser entendido como uma referência histórica e conservadora para o estudo do flyrock. Sua principal contribuição não está apenas em fornecer uma distância, mas em mostrar que o alcance máximo depende do diâmetro do furo, da carga específica e também do tamanho do fragmento lançado.

Ao mesmo tempo, sua aplicação exige cuidado. O modelo ajuda a compreender o potencial extremo do fenômeno, mas não substitui modelos mais específicos, calibração local, inspeção de campo, controle do plano de fogo e avaliação crítica das condições reais do desmonte.

## 9.3.3 Modelo de McKenzie associado ao SDoB

O modelo proposto por McKenzie pertence à classe dos modelos semi-empíricos, pois combina conceitos físicos com ajustes baseados em observações e formulações aplicadas ao comportamento do flyrock. Esse modelo utiliza o conceito de Scaled Depth of Burial (SDoB), relacionando o nível de confinamento da carga com a distância estimada de lançamento dos fragmentos.

A abordagem parte da ideia de que o flyrock pode ser interpretado, em determinadas condições, como um fenômeno associado ao crateramento, no qual a relação entre a energia da carga e o confinamento disponível

exerce papel determinante no potencial de ejeção de material. O modelo de McKenzie utiliza esse raciocínio para estimar o alcance máximo de fragmentos, considerando principalmente o SDoB e o diâmetro do furo.

**Apresentação da fórmula**

$$Range_{max} = 10 \cdot SDoB^{-2.167} \cdot \emptyset^{0.667}$$

Onde:

• $Range_{max}$= distância máxima de lançamento (m)

• $SDoB$= scaled depth of burial (ver modulo 6 do curso e o cálculo especificamente no tópico 6.3.5)

• $\emptyset$= diâmetro do furo (mm)

**Significado físico**

A equação mostra que o alcance do flyrock depende principalmente de dois elementos:

• nível de confinamento, representado pelo **SDoB**;

• diâmetro do furo, relacionado à escala da carga e ao potencial energético do sistema.

O **SDoB** aparece com expoente negativo. Isso significa que, quanto menor o SDoB, menor é o confinamento relativo e maior tende a ser o alcance estimado. Por outro lado, quanto maior o SDoB, maior é o confinamento relativo e menor tende a ser o alcance potencial dos fragmentos.

O diâmetro do furo aparece com expoente positivo. Isso indica que furos maiores tendem a estar associados a maiores alcances potenciais, pois normalmente representam maior escala de carregamento e maior energia envolvida no desmonte.

Assim, a lógica do modelo pode ser resumida da seguinte forma:

• menor SDoB indica menor confinamento e maior potencial de lançamento;

• maior SDoB indica maior confinamento e menor potencial de lançamento;

• maior diâmetro indica maior escala do desmonte e maior alcance potencial.

**Cálculo do SDoB aplicado ao modelo de McKenzie**

Para aplicar corretamente o modelo de McKenzie, é necessário calcular antes o valor do *Scaled Depth of Burial* (SDoB). Já fizemos a apresentação do calculo do SDoB no modulo 6, onde apresentamos os cálculos mais especificamente no tópico 6.3.5, por favor voltem ao tópico se precisarem rever a metodologia de cálculo.

**Exemplo simplificado**

Considere um desmonte com os seguintes dados:

• diâmetro do furo: $d = 100\,mm = 0{,}10\,m$;

• tamponamento: $T = 3{,}0\,m$;

• densidade do explosivo: $\rho = 1.100\,kg/m^3$;

• comprimento equivalente da carga: $L_{eq} = 10 \cdot d$.

Primeiro, calcula-se o comprimento equivalente da carga:

$$L_{eq} = 10 \cdot d$$
$$L_{eq} = 10 \cdot 0{,}10$$
$$L_{eq} = 1{,}0\,m$$

Em seguida, calcula-se a profundidade efetiva de enterramento:

$$ST = T + 0{,}5 \cdot L_{eq}$$
$$ST = 3{,}0 + 0{,}5 \cdot 1{,}0$$
$$ST = 3{,}5\,m$$

Agora, calcula-se a carga equivalente:

$$Q = \rho \cdot \left(\frac{\pi \cdot d^2}{4}\right) \cdot L_{eq}$$
$$Q = 1.100 \cdot \left(\frac{\pi \cdot 0,10^2}{4}\right) \cdot 1,0$$
$$Q \approx 1.100 \cdot 0,00785 \cdot 1,0$$
$$Q \approx 8,64\ kg$$

Com esses valores, calcula-se o SDoB:

$$SDoB = \frac{ST}{\sqrt[3]{Q}}$$
$$SDoB = \frac{3,5}{\sqrt[3]{8,64}}$$
$$SDoB = \frac{3,5}{2,05}$$
$$SDoB \approx 1,71$$

Agora, aplica-se a equação de alcance do modelo de McKenzie:

$$Range_{max} = 10 \cdot SDoB^{-2.167} \cdot \emptyset^{0.667}$$

Onde o diâmetro Ødeve ser utilizado em milímetros:

$$Range_{max} = 10 \cdot 1,71^{-2.167} \cdot 100^{0.667}$$
$$Range_{max} \approx 67\ m$$

Assim, para esse conjunto de parâmetros, o alcance máximo estimado pelo modelo de McKenzie seria da ordem de **67 m**.

**Comparação com uma condição menos confinada**

Agora considere o mesmo furo, mesmo explosivo e mesmo comprimento equivalente, porém com tamponamento reduzido para:

• $T = 2,0\ m$.

O comprimento equivalente permanece:

$$L_{eq} = 1,0\ m$$

A profundidade efetiva passa a ser:

$$ST = T + 0,5 \cdot L_{eq}$$
$$ST = 2,0 + 0,5 \cdot 1,0$$
$$ST = 2,5\ m$$

A carga equivalente permanece a mesma:

$$Q \approx 8,64\ kg$$

Agora, calcula-se o novo SDoB:

$$SDoB = \frac{ST}{\sqrt[3]{Q}}$$
$$SDoB = \frac{2,5}{2,05}$$
$$SDoB \approx 1,22$$

Aplicando novamente a equação de McKenzie:

$$Range_{max} = 10 \cdot 1,22^{-2.167} \cdot 100^{0.667}$$
$$Range_{max} \approx 140\ m$$

**Interpretação do exemplo**

A redução do tamponamento de **3,0 m** para **2,0 m** reduziu o SDoB de aproximadamente **1,71** para **1,22**.

Como o SDoB aparece com expoente negativo na equação, essa redução provocou um aumento expressivo no alcance estimado, passando de aproximadamente **67 m** para **140 m**.

Esse exemplo mostra por que o modelo de McKenzie é sensível ao confinamento. Mesmo mantendo o mesmo diâmetro, a mesma densidade do explosivo e o mesmo comprimento equivalente da carga, uma alteração aparentemente simples no tamponamento modificou significativamente a distância estimada de lançamento.

Na prática, isso reforça um ponto essencial: o risco de flyrock não depende apenas da quantidade de explosivo, mas da relação entre energia disponível e confinamento efetivo da carga. Por isso, pequenas variações no tampão, no diâmetro, na densidade do explosivo ou na execução do carregamento podem alterar de forma relevante o comportamento esperado do desmonte.

**Quando funciona: aplicação recomendada**

O modelo de McKenzie é útil para estimativas preliminares de distância de flyrock, especialmente quando se deseja avaliar a influência do confinamento e comparar diferentes cenários de projeto.

Esse modelo é especialmente útil para:

• comparar cenários de confinamento;

• avaliar o efeito do aumento ou redução do tamponamento;

• estimar distâncias iniciais de lançamento;

• apoiar estudos de risco e definição preliminar de zonas de exclusão;

• mostrar a importância prática do SDoB.

**Quando não funciona: limitações**

Apesar de útil, o modelo não deve ser utilizado como verdade absoluta. Ele fornece uma estimativa técnica e simplificada, mas não captura todas as condições reais do campo.

O modelo pode não representar adequadamente eventos extremos provocados por falhas localizadas, como perda abrupta de confinamento, vazio geológico, erro de carregamento, tampão mal executado, face irregular ou desvio de perfuração.

Por isso, seus resultados devem sempre ser interpretados em conjunto com inspeção de campo, qualidade do plano de fogo, histórico da mina, análise de risco e fatores de segurança adequados.

**Fechamento**

Em síntese, o modelo de McKenzie é uma ferramenta valiosa para estimativa e comparação, mas não substitui o julgamento técnico.

Ele ajuda a transformar o conceito de confinamento em uma estimativa numérica de alcance, mas a decisão final sobre segurança deve considerar todo o contexto operacional do desmonte.

O ponto central é:

*menor SDoB representa menor confinamento relativo e maior tendência de lançamento.*

Portanto, o modelo reforça uma mensagem essencial do curso: controlar o flyrock começa por compreender e controlar o confinamento da carga explosiva.

## 9.3.4 Modelo Terrock (Richards e Moore)

O modelo Terrock, desenvolvido e aplicado por Richards e Moore, pertence à classe dos modelos semi-empíricos avançados. Ele representa uma das abordagens mais utilizadas em estudos práticos de flyrock porque relaciona a distância de lançamento às condições de confinamento do desmonte, especialmente afastamento, altura de tampão, carga linear de explosivo e uma constante empírica de calibração local.

Diferentemente de modelos que consideram apenas o diâmetro do furo ou uma velocidade inicial assumida, o modelo Terrock parte da lógica de que o flyrock está diretamente associado ao desequilíbrio entre energia explosiva disponível e resistência oferecida pelo maciço rochoso. Assim, pequenas reduções no afastamento efetivo ou na altura real de tampão podem provocar aumentos expressivos na distância estimada de lançamento.

Outro diferencial importante é que o modelo pode ser aplicado considerando os três principais mecanismos de flyrock:

• **face burst**, associado à projeção pela face livre, normalmente controlado pelo afastamento efetivo

• **cratering**, associado à ejeção pela região do topo do furo, normalmente controlado pela altura de tampão e pelas condições do colar

• **rifling**, associado à ejeção de material pelo furo, normalmente ligado à liberação rápida de gases e material de tamponamento

Em termos práticos, a análise de **face burst** é especialmente relevante para avaliar lançamentos à frente da bancada. A análise de **cratering** é muito útil para avaliar projeções para trás, para os lados ou em qualquer direção ao redor do topo do furo. Já a análise de **rifling** é importante para avaliar ejeções de alta trajetória, incluindo a possibilidade de estimar a altura máxima alcançada pelo material lançado.

**Formulação para face burst**

Para projeção pela face livre, a distância máxima pode ser estimada por:

$$L_{max} = \frac{k^2}{g} \cdot \left(\frac{\sqrt{m}}{B}\right)^{2.6}$$

Onde:

• Lmax = alcance máximo estimado (m)

• k = constante empírica do local

• g = aceleração da gravidade, aproximadamente 9,81 m/s²

• m = carga linear de explosivo (kg/m)

• B = afastamento efetivo (m)

Essa formulação é usada quando o mecanismo dominante de projeção está associado ao baixo confinamento na direção da face livre. Portanto, é particularmente importante na análise de lançamento para frente da bancada.

**Formulação para cratering**

Para projeção associada ao topo do furo, por crateramento, utiliza-se:

$$L_{max} = \frac{k^2}{g} \cdot \left(\frac{\sqrt{m}}{S.H.}\right)^{2.6}$$

Onde:
• $S.H.$= altura de tampão (m)

Nesse caso, o controle principal deixa de ser o afastamento frontal e passa a ser o confinamento superior da carga. Essa formulação é especialmente importante quando se deseja avaliar lançamento para trás, para os lados ou em qualquer direção a partir da região do colar do furo, principalmente quando há tampão insuficiente, material de tampão inadequado, ponteamento, colar fraturado ou rocha enfraquecida.

**Formulação para rifling**

Para ejeção pelo furo, algumas aplicações utilizam a mesma base da equação associada ao tampão, incorporando o ângulo de lançamento:

$$L_{max} = \frac{k^2}{g} \cdot \left(\frac{\sqrt{m}}{S.H.}\right)^{2.6} . \text{sen}2\theta$$

Onde:

• θ = ângulo de lançamento considerado

Essa formulação permite estimar o alcance horizontal de material lançado em alta trajetória.

Na prática, o rifling é especialmente relevante quando há ejeção de material de tampão, fragmentos soltos ou gases canalizados pelo furo. Mesmo quando o alcance horizontal não é o maior entre os mecanismos, a altura

atingida pode representar risco para estruturas elevadas, redes elétricas, taludes superiores ou pessoas posicionadas em cotas diferentes. É bastante utilizado como referencia para detonações em áreas mais profundas e assim avaliar com maior precisão a distancias de risco para bancos superiores.

**Constante k**

A constante **k** representa o fator empírico de calibração local. Ela incorpora efeitos que não aparecem diretamente na equação, como tipo de rocha, resistência do maciço, grau de fraturamento, condições de confinamento, qualidade de execução e comportamento observado em campo.

Em aplicações práticas, valores próximos de **13,5** são frequentemente associados a rochas competentes mais brandas, enquanto valores próximos de **27** são associados a rochas competentes mais duras. No entanto, esses valores não devem ser usados de forma automática. O ideal é que o valor de **k** seja ajustado por calibração local, a partir de observações reais, registros de lançamentos e histórico operacional.

**Fatores de segurança**

Um ponto essencial na aplicação do modelo Terrock é que o valor calculado representa uma **distância estimada de lançamento**, e não necessariamente a distância final de afastamento a ser adotada em campo.

Os próprios relatórios técnicos da Terrock recomendam a aplicação de fatores de segurança para transformar a distância estimada em distância de afastamento ou zona de evacuação. Como referência prática, são citados fatores usuais de:

• **FS = 2** para equipamentos e instalações

• **FS = 4** para pessoas

Assim:

**Distância de afastamento = Lmax · FS**

Essa etapa é fundamental porque o modelo continua sendo empírico e depende da qualidade dos dados de entrada. O fator de segurança busca cobrir incertezas como erros de carregamento, variações no tampão real, fraturas, vazios, rocha enfraquecida no colar, desvios de perfuração, variações de afastamento e diferenças entre o plano projetado e a execução real.

**Exemplo de cálculo para os três mecanismos**

Considere um mesmo desmonte com os seguintes dados:

• carga linear: **m = 10 kg/m**

• afastamento efetivo: **B = 2,5 m**

• altura de tampão: **SH = 3,0 m**

• constante empírica: **k = 27** (Considerando uma rocha dura e um cenário de risco alto)

• aceleração da gravidade: **g = 9,81 m/s²**

• ângulo de lançamento para rifling: **θ = 75°**

**1. Face burst**

Para lançamento à frente da face:

$Lmax = (k^2 / g) \cdot (\sqrt{m} / B)^{2,6}$

$Lmax = (27^2 / 9,81) \cdot (\sqrt{10} / 2,5)^{2,6}$

$Lmax \approx 137$ m

Aplicando fatores de segurança:

• para equipamentos e instalações: $137 \cdot 2 \approx 274$ m

• para pessoas: $137 \cdot 4 \approx 548$ m

**2. Cratering**

Para lançamento associado ao topo do furo:

$L_{max} = (k^2 / g) \cdot (\sqrt{m} / SH)^{2,6}$

$L_{max} = (27^2 / 9{,}81) \cdot (\sqrt{10} / 3{,}0)^{2,6}$

$L_{max} \approx 85$ m

Aplicando fatores de segurança:

• para equipamentos e instalações: $85 \cdot 2 \approx 170$ m

• para pessoas: $85 \cdot 4 \approx 340$ m

**3. Rifling**

Para ejeção pelo furo, considerando ângulo de lançamento de 75°:

$L_{max} = (k^2 / g) \cdot (\sqrt{m} / SH)^{2,6} \cdot \text{sen } 2\theta$

Como sen 150° = 0,5:

$L_{max} \approx 85 \cdot 0{,}5$

$L_{max} \approx 43$ m

Aplicando fatores de segurança:

• para equipamentos e instalações: $43 \cdot 2 \approx 86$ m

• para pessoas: $43 \cdot 4 \approx 172$ m

**Interpretação do exemplo**

O exemplo mostra que, para o mesmo desmonte, diferentes mecanismos podem gerar diferentes distâncias de lançamento. Nesse cenário, o maior alcance horizontal estimado foi obtido pelo **face burst**, com aproximadamente **137 m**, porque o afastamento efetivo considerado foi menor que a altura de tampão.

O **cratering** apresentou alcance estimado de aproximadamente **85 m**, representando a possibilidade de projeção em qualquer direção a partir do topo do furo. Já o **rifling** apresentou menor alcance horizontal, mas indicou altura máxima aproximada de **40 m**, o que pode ser relevante quando existem estruturas elevadas, redes aéreas ou áreas em cotas superiores.

Em uma análise de risco, o profissional pode avaliar separadamente cada mecanismo, considerando a direção e o tipo de risco analisado. Por exemplo:

• para risco à frente da bancada, o **face burst** tende a ser a análise mais importante

• para risco lateral ou para trás, o **cratering** pode ser mais representativo

• para risco de ejeção vertical ou estruturas elevadas, o **rifling** deve ser considerado

Quando a intenção é definir uma zona de exclusão conservadora, pode-se adotar o maior valor calculado entre os mecanismos relevantes e aplicar o fator de segurança adequado. No exemplo, se o objetivo for proteger pessoas, o maior valor foi o do **face burst**, resultando em uma distância de afastamento estimada de aproximadamente **548 m**.

**Quando funciona (aplicação recomendada)**

O modelo Terrock é indicado para análises mais completas de flyrock, principalmente quando se deseja avaliar a influência do afastamento, do tampão e da carga linear sobre o alcance estimado.

O modelo é especialmente útil para:

• avaliar cenários de **face burst**, **cratering** e **rifling**

• comparar diferentes valores de afastamento e tampão

• estudar a sensibilidade do alcance à carga linear

• apoiar análises de zona de exclusão com calibração local

• avaliar desmontes próximos a estruturas, equipamentos, vias ou áreas sensíveis

• definir distâncias de afastamento com aplicação de fatores de segurança

**Quando NÃO funciona (limitações)**

Apesar de ser mais completo que modelos puramente balísticos ou fórmulas muito simplificadas, o modelo Terrock continua sendo empírico. Ele depende fortemente da escolha da constante **k**, da qualidade dos dados de entrada e da correta identificação do mecanismo dominante.

O modelo pode apresentar desvios importantes quando aplicado sem calibração local, em ambientes com alta heterogeneidade geológica, variações significativas de face, presença de vazios, fraturas abertas, colar muito danificado, erros de perfuração, falhas de carregamento, ponteamento do tampão ou execução fora do plano.

Por isso, os resultados devem ser interpretados como apoio à decisão técnica, e não como garantia absoluta. A aplicação do modelo deve ser acompanhada por inspeção de campo, controle operacional rigoroso, validação dos dados reais do desmonte e uso de fatores de segurança compatíveis com o nível de risco envolvido.

**Fechamento**

O modelo Terrock é uma ferramenta poderosa porque permite transformar condições de confinamento em estimativas práticas de alcance. Seu maior valor está em mostrar que o flyrock pode ser analisado de forma sistemática, considerando mecanismos específicos e parâmetros operacionais mensuráveis.

No entanto, sua aplicação exige maturidade técnica. O profissional deve identificar o mecanismo mais provável, calcular os cenários relevantes, aplicar fatores de segurança e interpretar os resultados à luz das condições reais do desmonte. Dessa forma, o modelo deixa de ser apenas uma equação e passa a ser uma ferramenta de gestão do risco de flyrock.

## 9.3.5 Síntese dos modelos clássicos

Os modelos clássicos de predição mostram a evolução da engenharia de desmonte na tentativa de compreender e estimar o flyrock. Cada modelo interpreta o fenômeno a partir de uma lógica própria e, por isso, deve ser utilizado de acordo com o tipo de análise que se deseja realizar.

De forma geral:

• o modelo balístico explica a trajetória do fragmento a partir da velocidade inicial e do ângulo de lançamento, mas não explica, por si só, como essa velocidade foi gerada

• o modelo de Lundborg fornece uma referência histórica e conservadora para o potencial de lançamento, relacionando diâmetro do furo, carga específica, fragmento ótimo e alcance máximo prático

• o modelo Richards e Moore/Terrock relaciona lançamento com confinamento, carga linear, afastamento, tampão e constante de local, permitindo analisar mecanismos como face burst, cratering e rifling

• o modelo de McKenzie incorpora o SDoB e destaca a importância do confinamento relativo, considerando também o diâmetro do furo e o fator de forma do fragmento

Esses modelos não devem ser vistos como concorrentes absolutos, mas como ferramentas com enfoques diferentes. Cada um ajuda a enxergar uma parte do problema. O modelo balístico mostra a importância da velocidade inicial, do ângulo e da geometria da trajetória. Lundborg evidencia o potencial extremo do lançamento e a influência do tamanho do fragmento. Terrock destaca a sensibilidade do flyrock ao afastamento, ao tampão e à calibração local. McKenzie reforça a importância do confinamento escalonado e permite avaliar como pequenas mudanças no SDoB podem alterar significativamente o alcance estimado.

Na prática, a aplicação responsável desses modelos exige:

• dados confiáveis de campo

• entendimento claro do mecanismo de flyrock analisado

• seleção adequada do modelo para cada situação

• calibração local sempre que possível

• aplicação de fatores de segurança compatíveis com o risco avaliado

• interpretação crítica dos resultados

A principal mensagem deste tópico é que a predição de flyrock não deve ser tratada como um cálculo mecânico, isolado e definitivo. Ela deve ser entendida como parte de um processo de gestão de risco, no qual os modelos matemáticos apoiam a análise, mas não substituem a engenharia, a inspeção de campo, a experiência operacional e a disciplina na execução do desmonte.

# 9.4 Bases físicas, variáveis e limitações dos modelos de predição de flyrock

Após a apresentação dos modelos clássicos, é fundamental compreender que essas formulações não surgem de forma isolada. Elas são construídas a partir de hipóteses físicas sobre como os fragmentos são gerados, acelerados e lançados no espaço.

De forma geral, todos os modelos de predição do flyrock partem de uma ideia central:

*fragmentos são acelerados por uma determinada quantidade de energia, lançados com uma velocidade e ângulo, e seguem uma trajetória que pode ser estimada.*

No entanto, essa simplificação esconde um nível significativo de complexidade. Os parâmetros que definem esse lançamento são difíceis de medir, altamente variáveis e fortemente dependentes das condições reais do desmonte.

Além disso, os modelos precisam simplificar a realidade para se tornarem aplicáveis, o que inevitavelmente introduz limitações.

Assim, este tópico tem um duplo objetivo:

• compreender as bases físicas que sustentam os modelos

• e desenvolver um olhar crítico sobre suas limitações

Esse entendimento é essencial, pois permite interpretar corretamente os resultados e evitar o uso inadequado das ferramentas de predição.

## 9.4.1 Velocidade inicial dos fragmentos

A velocidade inicial é o parâmetro mais crítico na predição do flyrock, pois define a energia cinética com que o fragmento é lançado e influencia diretamente o alcance da trajetória.

Pequenas variações na velocidade podem resultar em grandes diferenças na distância percorrida, o que torna esse parâmetro extremamente sensível.

No entanto, sua estimativa é uma das maiores dificuldades dos modelos, pois depende de fatores como:

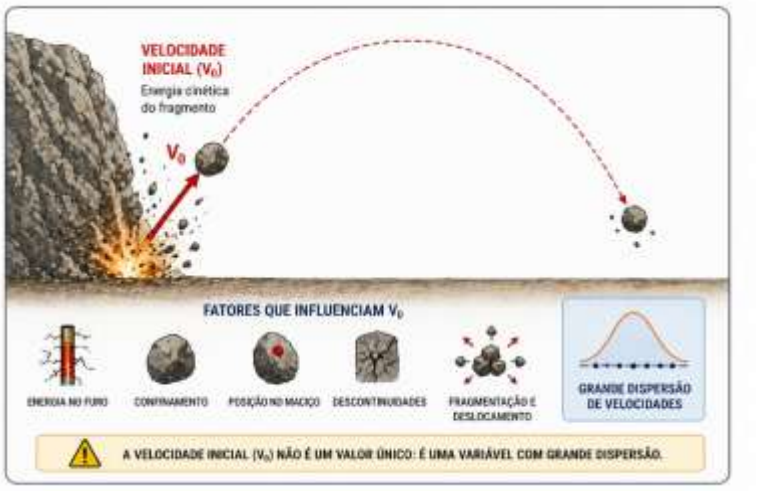
• distribuição de energia no furo

• nível de confinamento

• posição do fragmento no maciço

• presença de descontinuidades

•interação entre fragmentação e deslocamento



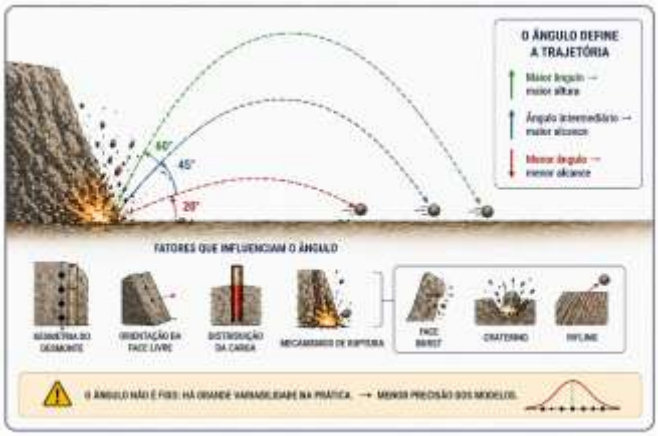

Além disso, diferentes fragmentos, dentro de um mesmo desmonte, podem ser lançados com velocidades completamente distintas.

Isso significa que a velocidade inicial não é um valor único, mas sim uma variável com grande dispersão, o que limita diretamente a precisão dos modelos.

## 9.4.2 Ângulo de lançamento

O ângulo de lançamento define a forma da trajetória do fragmento, influenciando diretamente a altura máxima e o alcance horizontal.

Em modelos simplificados, é comum assumir ângulos fixos ou valores típicos. No entanto, na prática, esse ângulo depende de:




- geometria do desmonte
- orientação da face livre
- distribuição da carga
- mecanismos de ruptura (face burst, cratering, rifling)

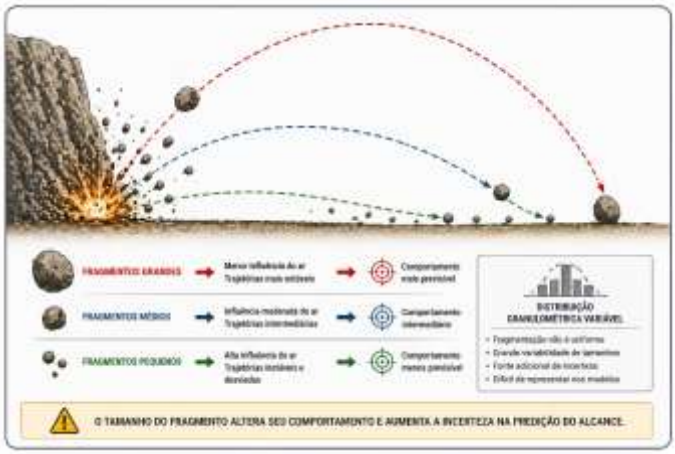
Cada mecanismo tende a gerar padrões distintos de lançamento, resultando em grande variabilidade.

Assim como a velocidade, o ângulo não é um parâmetro fixo, o que reduz a capacidade dos modelos de representar com precisão o comportamento real.

## 9.4.3 Tamanho e comportamento dos fragmentos

O tamanho do fragmento influencia diretamente seu comportamento durante a trajetória.

Fragmentos maiores tendem a:




- sofrer menor influência da resistência do ar
- apresentar trajetórias mais estáveis

Fragmentos menores:

- são mais sensíveis à aerodinâmica
- podem sofrer desvios significativos
- apresentam comportamento menos previsível

A dificuldade está no fato de que:

- a fragmentação não é uniforme
- a distribuição granulométrica é variável
- e é difícil representar essa variabilidade nos modelos

Isso introduz uma fonte adicional de incerteza que raramente é totalmente capturada.

## 9.4.4 Geometria do desmonte

A geometria do desmonte controla como a energia é distribuída e como os fragmentos são lançados.

Parâmetros como:




- afastamento
- espaçamento
- altura de bancada
- inclinação dos furos
- altura do tampão

influenciam diretamente:

- o nível de confinamento
- a direção do deslocamento

• os mecanismos de ruptura

Uma geometria bem definida favorece um comportamento mais previsível, enquanto irregularidades podem gerar:

• zonas de baixa contenção

• concentrações locais de energia

• caminhos preferenciais de ejeção

Isso reforça que o flyrock é altamente sensível à qualidade do projeto e da execução.

## 9.4.5 Relação entre carga explosiva e confinamento

A relação entre carga explosiva e confinamento representa o núcleo físico do problema do flyrock. A carga define a energia disponível, enquanto o confinamento define a capacidade de reter e direcionar essa energia.

Quando há equilíbrio:

• a energia é utilizada para fragmentação e deslocamento controlado

Quando há desequilíbrio:

• a energia encontra rotas de fuga

• ocorre ejeção de fragmentos

• aumenta o risco de flyrock

Essa relação depende de:

• altura da coluna explosiva

• tipo de explosivo

• qualidade do tampão

• geometria do desmonte

• características do maciço

Os modelos tentam representar essa relação, mas sempre de forma simplificada.

## 9.4.6 Limitações fundamentais dos modelos

Apesar de sua utilidade, os modelos apresentam limitações importantes que devem ser claramente compreendidas.

A primeira limitação está nas **premissas simplificadas**. Os modelos frequentemente assumem condições ideais, como uniformidade do maciço e distribuição homogênea de energia, o que raramente ocorre na prática.

Outra limitação importante é o uso de **cinemática idealizada**, onde o fragmento é tratado como um projétil regular, sem considerar rotação, interação entre fragmentos ou irregularidades de forma.

Além disso, há grande dificuldade em representar a **resistência do ar**, que depende de fatores altamente variáveis, como forma e orientação do fragmento.

A **variabilidade geológica** é outro fator crítico. Fraturas, falhas e heterogeneidades influenciam diretamente o comportamento do desmonte, mas são difíceis de quantificar e representar nos modelos.

Por fim, destaca-se a **necessidade de calibração local**. Sem ajuste com dados reais, os modelos podem produzir resultados pouco representativos da realidade operacional.

## 9.4.7 Síntese e interpretação crítica

A análise das bases físicas e das limitações dos modelos permite compreender que a maior dificuldade da predição do flyrock não está apenas na formulação matemática, mas na representação confiável das variáveis envolvidas.

Fica evidente que:

• os modelos são construídos sobre variáveis altamente incertas

• a realidade do desmonte é mais complexa que as equações

• e a variabilidade do sistema é inevitável

Por essa razão:

*modelos devem ser utilizados como ferramentas de apoio à decisão, e não como fontes de respostas absolutas.*

Seu uso adequado exige:

• interpretação crítica

• conhecimento das hipóteses envolvidas

• e integração com dados reais e experiência de campo

Essa compreensão abre caminho para uma abordagem mais adequada do fenômeno, baseada não em valores únicos, mas em variabilidade e probabilidade.

No próximo tópico, será apresentada a abordagem probabilística do flyrock, permitindo avançar na análise do risco de forma mais compatível com a realidade operacional.

## 9.5 Flyrock como fenômeno probabilístico e fundamentos da modelagem probabilística

Após compreender as bases físicas e as limitações dos modelos clássicos, torna-se necessário avançar para uma forma mais adequada de interpretar o flyrock: como um fenômeno probabilístico.

Essa mudança de abordagem representa um avanço importante na maturidade técnica da análise.

Nos modelos clássicos, busca-se estimar um valor único, como uma distância máxima de lançamento. No entanto, como já discutido, o flyrock é resultado de um sistema:

• altamente variável

• sensível a pequenas mudanças

• influenciado por múltiplos fatores difíceis de medir

Dessa forma, representar o fenômeno por um único valor tende a ser insuficiente.

A abordagem probabilística parte de um princípio diferente:

*em vez de prever um único resultado, busca-se entender o conjunto de resultados possíveis.*

Isso significa reconhecer que:

• os parâmetros variam

• os resultados variam

• e a análise deve ser feita em termos de probabilidade

Essa forma de interpretação é mais coerente com a realidade do desmonte e mais adequada para a gestão de risco.

### 9.5.1 Variabilidade como característica fundamental do sistema

Um dos fundamentos da abordagem probabilística é reconhecer que os parâmetros do sistema não são fixos.

Variáveis como:

• velocidade inicial

• ângulo de lançamento

• tamanho do fragmento

• nível de confinamento

não possuem um único valor representativo.

Na prática:

• cada furo pode apresentar comportamento distinto

• diferentes regiões do maciço respondem de forma diferente

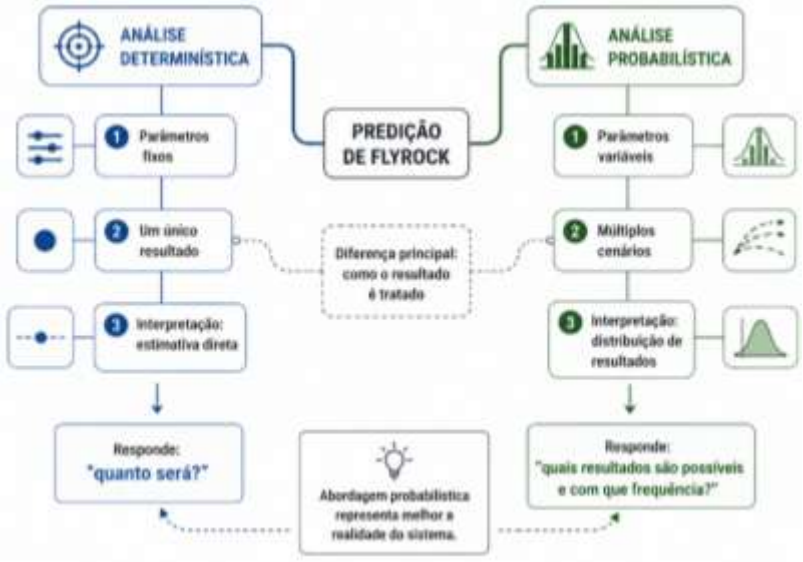
• cada fragmento pode ser lançado sob condições específicas

Essa variabilidade é inerente ao sistema e não pode ser eliminada, apenas compreendida e gerenciada.

O flyrock deve ser entendido como um conjunto de possibilidades, e não como um único resultado.

### 9.5.2 Diferença entre abordagem determinística e probabilística

A principal diferença entre os modelos clássicos e a abordagem probabilística está na forma como o resultado é tratado.




Nos modelos determinísticos:

• busca-se um único valor de saída

• assume-se um conjunto fixo de parâmetros

• o resultado é interpretado como uma estimativa direta

Na abordagem probabilística:

• os parâmetros são tratados como variáveis

• múltiplos cenários são considerados

• o resultado é uma distribuição de possíveis valores

Ou seja:

*o modelo deixa de responder "quanto será?"*

*e passa a responder "quais resultados são possíveis e com que frequência?"*

Essa mudança é fundamental para representar melhor a realidade do sistema.

## 9.5.3 Representação por distribuições e cenários

Ao adotar uma abordagem probabilística, os parâmetros passam a ser representados por distribuições, e não por valores únicos.

Isso significa considerar que:

• a velocidade inicial varia dentro de um intervalo

• o ângulo pode assumir diferentes valores

• o tamanho dos fragmentos segue uma distribuição

Com isso:

• o modelo passa a avaliar múltiplas combinações possíveis

• a análise se torna mais realista

• a incerteza passa a ser incorporada

Em vez de um único resultado, obtém-se um conjunto de cenários possíveis.

## 9.5.4 Conceito de excedência e análise de risco

Um dos conceitos mais importantes da abordagem probabilística é o de excedência.

Excedência refere-se à probabilidade de um fragmento ultrapassar uma determinada distância.

Por exemplo:

• qual a probabilidade de fragmentos ultrapassarem 300 m?

• qual a probabilidade de atingir uma estrutura específica?

Esse conceito é fundamental porque:

• conecta diretamente a modelagem com a segurança

• permite definir critérios objetivos para zonas de exclusão

• apoia decisões baseadas em risco

Assim, a pergunta central deixa de ser:

*"qual é a distância máxima?"*

e passa a ser:

*"qual é a probabilidade de ultrapassar determinada distância?"*

## 9.5.5 Fundamentos da modelagem probabilística

Os modelos probabilísticos são baseados na ideia de avaliar múltiplas combinações possíveis de parâmetros.

De forma geral, sua lógica envolve:

• tratar os parâmetros como variáveis

• combinar diferentes valores possíveis

• simular múltiplos cenários

• analisar a frequência dos resultados

O objetivo não é prever exatamente o que acontecerá, mas entender:

• o intervalo de resultados possíveis

• a dispersão dos valores

• os cenários mais críticos

Isso torna a análise mais alinhada com a realidade e mais útil para a tomada de decisão.

## 9.5.6 Uso de cenários de worst case (pior caso) razoavelmente previsível

Na prática operacional, nem sempre é possível realizar análises probabilísticas completas.

Nesses casos, uma abordagem bastante utilizada é a definição de cenários conservadores, conhecidos como:

*worst case ou pior cenário possível.*

Essa abordagem consiste em:

• identificar combinações de parâmetros que representem situações críticas

• mas que ainda sejam tecnicamente plausíveis

• evitando a adoção de extremos irreais

Por exemplo:

• velocidades elevadas dentro de um intervalo realista

• ângulos de lançamento mais desfavoráveis

• condições de menor confinamento

O objetivo é:

• estimar cenários de maior risco

• definir limites de segurança conservadores

• reduzir a probabilidade de subestimação do alcance do flyrock

Essa abordagem é amplamente utilizada porque:

• é prática

• não exige grande volume de dados

• permite decisões rápidas em campo

Embora não substitua uma análise probabilística completa, o worst case representa uma forma eficiente de incorporar conservadorismo técnico na tomada de decisão.

## 9.5.7 Aplicação prática e importância na engenharia

A abordagem probabilística, juntamente com o uso de cenários conservadores, representa uma evolução significativa na forma de lidar com o flyrock.

Ela permite:

• avaliar cenários extremos de forma estruturada

• reduzir a probabilidade de subestimação do risco

• definir zonas de exclusão mais consistentes

• apoiar decisões em ambientes de alta incerteza

Além disso, oferece uma alternativa mais robusta quando:

os dados são limitados

• o sistema apresenta alta variabilidade

• a precisão determinística é insuficiente

## 9.5.8 Síntese e interpretação

A interpretação do flyrock como fenômeno probabilístico representa uma evolução natural da engenharia de desmonte.

Ao longo deste tópico, foi possível compreender que:

• os parâmetros do sistema são variáveis

• os resultados não são únicos

• a análise deve considerar distribuições e cenários

Também ficou evidente que:

• a abordagem determinística é limitada quando utilizada isoladamente

• a probabilidade conecta modelagem e segurança

• e o worst case oferece uma alternativa prática e conservadora

Assim:

*o flyrock deve ser tratado como um problema de incerteza controlada, e não como um evento totalmente previsível.*

## 9.6 Simulação e softwares

Após compreender os métodos probabilísticos e a lógica da modelagem do flyrock, é importante aproximar o tema da prática industrial, onde softwares e ferramentas de simulação são cada vez mais utilizados como apoio à tomada de decisão.

Essas ferramentas representam uma evolução significativa na capacidade de análise, pois permitem:

- processar grande volume de dados,
- simular múltiplos cenários,
- visualizar resultados de forma estruturada,
- e integrar diferentes variáveis em um mesmo ambiente.

No entanto, é fundamental compreender que:

*softwares não substituem a engenharia.*

Eles ampliam a capacidade de análise, mas continuam dependentes de:

- qualidade dos dados de entrada,
- hipóteses adotadas,
- e interpretação dos resultados.

Este tópico tem como objetivo mostrar como essas ferramentas são utilizadas, quais são suas capacidades e, principalmente, quais são seus limites.

### 9.6.1 Uso de softwares de modelagem

Os softwares de modelagem do flyrock são utilizados para:

- estimar distâncias de projeção,
- simular trajetórias de fragmentos,
- avaliar diferentes cenários de desmonte,
- e apoiar a definição de zonas de segurança.



De forma geral, o funcionamento dessas ferramentas envolve:

- inserção de parâmetros de entrada, como geometria, carga e características do maciço,
- definição de hipóteses ou distribuições para variáveis críticas,
- processamento dos dados por meio de modelos matemáticos,
- e geração de resultados em forma de gráficos, mapas ou distribuições.

Esses softwares permitem explorar cenários de forma rápida e estruturada, o que seria difícil de realizar manualmente.

### 9.6.2 Ferramentas industriais

Na prática industrial, diferentes tipos de ferramentas podem ser utilizados para modelagem do flyrock, incluindo:

- softwares específicos de simulação de desmonte,

- ferramentas de análise probabilística,
- planilhas avançadas com modelos incorporados,
- e sistemas integrados de planejamento de mina.

Essas ferramentas são utilizadas em atividades como:

- planejamento de desmontes,
- análise de risco,
- definição de zonas de exclusão,
- avaliação de alternativas de projeto.

Na rotina operacional, o uso dessas ferramentas deve ser acompanhado por:

- verificação dos dados de entrada,
- análise crítica dos resultados,
- e comparação com histórico da operação.

## 9.6.3 Limites de confiabilidade

Um dos pontos mais importantes no uso de softwares é compreender seus limites de confiabilidade.

A sofisticação da ferramenta não elimina as incertezas do sistema.

Os principais fatores que limitam a confiabilidade incluem:

- incerteza nos parâmetros de entrada,
- simplificações nos modelos utilizados,
- dificuldade de representar a variabilidade geológica,
- limitações na representação da fragmentação e do lançamento.

Isso significa que:

- resultados aparentemente precisos podem não ser exatos,
- diferentes configurações podem gerar resultados distintos,
- e a interpretação dos resultados é tão importante quanto o cálculo em si.

Portanto, o uso do software deve sempre ser acompanhado de julgamento técnico.

## 9.6.4 Integração com vídeo e dados reais

Para que a modelagem tenha um maior valor prático, é essencial integrá-la com dados reais de campo.

Essa integração pode ser feita por meio de:

- vide análise de desmontes,
- medições de alcance de fragmentos,
- mapeamento de áreas atingidas,
- registros históricos da operação.

A comparação entre simulação e realidade permite:

- avaliar a qualidade do modelo,
- ajustar parâmetros,

- melhorar a confiabilidade das previsões.

Sem essa integração:

- o modelo permanece teórico,
- a precisão não é validada,
- e o risco de erro aumenta.

O valor do software não está apenas no cálculo, mas na forma como ele é utilizado e interpretado. Os softwares devem ser entendidos como ferramentas que operacionalizam os conceitos discutidos anteriormente, especialmente a variabilidade e a análise probabilística. No entanto, sua aplicação só se torna efetivamente confiável quando integrada com dados reais de campo.

# 9.7 Validação com dados reais

Após compreender o funcionamento dos modelos, suas bases físicas, limitações e o uso de ferramentas de simulação, chega-se a um ponto essencial para a aplicação prática da modelagem do flyrock:

*sem validação com dados reais, o modelo perde grande parte do seu valor.*

A modelagem, por si só, representa uma aproximação teórica do fenômeno, construída a partir de hipóteses e simplificações. Para que essa aproximação se torne útil na prática, é necessário confrontá-la com a realidade observada em campo, reduzindo as incertezas associadas ao sistema.

Esse processo envolve:

- comparar resultados estimados com eventos reais,
- ajustar parâmetros do modelo,
- e construir uma base de dados que represente o comportamento local do desmonte.

A validação transforma o modelo de uma ferramenta genérica em uma ferramenta aplicada à realidade específica da operação.

Ao longo deste tópico, será desenvolvido o entendimento de que a qualidade da modelagem depende diretamente da qualidade e da consistência dos dados utilizados.

## 9.7.1 Importância do histórico da mina

O histórico da mina é uma das fontes mais valiosas para a modelagem aplicada do flyrock.

Ao longo do tempo, a operação acumula informações sobre:

- comportamento dos desmontes,
- eventos de projeção,
- condições geológicas,
- ajustes realizados no projeto e na execução.

Esse conjunto de dados permite:

- identificar padrões recorrentes,
- compreender a variabilidade do sistema,
- melhorar a calibração dos modelos,
- e apoiar decisões futuras com base em evidência.

Operações que mantêm um histórico bem estruturado possuem maior capacidade de:

- prever cenários,
- reduzir incertezas,
- e aumentar a segurança.

## 9.7.2 Medições de campo

As medições de campo são fundamentais para transformar observações em dados utilizáveis.

Essas medições podem incluir:

- distância de projeção dos fragmentos,
- direção de lançamento,

- localização dos impactos,
- características dos fragmentos.

Para que esses dados sejam úteis, é importante que:

- sejam coletados de forma consistente,
- sejam registrados com precisão,
- e estejam associados às condições do desmonte.

A qualidade das medições influencia diretamente:

- a capacidade de calibração do modelo,
- a confiabilidade das análises,
- e a evolução do conhecimento técnico da operação.

## 9.7.3 Vídeo análise

A vídeo análise é uma das ferramentas mais valiosas para a validação do flyrock.

Por meio de registros visuais de desmontes, é possível:

- observar trajetórias de fragmentos,
- estimar ângulos de lançamento,
- analisar velocidades iniciais,
- identificar mecanismos de ejeção.

Com o uso de técnicas adequadas, os vídeos permitem:

- extrair informações quantitativas,
- comparar comportamento real com o previsto,
- e identificar padrões de lançamento.

Além disso, a vídeo análise contribui para:

- treinamento de equipes,
- revisão de eventos,
- e melhoria contínua do controle do desmonte.

## 9.7.4 Calibração

A calibração é o processo de ajuste do modelo para que ele represente melhor a realidade local.

Esse ajuste envolve:

- adaptar parâmetros do modelo com base em dados observados,
- corrigir estimativas de velocidade, ângulo e alcance,
- incorporar características específicas do maciço e da operação.

Sem calibração:

- o modelo permanece genérico,
- os resultados podem não refletir o comportamento real,
- e a confiabilidade da predição é reduzida.

Com calibração:

- o modelo passa a representar melhor a operação,
- as estimativas tornam-se mais consistentes,
- e a tomada de decisão ganha maior segurança.

A calibração é o elemento que transforma a modelagem de uma ferramenta teórica em uma ferramenta operacional, permitindo que os resultados sejam utilizados com maior confiança na tomada de decisão.

## 9.7.5 Footprint

O footprint representa o mapeamento das áreas efetivamente atingidas por fragmentos após o desmonte.

Esse mapeamento permite:

- identificar a distribuição espacial do flyrock,
- determinar distâncias máximas e padrões de dispersão,
- comparar resultados entre diferentes desmontes.

O footprint é uma ferramenta importante porque:

- fornece evidência direta do comportamento do sistema,
- permite validar ou ajustar modelos de predição,
- e contribui para a definição de zonas de segurança mais realistas.

Além disso, o registro sistemático de footprints ao longo do tempo fortalece a base de dados da operação.

# 9.8 Aplicação prática da predição na definição de zona de exclusão (Cerco de área)

Após compreender os mecanismos de geração do flyrock, suas bases físicas, os modelos de predição e a abordagem probabilística, torna-se possível avançar para a aplicação prática mais relevante de todo esse conhecimento:

*a definição da zona de exclusão.*

A zona de exclusão, ou cerco de área, representa a principal medida de controle de risco associada ao flyrock. É por meio dela que se estabelece o limite dentro do qual não deve haver presença de pessoas, equipamentos ou estruturas expostas durante a detonação.

Diferentemente do que muitas vezes se assume na prática, a definição dessa zona não deve ser baseada em valores fixos ou regras genéricas.

Ela deve ser construída a partir de uma análise técnica que considere:

• comportamento esperado do desmonte

• variabilidade do sistema

• histórico operacional

• nível de risco aceitável

Nesse contexto, a predição do flyrock deixa de ser um exercício teórico e passa a ser uma ferramenta diretamente aplicada à segurança operacional.

## 9.8.1 Objetivo da zona de exclusão

O objetivo principal da zona de exclusão é garantir que, mesmo em cenários desfavoráveis, não haja exposição a fragmentos projetados.

Isso significa que sua definição deve considerar:

• não apenas o comportamento médio do sistema

• mas também cenários extremos plausíveis

A zona de exclusão deve ser capaz de:

• proteger pessoas

• evitar danos a equipamentos

• preservar estruturas

• reduzir riscos operacionais e legais




Em termos práticos, trata-se de transformar incerteza em controle.

## 9.8.2 Base técnica para definição da distância

A definição da distância da zona de exclusão deve ser baseada em múltiplas fontes de informação.

Entre as principais, destacam-se:

• modelos de predição (determinísticos e semi-empíricos)

• análises probabilísticas

• cenários de worst case razoavelmente previsível

• dados históricos da operação

• medições reais de campo

Cada uma dessas fontes contribui de forma complementar:

• os modelos fornecem uma estimativa inicial

• a abordagem probabilística incorpora a variabilidade

• o worst case introduz conservadorismo técnico

• os dados reais validam e ajustam as estimativas

A zona de exclusão não deve ser baseada em um único critério, mas na integração dessas informações.

## 9.8.3 Uso da predição na definição da zona

Os modelos de predição devem ser utilizados como ferramentas de apoio à definição da zona de exclusão, e não como valores absolutos.

Na prática, isso significa que:

• o resultado do modelo não deve ser adotado diretamente

• deve ser interpretado dentro do contexto do desmonte

• deve ser ajustado com base em incertezas e variabilidade

Por exemplo:

• uma distância estimada de 250 m não significa que o risco termina exatamente nesse ponto

• ela representa uma referência técnica que deve ser avaliada criticamente

A decisão final deve sempre considerar margens de segurança.

## 9.8.4 Critérios de definição da zona de exclusão

A definição da zona de exclusão deve considerar critérios técnicos claros e consistentes.

Entre os principais critérios, destacam-se:

• nível de energia do desmonte

• grau de confinamento

• geometria do projeto

• proximidade de estruturas e pessoas

• histórico de eventos anteriores

• nível de incerteza associado

Além disso, é importante considerar:

• criticidade da área (presença humana vs área isolada)

• tipo de operação (produção, desmonte secundário, obras civis)

• condições específicas do maciço

Quanto maior a incerteza ou criticidade, maior deve ser o conservadorismo adotado.

## 9.8.5 Integração com abordagem probabilística

A abordagem probabilística permite dar um passo além na definição da zona de exclusão.

Em vez de trabalhar apenas com uma distância única, passa-se a considerar:

• probabilidades de excedência

• distribuição de possíveis alcances

• cenários de maior risco

Isso permite, por exemplo:

• definir zonas associadas a níveis de probabilidade

• avaliar o risco de atingir áreas específicas

• tomar decisões mais fundamentadas

Essa abordagem é especialmente útil em operações com maior complexidade ou sensibilidade.

## 9.8.6 Uso de cenários conservadores (worst case)

Na prática, nem sempre é possível realizar análises probabilísticas completas.

Nesses casos, a definição da zona de exclusão pode ser baseada em cenários conservadores, conhecidos como:

*worst case razoavelmente previsível*

Essa abordagem consiste em:

• considerar condições desfavoráveis, mas plausíveis

• combinar parâmetros críticos (velocidade, ângulo, confinamento)

• estimar o alcance em cenários de maior risco

O objetivo é:

• evitar subestimação do risco

• garantir margens de segurança adequadas

• permitir decisões rápidas e seguras

Trata-se de uma ferramenta prática para incorporar conservadorismo técnico na operação.

## 9.8.7 Importância da validação e ajuste contínuo

A zona de exclusão não deve ser tratada como um valor fixo e permanente.

Ela deve ser constantemente revisada com base em:

• novos dados de campo

• eventos observados

• alterações no projeto

• mudanças nas condições operacionais

A validação contínua permite:

• melhorar a confiabilidade das estimativas

• reduzir incertezas ao longo do tempo

• adaptar a zona à realidade da operação

A definição da zona de exclusão é um processo dinâmico.

Assim:

*a segurança no desmonte não depende apenas de prever o flyrock, mas de definir corretamente até onde o risco é aceitável.*

# 9.9 Fechamento do módulo e consolidação da lógica da modelagem

Ao longo deste módulo, avançamos de forma estruturada desde os modelos clássicos até as abordagens probabilísticas, passando pelas bases físicas, limitações, uso de softwares, validação com dados reais e, principalmente, pela aplicação prática na definição da zona de exclusão.

Esse percurso teve um objetivo claro: mostrar que a modelagem do flyrock é uma ferramenta poderosa, mas que precisa ser compreendida com maturidade técnica.

Diferentemente de outros fenômenos mais controláveis, o flyrock envolve:

• alta variabilidade

• sensibilidade a pequenas mudanças

• forte dependência de condições locais

Por isso, qualquer tentativa de previsão deve ser entendida como uma aproximação, e não como uma resposta exata.

Neste fechamento, consolidamos os principais aprendizados e reforçamos a forma correta de interpretar e utilizar a modelagem dentro da engenharia de desmonte.

## 9.9.1 Síntese do valor e dos limites dos modelos

Os modelos de predição do flyrock têm um papel importante na engenharia, pois permitem:

• organizar o raciocínio técnico

• estruturar cenários de análise

• apoiar a definição de zonas de segurança

• orientar decisões de projeto e operação

No entanto, ao longo do módulo, ficou evidente que esses modelos possuem limitações inerentes.

Eles dependem de:

• premissas simplificadas

• estimativas de parâmetros difíceis de medir

• representação parcial do comportamento real do sistema

Além disso:

• a variabilidade do sistema impede previsões exatas

• diferentes condições podem levar a resultados distintos mesmo com parâmetros semelhantes

Dessa forma, o papel real dos modelos não é prever com precisão absoluta, mas:

*apoiar decisões dentro de um cenário de incerteza.*

## 9.9.2 O que o aluno deve ter entendido ao final do módulo

Ao concluir este módulo, o aluno deve ter desenvolvido uma visão mais madura sobre a modelagem do flyrock.

É fundamental que tenha compreendido que:

• prever flyrock é lidar com variabilidade e incerteza

• modelos ajudam, mas não substituem o julgamento técnico

• abordagens probabilísticas são mais coerentes com a natureza do fenômeno

• a qualidade da modelagem depende diretamente da qualidade dos dados

• calibração e validação com dados reais são indispensáveis

Além disso, deve estar claro que:

• a modelagem é parte de um processo maior de gestão de risco

• a definição da zona de exclusão é sua principal aplicação prática

• cenários de worst case são ferramentas importantes quando há limitação de dados

O valor da modelagem está em orientar decisões mais seguras, e não em fornecer respostas definitivas.

## 9.9.3 Consolidação da aplicação prática

A evolução apresentada neste módulo mostra que o conhecimento sobre flyrock só se torna completo quando aplicado à tomada de decisão em campo.

Nesse contexto, a definição da zona de exclusão representa a síntese de todo o aprendizado, pois integra:

• fundamentos físicos

• comportamento do sistema

• modelos de predição

• variabilidade e incerteza

• dados reais da operação

A zona de exclusão não deve ser vista como um valor fixo, mas como o resultado de uma análise técnica que considera:

• o comportamento esperado do desmonte

• os cenários de risco

• o nível de conservadorismo necessário

É nesse ponto que a engenharia transforma conhecimento em segurança.

Com isso, encerramos este módulo consolidando a modelagem como um elemento de apoio à engenharia, sempre integrada ao conhecimento prático, à leitura de campo e à responsabilidade técnica que orienta todo o controle do flyrock.

# Módulo 10. Inovações Tecnológicas e Futuras Tendências

## 10.1 Abertura do módulo e evolução tecnológica aplicada ao flyrock

Ao longo dos módulos anteriores, foi possível construir uma base sólida sobre o fenômeno do flyrock, compreendendo seus mecanismos, suas causas, seus fatores de controle e as ferramentas disponíveis para sua predição.

No Módulo 9, avançamos na discussão sobre modelagem, destacando tanto o valor quanto as limitações dos modelos, e reforçando que a previsão do flyrock é sempre uma aproximação, dependente de dados, calibração e julgamento técnico.

A partir desse ponto, surge um questionamento natural:

*como a tecnologia pode ajudar a melhorar essa capacidade de análise, previsão e controle?*

É exatamente essa transição que marca o início deste módulo.

O estudo do flyrock, que historicamente esteve fortemente baseado em observação de campo, experiência prática e interpretação empírica, vem passando por uma transformação significativa com o avanço das tecnologias disponíveis.

Hoje, é possível:

- observar fenômenos em escala de tempo muito menor,
- registrar eventos com maior precisão,
- coletar e armazenar grandes volumes de dados,
- simular cenários com maior rapidez,
- e integrar diferentes fontes de informação em uma mesma análise.

No entanto, é fundamental estabelecer desde o início um princípio central que deve orientar todo este módulo:

*a tecnologia amplia a capacidade de análise, mas não substitui a engenharia.*

Ferramentas mais avançadas não eliminam:

- a variabilidade do fenômeno,
- as incertezas do sistema,
- nem a necessidade de interpretação crítica.

Pelo contrário, em muitos casos, aumentam a responsabilidade do profissional, que passa a lidar com maior volume de informação e maior complexidade de análise.

Assim, este módulo tem como objetivo apresentar as principais inovações tecnológicas aplicadas ao estudo do flyrock, sempre sob uma perspectiva técnica, crítica e aplicada.

### 10.1.1 Por que a tecnologia ganhou importância no estudo do flyrock

O aumento da importância da tecnologia no estudo do flyrock está diretamente relacionado à evolução das exigências de segurança, controle e rastreabilidade nas operações de desmonte.

Com o tempo, tornou-se evidente que:

- abordagens exclusivamente empíricas eram insuficientes para lidar com cenários mais complexos,
- a proximidade crescente entre operações e áreas sensíveis exigia maior controle,

- e a necessidade de justificar tecnicamente decisões operacionais se tornou mais relevante.

Além disso, a própria natureza do flyrock, caracterizada por:

- alta variabilidade,
- sensibilidade a pequenas mudanças,
- e potencial de consequências severas,

impulsionou a busca por ferramentas que permitissem:

- observar melhor o fenômeno,
- registrar eventos com maior precisão,
- e apoiar decisões com base em dados mais consistentes.

Nesse contexto, a tecnologia surge como uma resposta à necessidade de:

*reduzir incertezas e aumentar o nível de controle operacional.*

## 10.1.2 Evolução da observação empírica para a análise instrumentada

Tradicionalmente, o estudo do flyrock era baseado principalmente em:

- observação visual,
- relatos de campo,
- e experiência acumulada dos profissionais.

Essa abordagem continua sendo extremamente importante, mas possui limitações evidentes, especialmente quando se trata de:

- analisar eventos rápidos,
- quantificar trajetórias,
- ou comparar diferentes desmontes de forma sistemática.

Com o avanço tecnológico, essa realidade começou a mudar.

A introdução de ferramentas como:

- filmagem de alta velocidade,
- drones,
- sensores e sistemas digitais,

permitiu uma transição para uma abordagem mais instrumentada, baseada em:

- dados mensuráveis,
- registros repetíveis,
- e análises mais estruturadas.



*Essa evolução não substitui a observação de campo, mas a complementa, tornando-a: mais precisa, mais confiável e mais comparável ao longo do tempo.*

## 10.1.3 Tecnologia, análise e suporte à tomada de decisão

Um dos principais ganhos trazidos pela evolução tecnológica aplicada ao flyrock é a ampliação significativa da capacidade de análise do fenômeno.

Com o uso de ferramentas adequadas, torna-se possível:

• observar detalhes que antes passavam despercebidos

• analisar múltiplos cenários de forma rápida e estruturada

• correlacionar diferentes variáveis do desmonte

• identificar padrões que não são evidentes em análises isoladas

Essa evolução representa uma mudança importante na forma como o flyrock é estudado, saindo de uma abordagem predominantemente empírica para uma análise cada vez mais instrumentada, baseada em dados e evidências.

No entanto, é fundamental compreender que:

tecnologia não gera conhecimento por si só.

Os resultados obtidos continuam dependendo diretamente de:

• qualidade dos dados de entrada

• coerência das hipóteses adotadas

• capacidade de interpretação do profissional

Sem esses elementos, mesmo ferramentas avançadas podem levar a:

• conclusões equivocadas

• falsa sensação de precisão

• decisões inadequadas

Nesse contexto, a tecnologia deve ser entendida como um amplificador da capacidade técnica, e não como um substituto dela. Sua principal contribuição está na melhoria da gestão do risco. Ao permitir:

• melhor compreensão do comportamento do sistema

• maior qualidade e volume de dados

• análise mais estruturada de cenários

as ferramentas tecnológicas ajudam a:

• reduzir incertezas

• identificar condições críticas

• apoiar decisões mais seguras

Ainda assim, é importante reforçar que:

• a tecnologia não elimina o risco

• não substitui o julgamento técnico

• nem garante decisões corretas de forma automática

O processo decisório continua dependendo de:

• interpretação técnica

• avaliação do contexto operacional

• postura conservadora diante da incerteza

Assim, a tecnologia deve ser posicionada corretamente dentro da engenharia:

*como suporte à decisão, e não como substituto da decisão.*

A evolução tecnológica aplicada ao estudo do flyrock representa um avanço importante na forma como o fenômeno é observado, analisado e gerenciado.

Fica claro que:

• novas ferramentas ampliam significativamente a capacidade de análise

• permitem maior controle, rastreabilidade e compreensão do sistema

• mas continuam dependentes de dados confiáveis e interpretação adequada

Assim:

*a tecnologia melhora a engenharia, mas não substitui a engenharia.*

Nos próximos tópicos, serão apresentadas as principais ferramentas tecnológicas aplicadas ao flyrock, iniciando pela filmagem e análise por vídeo de alta velocidade.

# 10.2 Filmagem e análise por vídeo de alta velocidade

O fenômeno do flyrock ocorre em escalas de tempo extremamente curtas. O instante de ejeção dos fragmentos, que é justamente o momento mais crítico para compreender o problema, acontece em frações de segundo e não pode ser analisado de forma adequada por observação direta.

Nesse contexto, a filmagem em alta velocidade permite acessar uma parte do fenômeno que, durante muito tempo, permaneceu pouco compreendida:

*o comportamento inicial do lançamento dos fragmentos.*



Essa ferramenta tem um valor técnico elevado porque conecta diretamente:

- os mecanismos físicos de geração,
- o comportamento inicial dos fragmentos,
- e os resultados observados em campo.

Assim, ela se torna um elo importante entre teoria, modelagem e realidade.

## 10.2.1 Princípio da filmagem em alta velocidade

A filmagem em alta velocidade baseia-se na captura de imagens em taxas de quadros significativamente superiores às de uma filmagem convencional.

Enquanto uma gravação comum opera em torno de:

- 24 a 60 quadros por segundo,

um sistema de alta velocidade pode operar com:

- centenas, milhares ou até dezenas de milhares de quadros por segundo.

Essa diferença permite "expandir o tempo", tornando visíveis eventos que, de outra forma, ocorreriam rápido demais para serem observados.



No contexto do desmonte, isso possibilita:

- visualizar o momento exato da ruptura,
- acompanhar a abertura da face,
- observar a ejeção inicial de fragmentos,
- e analisar a evolução do movimento nos primeiros instantes.

Esse princípio transforma um evento extremamente rápido em uma sequência analisável, permitindo uma leitura muito mais detalhada do fenômeno.

## 10.2.2 O que esse tipo de registro permite observar

A principal contribuição da filmagem em alta velocidade está na capacidade de revelar o comportamento inicial do flyrock.

Com esse tipo de registro, é possível:

- identificar o ponto de origem dos fragmentos,
- observar a direção inicial do lançamento,
- estimar ângulos de saída,

- analisar a velocidade inicial de forma aproximada,
- e entender a sequência de eventos durante a detonação.

Essas observações são fundamentais para conectar:

*o que foi projetado, o que ocorreu no instante da detonação e o que foi observado no resultado final.*

## 10.2.3 Aplicações na investigação de eventos

A filmagem em alta velocidade tem grande aplicação na análise de eventos de flyrock, especialmente em situações onde é necessário compreender a origem de uma ocorrência.

Quando utilizada em investigações, essa ferramenta permite:

- reconstruir o comportamento do desmonte,
- identificar o mecanismo dominante de ejeção,
- avaliar se houve falha de confinamento,
- e verificar a coerência entre o projeto e o comportamento observado.

Além disso, pode ser utilizada para:

- validar hipóteses levantadas durante análise técnica,
- comparar diferentes configurações de desmonte,
- e apoiar processos de melhoria contínua.

Outro ponto relevante é seu valor didático.

A visualização clara dos mecanismos ajuda:

- no treinamento de equipes,
- na compreensão do fenômeno,
- e no desenvolvimento do raciocínio técnico.

## 10.2.4 Limitações práticas e operacionais

Apesar de seu grande valor, a filmagem em alta velocidade possui limitações importantes que precisam ser consideradas.

Entre as principais, destacam-se:

- custo elevado dos equipamentos,
- necessidade de posicionamento adequado,
- campo de visão limitado,
- sensibilidade às condições ambientais, como poeira e iluminação,
- e complexidade na interpretação dos dados.

Além disso:

- nem todos os eventos podem ser capturados com a precisão desejada,
- e o registro visual, por si só, não fornece todas as respostas.

A interpretação das imagens ainda depende de:

- conhecimento técnico,
- compreensão dos mecanismos físicos,

- e integração com outros dados do desmonte.

Assim, reforça-se que:

*o vídeo de alta velocidade amplia a capacidade de observação, mas o entendimento do fenômeno continua sendo uma tarefa da engenharia.*

# 10.3 Uso de drones e sistemas visuais

A evolução tecnológica no estudo do flyrock não se limita à análise do instante da detonação. Ela também envolve a ampliação da capacidade de observar, registrar e interpretar o desmonte antes e depois do evento.

Nesse contexto, o uso de drones e sistemas visuais representa uma das maiores transformações na prática operacional recente.

Essas ferramentas permitem acessar áreas que antes eram:

- de difícil visualização,
- de acesso limitado,
- ou avaliadas apenas de forma indireta.

Com isso, tornam possível uma leitura mais completa do desmonte, abrangendo:

- condições geométricas e geológicas prévias,
- execução real do plano de fogo,
- e efeitos observados após a detonação.

Assim, os drones deixam de ser apenas uma ferramenta de registro visual e passam a atuar como:

*instrumentos técnicos de análise, controle e investigação.*

## 10.3.1 Drones na inspeção pré-desmonte

Uma das aplicações mais importantes dos drones está na inspeção antes do carregamento e da detonação.

Nessa etapa, os drones permitem:

- avaliar a geometria da face,
- identificar irregularidades na crista,
- observar zonas de fratura ou alteração,
- e verificar condições que podem comprometer o confinamento.



Essa inspeção tem grande valor porque:

- complementa a leitura de campo realizada diretamente pela equipe,
- amplia o campo de visão do engenheiro,
- e permite identificar situações que podem não ser evidentes ao nível do solo.

Além disso, o uso de drones possibilita:

- registrar imagens de referência do desmonte,
- documentar condições iniciais,
- e apoiar decisões de ajuste antes da execução.

## 10.3.2 Drones no registro pós-desmonte

Após a detonação, os drones se tornam uma ferramenta extremamente útil para análise dos resultados do desmonte.

Nesse contexto, podem ser utilizados para:

- mapear a área afetada pelo desmonte,
- identificar a distribuição de material lançado,
- registrar distâncias de projeção,
- e documentar ocorrências de flyrock.



Essa aplicação é particularmente relevante para:

- análise de eventos,
- validação de modelos,
- e construção de histórico da operação.

O registro visual pós-desmonte permite:

- identificar padrões de dispersão,
- verificar assimetrias no comportamento do desmonte,
- e correlacionar resultados com condições de projeto e execução.

## 10.3.3 Fotogrametria e reconstrução visual

Uma das evoluções mais importantes associadas ao uso de drones é a aplicação da fotogrametria.

A partir de múltiplas imagens capturadas em diferentes ângulos, é possível:

- reconstruir modelos tridimensionais do terreno,
- gerar mapas de alta precisão,
- e representar a geometria do desmonte de forma detalhada.



No contexto do flyrock, isso permite:

- analisar a geometria real da face e da crista,
- avaliar volumes e deslocamentos,
- mapear footprints de forma mais precisa,
- e comparar diferentes desmontes ao longo do tempo.

Essas reconstruções visuais têm grande valor porque:

- aumentam a precisão da análise,
- permitem revisões posteriores,
- e facilitam a comunicação técnica entre equipes.

Além disso, contribuem para integrar dados geométricos, operacionais e observacionais em uma mesma base de análise.

## 10.3.4 Benefícios e limitações operacionais

O uso de drones e sistemas visuais traz benefícios significativos para o estudo e controle do flyrock.

Entre os principais benefícios, destacam-se:

- ampliação do campo de visão,

- acesso a áreas de difícil alcance,
- melhoria na documentação e rastreabilidade,
- aumento da precisão na análise geométrica,
- e apoio à investigação de eventos.

No entanto, também existem limitações importantes que devem ser consideradas.

Entre elas:

- dependência de condições climáticas e visibilidade,
- necessidade de operadores treinados,
- restrições operacionais e de segurança,
- limitações de autonomia e cobertura,
- e necessidade de processamento e interpretação dos dados.

Além disso, assim como em outras tecnologias, é importante reforçar que:

- a qualidade do resultado depende da qualidade da coleta e da análise,
- e o uso inadequado pode levar a interpretações incorretas.

# 10.4 Ferramentas digitais de coleta e análise

Dando continuidade ao avanço tecnológico aplicado ao estudo do flyrock, um dos pilares mais importantes dessa evolução é a digitalização dos dados de desmonte.

Se nos tópicos anteriores exploramos ferramentas que ampliam a capacidade de observação, neste ponto o foco passa a ser: como coletar, organizar e analisar essas informações de forma estruturada.

Historicamente, grande parte dos dados de desmonte era registrada de forma manual, muitas vezes com:



- anotações incompletas,
- falta de padronização,
- perda de informações relevantes,
- e dificuldade de acesso posterior.

Esse cenário limitava significativamente:

- a capacidade de análise histórica,
- a identificação de padrões,
- e a evolução técnica das operações.

Com a introdução de ferramentas digitais, esse processo passou a ser mais estruturado, permitindo:

- maior rastreabilidade,
- melhor organização dos dados,
- integração entre diferentes etapas do desmonte,
- e suporte mais consistente à tomada de decisão.

No entanto, assim como nos demais tópicos deste módulo, é essencial reforçar um princípio fundamental:

*sistemas digitais melhoram a gestão da informação, mas não substituem a qualidade da coleta em campo.*

## 10.4.1 Registros digitais de campo

Os registros digitais de campo representam a base de qualquer sistema de análise estruturada.




Esses registros podem incluir:

- formulários digitais de perfuração,
- checklists de carregamento,
- controle de tampão,
- registros de anomalias,
- e dados de execução do desmonte.

A digitalização desses processos permite:

- padronizar a coleta de informações,

- reduzir erros de transcrição,
- garantir maior consistência nos registros,
- e facilitar o armazenamento e recuperação dos dados.

Além disso, possibilita:

- registro em tempo real,
- validação imediata de informações,
- e integração com outros sistemas.

## 10.4.2 Integração entre dados de perfuração, carregamento e resultado

Um dos maiores ganhos das ferramentas digitais está na possibilidade de integrar diferentes etapas do processo de desmonte.

Tradicionalmente, dados de:

- perfuração,
- carregamento,
- e resultado do desmonte,

eram tratados de forma separada.

Com a digitalização, é possível conectar essas informações, permitindo:

- comparar o planejado com o executado,
- identificar desvios operacionais,
- correlacionar parâmetros com resultados observados,
- e compreender melhor o comportamento do sistema.

No contexto do flyrock, essa integração é especialmente importante porque permite:

- associar eventos de projeção a condições específicas,
- identificar padrões recorrentes,
- e melhorar a capacidade de prevenção.

## 10.4.3 Dashboards e análise operacional

A partir da organização e integração dos dados, surge a possibilidade de análise estruturada por meio de dashboards e ferramentas de visualização.

Esses sistemas permitem:

- acompanhar indicadores operacionais,
- visualizar tendências,
- comparar desmontes ao longo do tempo,
- e identificar rapidamente situações fora do padrão.

No contexto do flyrock, dashboards podem ser utilizados para:

- monitorar eventos de projeção,
- acompanhar distâncias máximas registradas,
- avaliar desempenho de diferentes configurações de desmonte,

- e apoiar decisões de ajuste de parâmetros.




A principal vantagem dessas ferramentas é transformar dados em informação útil para decisão. No entanto, sua eficácia depende diretamente da qualidade e consistência dos dados de entrada.

## 10.4.4 Importância da qualidade do dado

Apesar de todos os avanços proporcionados pelas ferramentas digitais, existe um ponto crítico que não pode ser ignorado:

*dados ruins geram análises ruins.*

Sistemas digitais não corrigem:

- medições imprecisas,
- registros incompletos,
- ou interpretações equivocadas feitas em campo.

Pelo contrário, podem amplificar esses problemas ao:

- dar aparência de organização e precisão,
- ou gerar análises baseadas em informações inconsistentes.

Por isso, é fundamental que:

- a coleta de dados seja feita com rigor,
- os registros sejam completos e confiáveis,
- e haja disciplina operacional no preenchimento das informações.

# 10.5 Softwares especializados de modelagem

Dando continuidade à evolução tecnológica aplicada ao estudo do flyrock, chegamos a um dos elementos mais relevantes no contexto atual da engenharia de desmonte: os softwares especializados de modelagem.

Nos módulos anteriores, discutimos os fundamentos da modelagem, seus limites e a importância da abordagem probabilística. Neste ponto, o foco passa a ser como essas abordagens têm sido incorporadas em ferramentas digitais cada vez mais sofisticadas.

Esses softwares representam uma evolução significativa porque permitem:

- integrar diferentes variáveis do desmonte,
- simular cenários com maior rapidez,
- analisar resultados de forma estruturada,
- e apoiar decisões técnicas com base em dados.

No entanto, é fundamental reforçar desde o início:

*softwares não eliminam a incerteza do fenômeno.*

Eles ampliam a capacidade de análise, mas continuam dependentes de:

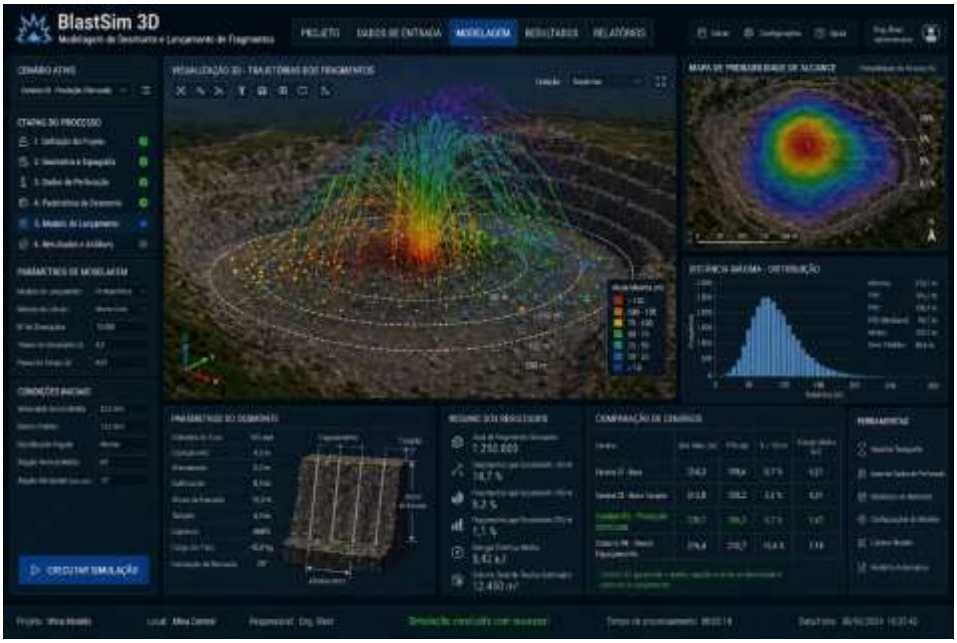
- hipóteses adotadas,
- qualidade dos dados utilizados,
- calibração local,
- e interpretação técnica.

## 10.5.1 Evolução dos softwares de modelagem

Os softwares de modelagem aplicados ao desmonte evoluíram significativamente nas últimas décadas.

Inicialmente, as análises eram feitas por meio de:

- cálculos manuais,
- fórmulas simplificadas,
- e ferramentas limitadas de apoio.




Com o avanço da tecnologia, surgiram softwares capazes de:

- processar grandes volumes de dados,
- incorporar múltiplos parâmetros,
- simular diferentes cenários de desmonte,
- e gerar resultados de forma rápida e visual.

Essa evolução permitiu:

- maior agilidade na análise,
- aumento da capacidade de comparação entre cenários,

- e melhor suporte ao planejamento e à tomada de decisão.

Atualmente, muitos softwares já incorporam:

- abordagens probabilísticas,
- integração com dados de campo,
- e ferramentas gráficas avançadas.

## 10.5.2 Integração de múltiplas variáveis

Um dos principais avanços dos softwares especializados é a capacidade de integrar múltiplas variáveis em uma mesma análise.

Enquanto abordagens mais simples consideravam poucos parâmetros, os softwares atuais permitem trabalhar simultaneamente com:

- geometria do desmonte,
- características do explosivo,
- condições do maciço,
- parâmetros de carregamento,
- e dados históricos da operação.

Essa integração possibilita:

- análises mais completas,
- melhor representação do sistema real,
- e maior capacidade de identificar relações entre causa e efeito.

No contexto do flyrock, isso é especialmente importante, pois o fenômeno depende de:

*interação entre múltiplos fatores, e não de uma única variável isolada.*

## 10.5.3 Aplicações práticas no contexto industrial

Na prática industrial, os softwares de modelagem são utilizados em diversas etapas do processo de desmonte.

Entre as principais aplicações, destacam-se:

- planejamento de desmontes,
- simulação de cenários alternativos,
- análise de risco de flyrock,
- definição de zonas de exclusão,
- revisão de eventos e investigação de ocorrências.

Essas ferramentas permitem:

- testar diferentes configurações antes da execução,
- avaliar impactos de alterações de parâmetros,
- e apoiar decisões de forma mais estruturada.

Além disso, quando integrados a dados reais, os softwares podem:

- melhorar a calibração dos modelos,
- aumentar a confiabilidade das análises,

- e contribuir para a evolução contínua da operação.

### 10.5.4 Limites tecnológicos e interpretativos

Apesar de sua sofisticação, os softwares de modelagem possuem limitações importantes que não podem ser ignoradas.

Entre os principais pontos críticos, destacam-se:

- dependência de dados de entrada confiáveis,
- necessidade de hipóteses simplificadoras,
- dificuldade de representar completamente a variabilidade geológica,
- e limitações na modelagem do comportamento real dos fragmentos.

Além disso, existe um risco relevante associado ao uso dessas ferramentas:

*a falsa sensação de precisão.*

Resultados apresentados com alto nível de detalhe podem transmitir confiança excessiva, mesmo quando baseados em dados incertos ou premissas inadequadas.

Por isso, é essencial que o uso do software seja sempre acompanhado de:

- análise crítica,
- validação com dados reais,
- e conhecimento técnico do fenômeno.

O software não substitui a engenharia, nem a leitura de campo.

# 10.6 Monitoramento integrado do desmonte

À medida que avançamos na aplicação de tecnologias ao estudo do flyrock, surge uma tendência cada vez mais clara na engenharia moderna de desmonte:

*a integração das informações ao longo de todo o processo.*

Se, tradicionalmente, os dados eram analisados de forma isolada, hoje a evolução aponta para sistemas capazes de conectar:

- projeto,
- execução,
- monitoramento,
- e resultados observados.

Esse conceito é conhecido como monitoramento integrado do desmonte.

Seu objetivo principal é construir uma leitura mais completa e consistente do comportamento do sistema, permitindo:

- maior rastreabilidade,
- melhor entendimento das causas,
- e decisões mais bem fundamentadas.

No contexto do flyrock, essa abordagem é particularmente relevante, pois o fenômeno depende da interação entre múltiplos fatores. Assim, analisar variáveis de forma isolada tende a ser insuficiente.

## 10.6.1 Integração entre dados de projeto, execução e resultado

Um dos pilares do monitoramento integrado é a conexão entre todas as etapas do desmonte.

Isso envolve relacionar:

- o que foi planejado no projeto,
- o que foi efetivamente executado em campo,
- e o que foi observado após a detonação.

Essa integração permite:

- identificar desvios entre projeto e execução,
- compreender como esses desvios influenciaram o resultado,
- e avaliar a consistência do comportamento do desmonte.

No caso do flyrock, isso é essencial para:

- associar eventos de projeção a condições específicas,
- identificar padrões recorrentes,
- e melhorar continuamente os parâmetros adotados.

Sem essa integração, a análise tende a ser fragmentada e menos eficaz.

## 10.6.2 Correlação entre sinais e comportamento observado

Outro aspecto fundamental do monitoramento integrado é a capacidade de correlacionar diferentes sinais com o comportamento observado.

Esses sinais podem incluir:

- dados geométricos,
- registros operacionais,
- informações geológicas,
- e evidências visuais do desmonte.

Ao correlacionar essas informações, torna-se possível:

- identificar relações entre causa e efeito,
- compreender melhor os mecanismos de geração do flyrock,
- e antecipar condições críticas.

Por exemplo:

- variações no afastamento ou no tampão podem ser relacionadas a padrões de ejeção,
- irregularidades na face podem ser associadas a comportamentos assimétricos,
- e desvios operacionais podem ser conectados a eventos específicos.

Essa capacidade de correlação é um dos maiores ganhos da abordagem integrada.

## 10.6.3 Tendência de sistemas mais conectados

A evolução tecnológica tem levado ao desenvolvimento de sistemas cada vez mais conectados.

Esses sistemas buscam integrar:

- dados de campo,
- registros digitais,
- informações de sensores,
- e resultados de modelagem.




Na prática, isso pode se traduzir em plataformas que:

- centralizam informações do desmonte,
- permitem acesso rápido a dados históricos,
- e facilitam análises comparativas.

Essa tendência aponta para um futuro onde:

*o desmonte será cada vez mais monitorado de forma contínua e integrada.*

No entanto, é importante lembrar que:

- a tecnologia fornece a estrutura,
- mas o valor está na forma como os dados são utilizados.

## 10.6.4 Valor do monitoramento contínuo

O monitoramento integrado ganha ainda mais força quando aplicado de forma contínua ao longo do tempo.

Isso permite:

- acumular histórico consistente,
- identificar padrões de comportamento,
- avaliar a evolução da operação,
- e melhorar a qualidade das decisões.

No contexto do flyrock, o monitoramento contínuo possibilita:

- calibrar modelos de forma mais precisa,
- ajustar parâmetros com base em evidência,
- e reduzir gradualmente a incerteza do sistema.

Além disso, cria um ciclo de retroalimentação onde:

- cada desmonte gera aprendizado,
- e esse aprendizado é incorporado nos desmontes seguintes.

Esse processo é essencial para a construção de uma operação mais segura e controlada.

# 10.7 Inteligência artificial e análise de dados aplicadas à predição

Com o avanço da digitalização e do monitoramento integrado do desmonte, surge um novo campo de evolução na engenharia do flyrock:

*o uso de inteligência artificial e análise avançada de dados.*

Até este ponto do curso, vimos que o flyrock é um fenômeno:

- complexo,
- sensível a múltiplas variáveis,
- e de difícil previsão determinística.




Nesse cenário, a inteligência artificial surge como uma ferramenta capaz de lidar com:

- grande volume de dados,
- múltiplas variáveis simultaneamente,
- e relações não lineares entre parâmetros.

No entanto, é essencial estabelecer desde o início um princípio fundamental:

*a inteligência artificial não substitui o entendimento físico do fenômeno.*

Ela pode identificar padrões e apoiar decisões, mas:

- depende da qualidade dos dados,
- exige validação constante,
- e precisa ser interpretada dentro de um contexto técnico.

## 10.7.1 Análise de grandes bases de dados

A base para qualquer aplicação de inteligência artificial é a disponibilidade de dados.

No contexto do desmonte, esses dados podem incluir:

- parâmetros de projeto,
- informações de perfuração e carregamento,
- registros operacionais,
- dados geológicos,
- resultados observados, incluindo ocorrências de flyrock.

Com o uso de ferramentas digitais, torna-se possível acumular grandes volumes de dados ao longo do tempo.

Esse volume permite:

- identificar padrões recorrentes,
- comparar diferentes condições operacionais,
- e analisar o comportamento do sistema em múltiplos cenários.

Diferentemente de análises tradicionais, que muitas vezes se baseiam em poucos dados ou em médias, a análise de grandes bases permite:

*explorar a variabilidade real do sistema.*

## 10.7.2 IA como ferramenta de apoio à predição

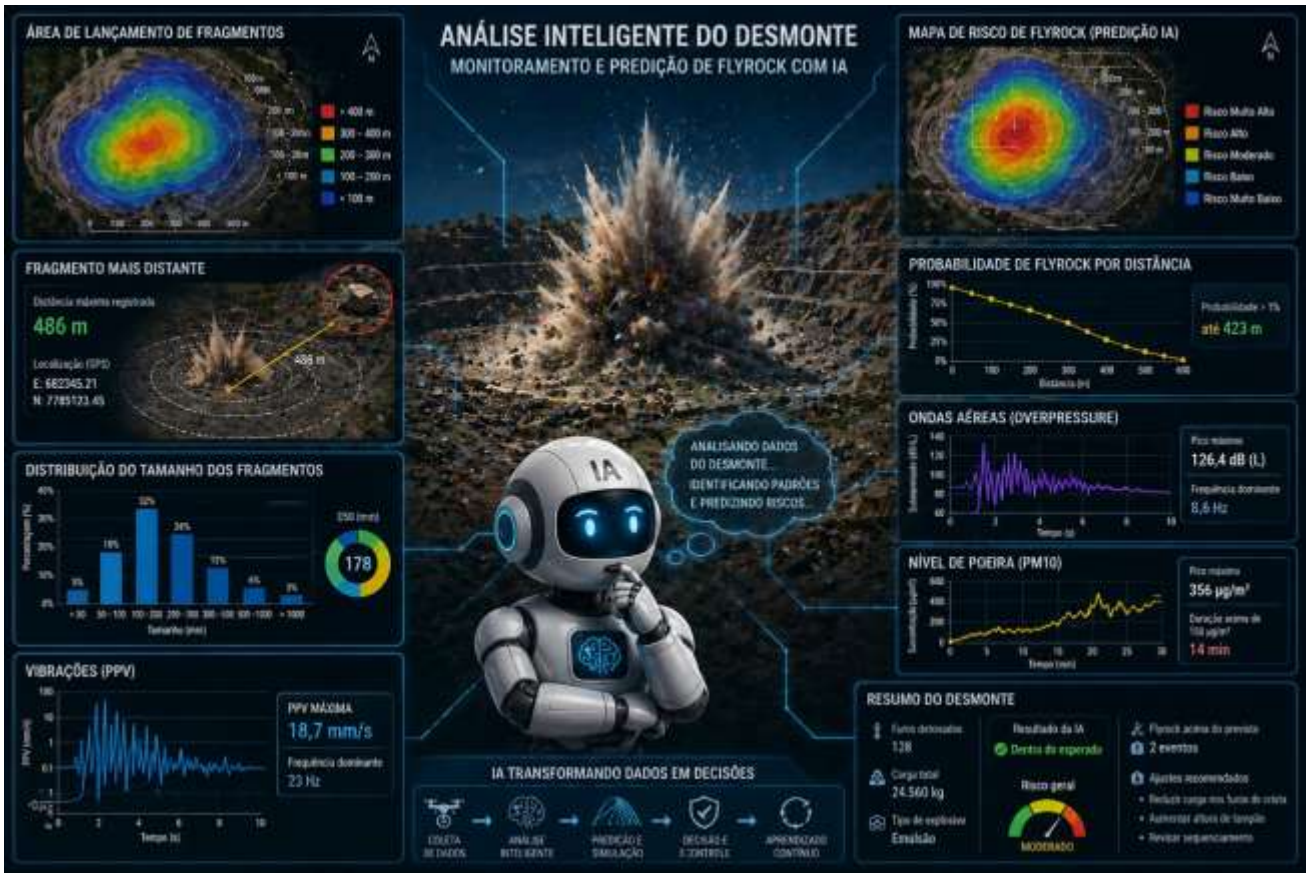
A inteligência artificial pode ser aplicada à predição do flyrock de diversas formas, principalmente como ferramenta de apoio à decisão.

Entre as aplicações mais relevantes, destacam-se:

- classificação de risco de determinados desmontes,
- identificação de condições associadas a maior probabilidade de projeção,
- estimativa de alcance com base em padrões históricos,
- apoio na definição de zonas de segurança.

Esses modelos não substituem os modelos físicos, mas os complementam, permitindo:

- incorporar dados reais da operação,
- capturar relações complexas entre variáveis,
- e melhorar a capacidade de previsão em contextos específicos.




Assim, a IA atua como:

*uma ferramenta adicional dentro do processo de engenharia.*

## 10.7.3 Potenciais benefícios

O uso de inteligência artificial e análise de dados pode trazer benefícios importantes para o estudo e controle do flyrock.

Entre os principais, destacam-se:

- maior capacidade de processar grandes volumes de informação,
- identificação de correlações que não são evidentes em análises tradicionais,
- aumento da velocidade de análise,
- e apoio à tomada de decisão baseada em dados.

Além disso, a IA pode contribuir para:

- reduzir dependência exclusiva de interpretação subjetiva,
- aumentar consistência nas análises,
- e identificar tendências ao longo do tempo.

No entanto, esses benefícios só se concretizam quando:

- os dados são confiáveis,
- o modelo é bem estruturado,
- e a interpretação é feita de forma crítica.

### 10.7.4 Riscos e limitações

Apesar de seu potencial, o uso de inteligência artificial envolve riscos importantes que não podem ser ignorados.

Entre os principais, destacam-se:

- dependência de dados de qualidade,
- risco de viés nos dados históricos,
- dificuldade de interpretar modelos complexos,
- e possibilidade de gerar falsa sensação de precisão.

Além disso:

- a IA pode identificar correlações sem relação causal,
- pode reproduzir erros presentes nos dados,
- e pode falhar em situações fora do padrão histórico.

Por isso, é fundamental reforçar que:

*modelos de IA devem ser utilizados com supervisão técnica e validação constante.*

# 10.8 Redes neurais e modelos híbridos

Dando continuidade ao uso da inteligência artificial no estudo do flyrock, avançamos agora para abordagens mais específicas e sofisticadas, como as redes neurais e os modelos híbridos.

Essas abordagens representam uma evolução importante na modelagem, pois buscam lidar diretamente com uma das principais dificuldades já discutidas ao longo do curso:

*a complexidade e a não linearidade do fenômeno.*

Enquanto os modelos clássicos partem de simplificações físicas e os modelos puramente estatísticos dependem fortemente dos dados, as redes neurais e os modelos híbridos procuram combinar:

- aprendizado a partir de dados,
- estrutura conceitual baseada na física,
- e adaptação às condições reais da operação.

No entanto, assim como nos demais avanços tecnológicos apresentados neste módulo, é fundamental reforçar:

*maior sofisticação não significa maior confiabilidade automática.*

Essas ferramentas têm grande potencial, mas continuam dependentes de:

- qualidade dos dados,
- consistência do modelo,
- e interpretação técnica adequada.

## 10.8.1 Redes neurais aplicadas ao flyrock

As redes neurais são modelos computacionais inspirados no funcionamento do cérebro humano, capazes de aprender padrões a partir de dados.

No contexto do flyrock, elas podem ser utilizadas para:

- identificar relações complexas entre variáveis,
- estimar distâncias de projeção,
- classificar níveis de risco,
- e apoiar a predição em cenários específicos.




Diferentemente dos modelos tradicionais, que exigem definição explícita das relações entre variáveis, as redes neurais:

- aprendem essas relações a partir dos dados,
- ajustando seus parâmetros internos com base em exemplos.

Isso permite capturar:

*comportamentos não lineares e interações complexas que são difíceis de representar por fórmulas simples.*

No entanto, esse processo também traz desafios importantes, como:

- necessidade de grande volume de dados,
- dificuldade de interpretar o funcionamento interno do modelo,
- e dependência da qualidade da base utilizada para treinamento.

## 10.8.2 Modelos híbridos entre física e dados

Uma das abordagens mais promissoras na modelagem do flyrock é a combinação entre modelos físicos e modelos baseados em dados, conhecida como modelagem híbrida.

Essa abordagem busca unir:

- a coerência conceitual da física,
- com a capacidade adaptativa dos modelos de dados.

Na prática, isso pode envolver:

- uso de modelos físicos para estruturar o problema,
- e uso de dados históricos para ajustar ou complementar a predição.

Essa combinação traz vantagens importantes, como:

- maior aderência à realidade operacional,
- melhor capacidade de adaptação a condições locais,
- e redução de erros associados a simplificações excessivas.

## 10.8.3 Potencial de melhoria da predição

O uso de redes neurais e modelos híbridos tem potencial para melhorar significativamente a capacidade de predição do flyrock, especialmente em cenários complexos.

Essas abordagens permitem:

- incorporar múltiplas variáveis simultaneamente,
- capturar interações não lineares,
- adaptar-se a condições específicas da operação,
- e melhorar a precisão em relação a modelos mais simples.

Isso é particularmente relevante em situações onde:

- a geologia é altamente variável,
- o comportamento do desmonte não segue padrões simples,
- e há grande volume de dados disponível.

No entanto, é importante destacar que:

- o ganho de precisão não é garantido,
- e depende diretamente da qualidade da implementação e dos dados utilizados.

# 10.9 Tendências futuras no controle de risco

Ao longo deste módulo, foi possível observar como a tecnologia vem ampliando a capacidade de observar, registrar, modelar e analisar o flyrock. No entanto, mais importante do que entender as ferramentas atuais é compreender a direção para onde a engenharia do desmonte está evoluindo.

O controle do flyrock caminha para um cenário cada vez mais integrado, dinâmico e orientado por dados.

Essa evolução não ocorre apenas pela introdução de novas ferramentas, mas pela mudança na forma como a informação é utilizada:

- de registros isolados para sistemas integrados,
- de análises pontuais para acompanhamento contínuo,
- de decisões baseadas em experiência isolada para decisões apoiadas por evidência estruturada.

Ainda assim, é essencial manter um dos princípios centrais do curso:

*a evolução tecnológica não elimina a incerteza do fenômeno.*

Ela melhora a capacidade de lidar com essa incerteza, mas não a remove.

## 10.9.1 Tendência de maior integração tecnológica

Uma das principais tendências é a convergência entre diferentes tecnologias em um único sistema integrado.

Isso envolve a conexão entre:

- monitoramento de campo,
- registros digitais,
- modelagem,
- análise de dados,
- e ferramentas de visualização.

Essa integração permite:

- consolidar informações em tempo mais próximo do real,
- facilitar o acesso a dados históricos,
- e melhorar a consistência da análise.

No contexto do flyrock, isso significa que:

*diferentes dimensões do problema passam a ser analisadas de forma conjunta, e não isolada.*

## 10.9.2 Evolução para gestão de risco mais dinâmica

Outra tendência importante é a transição de uma gestão de risco mais estática para uma abordagem mais dinâmica.

Tradicionalmente, o controle do flyrock era baseado em:

- parâmetros fixos,
- critérios conservadores definidos previamente,
- e pouca adaptação ao longo do tempo.

Com o avanço das ferramentas tecnológicas, torna-se possível:

- ajustar parâmetros com base em dados recentes,

- revisar condições operacionais com maior frequência,
- e adaptar decisões de forma mais responsiva.

Essa evolução permite uma gestão de risco mais alinhada com a realidade operacional, onde:

*o controle passa a ser continuamente ajustado com base em evidência.*

## 10.9.3 Papel crescente da análise preditiva

A análise preditiva tende a assumir um papel cada vez mais relevante no controle do flyrock.

Com o aumento da disponibilidade de dados e o avanço das ferramentas analíticas, torna-se possível:

- antecipar cenários de risco,
- identificar condições potencialmente críticas antes da detonação,
- e apoiar decisões com base em projeções fundamentadas.

Essa abordagem não substitui a engenharia tradicional, mas a complementa, permitindo:

- maior antecipação de problemas,
- melhor planejamento,
- e maior segurança operacional.

No futuro, a tendência é que a predição deixe de ser apenas uma ferramenta de análise e passe a ser:

*parte integrada do processo de decisão em tempo operacional.*

## 10.9.4 Limites permanentes da tecnologia

Apesar de todas as evoluções, é fundamental reconhecer que existem limites que a tecnologia não ultrapassa.

O flyrock continuará sendo um fenômeno:

- influenciado por variabilidade geológica,
- sensível a pequenas mudanças,
- e sujeito a incertezas inerentes ao processo de desmonte.

Nenhuma tecnologia será capaz de:

- eliminar completamente o risco,
- prever com exatidão todos os eventos,
- ou substituir completamente o julgamento técnico.

Além disso, o uso inadequado da tecnologia pode gerar:

- excesso de confiança,
- interpretação equivocada de resultados,
- e decisões baseadas em premissas incorretas.

Por isso, é essencial manter uma postura técnica equilibrada:

*utilizar a tecnologia como apoio, sem perder o senso crítico e a prudência.*

# 10.10 Fechamento do módulo e consolidação da lógica da inovação tecnológica

Ao longo deste módulo, foi possível acompanhar a evolução das ferramentas tecnológicas aplicadas ao estudo e ao controle do flyrock, desde recursos de observação, como vídeo de alta velocidade e drones, até sistemas mais avançados de modelagem, análise de dados e inteligência artificial.

Esse percurso teve um objetivo claro: mostrar que a engenharia do flyrock está se tornando cada vez mais instrumentalizada, com maior capacidade de:

- observar o fenômeno,
- registrar informações,
- integrar dados,
- e apoiar decisões com base em evidência.

No entanto, também ficou evidente que essa evolução tecnológica não altera um dos princípios mais importantes de todo o curso:

*o controle do flyrock continua sendo, essencialmente, um problema de engenharia aplicada.*

A tecnologia amplia as ferramentas disponíveis, mas não substitui:

- o entendimento físico do fenômeno,
- a leitura de campo,
- a qualidade da execução,
- nem a disciplina operacional.

Este fechamento tem como objetivo consolidar essa visão equilibrada, integrando os principais conceitos desenvolvidos ao longo do módulo.

## 10.10.1 Síntese do papel da tecnologia no estudo do flyrock

A tecnologia tem desempenhado um papel crescente na evolução do estudo do flyrock, permitindo avanços importantes em diversas frentes.

Ao longo do módulo, vimos que ela contribui para:

- melhorar a qualidade da observação do desmonte,
- ampliar a capacidade de registro e rastreabilidade,
- integrar diferentes fontes de dados,
- e apoiar a modelagem e a predição.

Ferramentas como:

- vídeo de alta velocidade,
- drones e sistemas visuais,
- plataformas digitais de coleta de dados,
- softwares de modelagem,
- e técnicas de análise avançada,

tornam possível uma abordagem mais estruturada e baseada em evidência.

No entanto, seu papel real deve ser compreendido corretamente:

*a tecnologia organiza, amplia e potencializa a análise, mas não resolve o problema por si só.*

## 10.10.2 O que o aluno deve ter entendido ao final do módulo

Ao concluir este módulo, o aluno deve ter desenvolvido uma visão crítica e equilibrada sobre o uso da tecnologia no contexto do flyrock.

É fundamental que tenha compreendido que:

- a tecnologia aumenta a visibilidade e a capacidade analítica do sistema,
- ferramentas são mais eficazes quando integradas à engenharia e à operação,
- dados inconsistentes comprometem qualquer tipo de análise,
- e a interpretação correta continua sendo um fator central.

Além disso, deve estar claro que:

- ferramentas avançadas não eliminam a variabilidade do fenômeno,
- a confiabilidade dos resultados depende da qualidade dos dados,
- e decisões seguras continuam exigindo julgamento técnico.

Em síntese:

- tecnologia sem engenharia gera falsa confiança
- engenharia com tecnologia gera melhores decisões

No final, o controle do flyrock continua dependendo de três pilares fundamentais:

- **pessoas**, com conhecimento e capacidade de interpretação,
- **processo**, com estrutura, controle e padronização,
- **disciplina operacional**, garantindo que o planejado seja corretamente executado.

Com isso, encerramos este módulo consolidando a tecnologia como um elemento de apoio à engenharia, sempre subordinado à qualidade da operação e ao rigor técnico que devem orientar todas as etapas do desmonte.

# Módulo 11. Da Predição à Gestão de Risco do Flyrock

## 11.1 Abertura do módulo e transição da previsão para a decisão

Ao longo do curso, o flyrock foi estudado a partir de diferentes perspectivas. Primeiro, foi apresentado como um dos riscos mais críticos do desmonte de rochas com explosivos. Depois, foram analisados seus mecanismos de geração, seus fundamentos físicos, a importância do confinamento, suas principais causas, as formas de controle e mitigação, os modelos de predição e as tecnologias que podem apoiar sua análise.

Esse caminho permitiu construir uma base técnica consistente sobre o fenômeno. O aluno já compreendeu que o flyrock não deve ser tratado como um evento aleatório sem causa, nem como uma consequência inevitável de toda detonação. Ele está associado a condições específicas de projeto, execução, confinamento, geologia, energia e controle operacional.

No entanto, ao chegar a este ponto do curso, é necessário avançar para uma nova etapa de entendimento. Não basta compreender como o flyrock ocorre. Também não basta estimar uma possível distância de lançamento. O desafio principal da engenharia é transformar essas informações em decisões seguras, práticas e defensáveis.

### 11.1.1 O que já foi construído até aqui

Até este momento, o curso permitiu desenvolver uma visão ampla sobre o flyrock. O aluno já teve contato com os principais elementos que explicam o fenômeno, incluindo:

• a relação entre energia explosiva, confinamento e deslocamento da rocha

• os mecanismos de geração, como face burst, cratering e rifling

• as causas associadas ao projeto, à execução, à geologia e ao fator humano

• as formas de controle e mitigação aplicáveis ao desmonte

• os modelos de predição e suas limitações

• o papel das tecnologias na coleta de dados, modelagem e análise

Esse conjunto de conhecimentos é essencial porque fornece a base necessária para interpretar o comportamento do desmonte. Sem essa base, qualquer decisão sobre segurança tende a ser frágil, intuitiva ou excessivamente dependente da experiência individual.

Por outro lado, com uma compreensão técnica bem estruturada, o profissional passa a ter melhores condições de reconhecer cenários críticos, avaliar desvios, interpretar resultados e propor medidas mais adequadas para o controle do risco.

### 11.1.2 Por que a predição não encerra o problema

A predição é uma ferramenta importante no estudo do flyrock. Ela permite estimar alcances possíveis, comparar cenários, avaliar a influência de variáveis e apoiar a definição de medidas preventivas.

No entanto, a predição não encerra o problema. Isso ocorre porque qualquer estimativa de alcance depende de premissas, dados de entrada, simplificações e condições de campo que nem sempre são conhecidas com precisão.

Mesmo quando um modelo é bem aplicado, ele não responde sozinho a todas as perguntas importantes da segurança operacional. Ele pode indicar uma distância estimada, mas não define automaticamente:

• se existe pessoa exposta naquela região

• se há equipamentos ou estruturas vulneráveis

• se o cenário exige maior margem de segurança

• se o histórico da operação recomenda uma abordagem mais conservadora

• se o desmonte deve ser ajustado, adiado ou executado com controles adicionais

Por isso, o resultado de uma predição deve ser entendido como uma informação de apoio à decisão, e não como uma resposta definitiva.

## 11.1.3 A passagem da estimativa para a decisão

A partir deste ponto, o foco deixa de ser apenas a pergunta:

**"Até onde o fragmento pode chegar?"**

E passa a incluir perguntas mais completas, como:




• o que pode ser atingido se houver ultralançamento?

• quais seriam as consequências desse evento?

• quais controles reduzem a probabilidade de ocorrência?

• quais medidas reduzem a exposição de pessoas e equipamentos?

• qual margem de segurança deve ser adotada?

• a zona de exclusão definida é compatível com o risco real?

Essa mudança é fundamental. A engenharia aplicada não se limita a produzir números. Ela precisa transformar números, observações, modelos, dados e experiência em decisões práticas.

No contexto do flyrock, isso significa que a estimativa de alcance deve ser integrada a uma análise mais ampla, envolvendo risco, consequência, exposição, controle operacional e zona de exclusão.

## 11.1.4 Predição como parte da gestão de risco

A gestão de risco não substitui a predição. Na verdade, ela depende dela.

Modelos, dados históricos, análises de campo, tecnologias de monitoramento e registros operacionais continuam sendo ferramentas essenciais. O ponto central é que esses elementos precisam ser utilizados dentro de um processo estruturado de decisão.

Nesse processo, a predição ajuda a responder o que pode acontecer. A gestão de risco ajuda a definir o que deve ser feito diante dessa possibilidade.

Assim, a lógica passa a ser:

• prever para entender melhor o cenário

• analisar para reconhecer incertezas e consequências

• decidir para reduzir exposição e aumentar a segurança

• controlar para garantir que a decisão seja cumprida em campo

• registrar para permitir aprendizado e melhoria contínua

Essa integração é essencial porque o flyrock não é apenas um fenômeno físico. Ele é também um risco operacional, e todo risco operacional precisa ser gerenciado de forma prática, documentada e consistente.

## 11.1.5 O objetivo deste módulo

O objetivo deste módulo é consolidar a transição entre a compreensão técnica do flyrock e sua gestão como risco operacional.

Para isso, serão discutidos temas como:

• a existência de risco residual mesmo após a aplicação de controles

• o uso correto dos resultados de modelos de predição

• a importância dos dados de campo para decisões de risco

• a construção de cenários críticos

• o papel das barreiras de controle

• a diferença entre prever e gerenciar

• a relação entre risco, consequência e zona de exclusão

Com isso, o aluno será conduzido a compreender que a segurança no controle do flyrock não depende da busca por uma previsão perfeita, mas da capacidade de tomar decisões robustas diante da incerteza.

Esse é um ponto de maturidade técnica essencial. Em operações de desmonte de rochas com explosivos, a engenharia responsável não é aquela que promete eliminar toda incerteza, mas aquela que reconhece as incertezas existentes, avalia cenários plausíveis, adota critérios conservadores e impede que pessoas, equipamentos e estruturas fiquem expostos ao risco.

Dessa forma, o Módulo 11 prepara o encerramento técnico do curso e, ao mesmo tempo, cria a ponte natural para o próximo curso, onde a gestão do risco de flyrock será aprofundada por meio da definição e aplicação prática da zona de exclusão.

# 11.2 Incerteza residual e risco residual no flyrock

Mesmo após a aplicação de boas práticas de engenharia, controle operacional, modelos de predição, tecnologias de apoio e procedimentos de segurança, ainda permanece um nível de incerteza no comportamento do flyrock. Essa incerteza não significa ausência de controle, nem falha do processo. Ela representa a parcela do fenômeno que continua sujeita à variabilidade natural do maciço, às limitações dos dados disponíveis e às diferenças entre o projeto e a execução real em campo.

Por isso, neste ponto do curso, é importante introduzir dois conceitos fundamentais para a gestão de risco:

• *incerteza residual*

• *risco residual*

A incerteza residual corresponde à parte da variabilidade que permanece mesmo depois que o profissional aplicou os melhores recursos disponíveis para compreender, modelar e controlar o desmonte.

O risco residual, por sua vez, é o risco que permanece após a aplicação das medidas de controle. Ele não representa o risco inicial do desmonte, mas sim o risco que ainda existe depois de adotadas ações como ajuste do plano de fogo, controle do tampão, inspeção da face, retirada de pessoas, evacuação da área, bloqueio de acessos e definição da zona de exclusão.




Essa distinção é essencial, porque a gestão de risco não parte da ilusão de eliminar completamente todas as possibilidades de falha. Ela parte da necessidade de reconhecer o que ainda pode ocorrer, mesmo após a aplicação dos controles, e decidir se o nível de risco restante é aceitável ou se exige medidas adicionais.

## 11.2.1 O que é incerteza residual

A incerteza residual é a incerteza que permanece após o uso de dados, modelos, inspeções e controles técnicos.

No contexto do flyrock, essa incerteza pode estar associada a fatores como:

• fraturas não identificadas no maciço

• variações locais de resistência da rocha

• diferenças entre afastamento planejado e real

• qualidade efetiva do tampão dentro do furo

• pequenas variações no carregamento

• comportamento real dos gases após a detonação

• forma, massa e velocidade dos fragmentos gerados

• direção real de ejeção dos fragmentos

Mesmo com boa engenharia, muitos desses fatores não podem ser conhecidos com precisão absoluta antes da detonação. O profissional pode reduzir essa incerteza por meio de inspeções, levantamentos, histórico operacional, controle da perfuração, registros de carregamento e modelagem. No entanto, dificilmente conseguirá eliminá-la por completo.

Isso significa que a incerteza residual não deve ser ignorada. Ela precisa ser reconhecida como parte natural do processo e incorporada à decisão de segurança.

## 11.2.2 O que é risco residual

O risco residual é o risco que permanece depois que as medidas de controle foram aplicadas.

De forma simples, pode-se pensar da seguinte maneira:

• antes dos controles, existe um risco inicial

• os controles reduzem a probabilidade ou a consequência do evento

• após essa redução, ainda pode permanecer um risco residual

No caso do flyrock, o risco inicial pode estar associado a uma condição de desmonte com potencial de projeção de fragmentos. A partir disso, o profissional adota controles, como:

• revisão do plano de fogo

• aumento do tampão

• redução da carga em regiões críticas

• melhoria do confinamento

• ajuste da sequência de iniciação

• inspeção da face livre

• retirada de pessoas e equipamentos

• ampliação da zona de exclusão

• controle rigoroso dos acessos

Essas medidas reduzem o risco, mas não tornam o sistema absolutamente infalível. Ainda pode existir a possibilidade de um fragmento ser lançado além do esperado, principalmente quando há variabilidade geológica, falha localizada de confinamento ou desvio operacional não identificado.

Por isso, o risco residual precisa ser avaliado antes da detonação. A pergunta não deve ser apenas:

*"O plano de fogo está correto?"*

Mas também:

*"Mesmo com o plano de fogo correto, o risco remanescente está adequadamente controlado?"*

## 11.2.3 Diferença entre reduzir incerteza e reduzir risco

Reduzir incerteza e reduzir risco são ações relacionadas, mas não são exatamente a mesma coisa.

Reduzir incerteza significa melhorar o conhecimento sobre o sistema. Isso pode ser feito por meio de:

• mapeamento geológico

• levantamento da face

• controle de perfuração

• medição dos furos

• registros de carregamento

• filmagens da detonação

• análise de eventos anteriores

• calibração de modelos

Essas ações ajudam o profissional a entender melhor o desmonte e a tomar decisões mais fundamentadas.

Reduzir risco significa diminuir a probabilidade de ocorrência de um evento indesejado ou reduzir suas consequências. Isso pode envolver:

• alterar o plano de fogo

• reduzir carga em áreas críticas

• aumentar o confinamento

• melhorar o tampão

• retirar equipamentos da área vulnerável

• evacuar pessoas

• bloquear acessos

• ampliar a zona de exclusão

Em muitos casos, uma ação pode reduzir simultaneamente incerteza e risco. Por exemplo, medir o afastamento real na face reduz a incerteza sobre o confinamento e pode levar à decisão de ajustar o carregamento, reduzindo também o risco.

No entanto, é importante perceber que conhecer melhor o risco não significa, automaticamente, eliminá-lo. Uma operação pode ter excelente diagnóstico e ainda assim exigir medidas conservadoras para manter a segurança.

## 11.2.4 Aceitabilidade do risco residual

Depois de identificar o risco residual, é necessário avaliar se ele é aceitável ou não.

Essa decisão depende de fatores como:

• presença de pessoas expostas

• proximidade de equipamentos

• existência de estruturas críticas

• possibilidade de atingir áreas externas

• histórico de eventos de flyrock

• qualidade dos dados disponíveis

• nível de confiança no plano de fogo

• severidade das consequências possíveis

Quando há exposição de pessoas, a tolerância ao risco deve ser extremamente baixa. Nesse caso, mesmo uma probabilidade pequena pode ser inaceitável, porque a consequência pode envolver lesão grave ou fatalidade.

Quando o risco envolve apenas equipamentos ou estruturas, a decisão ainda exige cautela, mas pode considerar outros elementos, como criticidade do ativo, custo do dano, possibilidade de interrupção operacional e facilidade de remoção ou proteção.

Em qualquer situação, o risco residual não deve ser aceito de forma automática. Ele precisa ser analisado, documentado e compatível com os critérios de segurança da operação.

## 11.2.5 Como lidar com o risco residual no flyrock

A gestão do risco residual exige uma abordagem estruturada. Quando o risco remanescente ainda é elevado, o profissional deve buscar novas camadas de controle.

Essa lógica mostra que o controle do flyrock não depende de uma única medida. Ele depende da combinação de várias barreiras que, juntas, reduzem a probabilidade de ocorrência e limitam as consequências caso algum desvio aconteça.

Por isso, a pergunta central da gestão de risco não é apenas:

*"Qual é a distância estimada de lançamento?"*

Mas sim:

*"Quais controles são necessários para que, mesmo diante da incerteza residual, pessoas, equipamentos e estruturas permaneçam protegidos?"*

# 11.3 Do resultado dos modelos à decisão conservadora

Os modelos de predição de flyrock são ferramentas importantes para apoiar a análise técnica do desmonte. Eles permitem estimar alcances, comparar cenários, avaliar a influência de variáveis e identificar condições mais críticas. No entanto, o resultado fornecido por um modelo não deve ser interpretado como uma verdade absoluta, nem como um limite exato entre o seguro e o inseguro.

Essa distinção é fundamental para a gestão de risco. Um modelo pode indicar, por exemplo, uma distância estimada de lançamento de fragmentos. Porém, essa distância depende das premissas adotadas, dos dados de entrada, da escolha do modelo, da calibração utilizada e das condições reais de campo. Portanto, o número calculado deve ser entendido como uma referência técnica para decisão, e não como uma garantia de comportamento real.

Na prática, a pergunta mais importante não é apenas:

*"Qual foi o alcance calculado pelo modelo?"*

A pergunta mais importante passa a ser:

*"Como esse resultado deve ser interpretado para tomar uma decisão segura?"*

É nesse ponto que a engenharia precisa avançar da estimativa para a decisão conservadora.

## 11.3.1 O resultado do modelo como estimativa, não como certeza

Todo modelo de predição simplifica a realidade. Mesmo os modelos mais avançados dependem de hipóteses e de parâmetros que tentam representar, de forma aproximada, um sistema muito complexo.

No caso do flyrock, essa complexidade envolve:

• geometria real da face livre

• afastamento efetivo e não apenas afastamento projetado

• altura e qualidade real do tampão

• distribuição efetiva da carga explosiva

• condição geológica local

• presença de fraturas, vazios e zonas alteradas

• forma, massa e orientação dos fragmentos

• mecanismo dominante de lançamento

• direção real de ejeção

Por isso, quando um modelo fornece uma distância, esse valor deve ser interpretado como uma estimativa construída a partir das condições assumidas. Ele não representa, necessariamente, o maior alcance possível em qualquer circunstância.

Isso não diminui a importância do modelo. Pelo contrário, o modelo continua sendo extremamente útil. O ponto é utilizá-lo de maneira correta: como ferramenta de apoio ao julgamento técnico, e não como substituto da análise crítica.

## 11.3.2 O risco da falsa precisão

Um dos principais cuidados na aplicação de modelos de predição é evitar a falsa precisão.

A falsa precisão ocorre quando um resultado numérico é interpretado com mais confiança do que realmente merece. Por exemplo, ao calcular um alcance de 286 m, pode surgir a impressão de que 285 m é seguro e 287 m é inseguro. Na prática, essa interpretação é inadequada.

O resultado calculado depende de condições que possuem variabilidade. Pequenas diferenças nos dados de entrada podem alterar significativamente o resultado final. Além disso, o comportamento real do desmonte pode ser influenciado por fatores não representados diretamente na fórmula.

Por isso, valores calculados devem ser tratados como aproximações. Em vez de interpretar o resultado como uma linha rígida, o profissional deve enxergá-lo como uma referência dentro de uma faixa de incerteza.

Assim, a leitura correta não é:

*"O modelo calculou 286 m, então essa é a distância exata."*

A leitura correta é:

*"O modelo indica que, nas condições assumidas, existe potencial de lançamento nessa ordem de grandeza, e a decisão de segurança deve considerar incertezas, consequências e margens adequadas."*

Essa mudança de interpretação evita decisões frágeis e reduz o risco de subdimensionar áreas de segurança.

## 11.3.3 A importância de comparar modelos, cenários e histórico

Uma decisão conservadora não deve depender de um único resultado isolado. Sempre que possível, o resultado de um modelo deve ser comparado com outras fontes de informação.

Entre as principais comparações úteis, destacam-se:

• resultados de diferentes modelos de predição

• cenários com parâmetros mais conservadores

• histórico de lançamentos observados na operação

• registros de eventos anteriores de flyrock

• condições geológicas e operacionais do desmonte atual

• experiência acumulada da equipe técnica

• inspeções de campo antes da detonação

Essa comparação ajuda a responder perguntas importantes:

• o resultado calculado está coerente com o histórico da mina ou obra?

• o cenário analisado representa a condição real ou apenas a condição ideal de projeto?

• há indícios de que o desmonte atual possui maior risco que desmontes anteriores?

• algum parâmetro de campo justifica adotar uma distância maior?

• o modelo utilizado é adequado para o mecanismo de lançamento mais provável?

Quando diferentes fontes apontam para a mesma ordem de grandeza, a decisão tende a ser mais robusta. Quando há divergência significativa entre modelos, histórico e observações de campo, o profissional deve adotar postura conservadora e investigar as causas da diferença antes de tomar a decisão final.

## 11.3.4 Transformando estimativa em decisão

O resultado do modelo só se torna útil quando é transformado em decisão operacional.

Essa transformação pode envolver diferentes tipos de ação, como:

• ajustar parâmetros do plano de fogo

• reduzir carga em áreas críticas

• aumentar o tampão

• melhorar o controle do afastamento efetivo

• alterar a direção de saída do desmonte

• ampliar a zona de exclusão

• retirar equipamentos de áreas vulneráveis

• reforçar bloqueios e vigilância dos acessos

• adiar a detonação diante de incertezas críticas

Em outras palavras, o modelo não deve ser usado apenas para produzir um número. Ele deve ajudar a responder o que precisa ser feito para reduzir o risco.

Por exemplo, se o modelo indica aumento expressivo do alcance quando o tampão é reduzido, a decisão pode ser reforçar o controle do tampão, revisar furos com possíveis desvios ou ampliar a zona de exclusão para aquele desmonte. Se o modelo mostra sensibilidade elevada ao afastamento, a decisão pode ser realizar verificação de face, levantamento com scanner ou ajuste de carga na primeira linha.

A decisão conservadora nasce justamente dessa integração entre cálculo, interpretação e ação.

## 11.3.5 Margens de segurança e fatores de segurança

Como os modelos não eliminam a incerteza, seus resultados devem ser acompanhados de margens de segurança adequadas ao nível de risco.

Essas margens podem ser aplicadas de diferentes formas:

• uso de fatores de segurança sobre a distância estimada

• adoção do maior valor entre diferentes modelos ou mecanismos

• consideração de cenários críticos em vez de cenários médios

• ampliação da zona de exclusão em presença de pessoas

• critérios mais restritivos em áreas próximas a estruturas sensíveis

• retirada preventiva de equipamentos quando houver dúvida relevante

Em análises de flyrock, a margem de segurança não deve ser vista como exagero, mas como resposta técnica à incerteza. Quanto maior a consequência potencial, maior deve ser o conservadorismo adotado.

A lógica é simples:

• se o risco envolve apenas desvio operacional controlado, a margem pode ser avaliada em função do contexto

• se o risco envolve equipamentos críticos, a decisão deve ser mais restritiva

• se o risco envolve pessoas, a tolerância deve ser mínima e a margem de segurança deve ser elevada

Dessa forma, a margem de segurança não é um número arbitrário. Ela deve refletir a qualidade dos dados disponíveis, o grau de incerteza do cenário, a severidade das consequências e o nível de exposição existente.

## 11.3.6 Critérios para uma decisão conservadora

Uma decisão conservadora não significa simplesmente adotar sempre a maior distância possível. Significa adotar uma decisão compatível com o risco real, com base em critérios técnicos, dados disponíveis e consequências potenciais.

Entre os critérios que devem orientar essa decisão, destacam-se:

• qualidade e confiabilidade dos dados de entrada

• adequação do modelo ao mecanismo analisado

• existência de calibração local

• histórico de eventos de flyrock na operação

• presença de geologia desfavorável

• nível de controle da execução

• proximidade de pessoas, equipamentos e estruturas

• possibilidade de impacto fora da área operacional

• capacidade de controlar acessos e garantir evacuação

• consequências potenciais em caso de falha

Quanto maior a incerteza e maior a consequência, mais conservadora deve ser a decisão.

Esse raciocínio é essencial porque o objetivo da gestão de risco não é provar que determinado desmonte "provavelmente será seguro", mas garantir que as medidas adotadas sejam suficientes para proteger pessoas, equipamentos, estruturas e áreas externas mesmo diante de desvios plausíveis.

# 11.4 Dados de campo como base para decisões de risco

A gestão de risco do flyrock depende diretamente da qualidade das informações disponíveis sobre a operação. Modelos, simulações, análises probabilísticas e decisões conservadoras só têm valor prático quando estão apoiados em dados de campo confiáveis, representativos e bem organizados.

Sem essa base, a análise tende a ficar genérica. O profissional pode até aplicar fórmulas, usar softwares ou adotar critérios conservadores, mas a decisão perde força técnica quando não existe conexão clara com a realidade do desmonte.

Por isso, os dados de campo não devem ser vistos apenas como registros administrativos. Eles são a base para compreender o comportamento real da operação, identificar padrões, reconhecer desvios, calibrar modelos e definir decisões de segurança mais consistentes.

No contexto do flyrock, a pergunta central não é apenas:

*"Quais dados foram registrados?"*

A pergunta mais importante é:

*"Esses dados ajudam a tomar uma decisão mais segura?"*

## 11.4.1 Dados que realmente importam para o risco de flyrock

Nem todo dado coletado possui o mesmo valor para a gestão do risco. O mais importante é registrar informações que ajudem a compreender a relação entre projeto, execução, geologia, comportamento do desmonte e exposição ao risco.

Entre os dados mais relevantes, destacam-se:

• geometria real do plano de fogo

• diâmetro, profundidade, inclinação e desvio dos furos

• afastamento e espaçamento reais

• altura real do tampão

• qualidade e tipo de material de tamponamento

• tipo, densidade e quantidade de explosivo utilizado

• distribuição da carga ao longo do furo

• sequência e temporização da detonação

• condições da face livre

• presença de fraturas, cavidades, zonas alteradas ou água

• direção de saída do desmonte

• comportamento da pilha após a detonação

• registros de lançamentos excessivos ou flyrock

• distância e direção dos fragmentos encontrados

• posição de pessoas, equipamentos, estruturas e acessos no momento do fogo

Esses dados permitem transformar uma análise genérica em uma análise específica da operação. Eles ajudam a responder não apenas se o plano estava bem elaborado, mas se ele foi executado de forma compatível com o risco real presente em campo.

## 11.4.2 Dados de projeto, dados de execução e dados de resultado

Para que a análise seja útil, é importante diferenciar três grupos de informação:

• dados de projeto

• dados de execução

• dados de resultado

Os dados de projeto representam aquilo que foi planejado. Incluem parâmetros como malha, afastamento, espaçamento, profundidade dos furos, carga prevista, altura de tampão, sequência de iniciação e direção esperada de deslocamento.

Os dados de execução mostram aquilo que realmente foi feito em campo. Eles incluem medições reais dos furos, ajustes de carregamento, variações de tampão, presença de água, furos perdidos, alterações de última hora, desvios identificados e decisões tomadas durante a preparação.

Já os dados de resultado mostram como o desmonte se comportou. Incluem fragmentação, deslocamento da pilha, ocorrência de lançamentos excessivos, localização de fragmentos projetados, danos observados, distância máxima encontrada e registros visuais ou fotográficos.

Essa separação é fundamental porque muitos problemas de flyrock surgem justamente da diferença entre o projetado e o executado. Um plano de fogo pode estar tecnicamente adequado no papel, mas a execução real pode modificar o confinamento, a distribuição de energia e o comportamento final do desmonte.

Por isso, a gestão de risco deve comparar constantemente:

*projeto → execução → resultado*

É nessa comparação que surgem os aprendizados mais importantes.

## 11.4.3 Histórico operacional e identificação de padrões

Um dos ativos mais importantes para a gestão do risco de flyrock é o histórico operacional da mina ou da obra.

Cada detonação executada gera informação. Quando essa informação é registrada e analisada, ela permite identificar padrões que dificilmente seriam percebidos em avaliações isoladas.

O histórico operacional pode mostrar, por exemplo:

• determinados setores com maior tendência a lançamento

• bancadas com maior variabilidade geológica

• configurações de plano de fogo associadas a maior risco

• influência de mudanças no tampão ou na carga

• relação entre direção de saída e ocorrência de projeções

• impacto de diferentes tipos de material de tamponamento

• recorrência de eventos em determinadas condições de face

• diferença de comportamento entre minério, estéril ou litologias específicas

Esse conhecimento local é essencial porque o flyrock possui forte dependência das condições reais de campo. Modelos e referências externas são úteis, mas o comportamento histórico da própria operação costuma ser uma das fontes mais importantes para orientar decisões.

Quando bem utilizado, o histórico permite que a operação deixe de tomar decisões apenas com base em regras genéricas e passe a construir critérios próprios, mais alinhados à realidade do seu maciço, dos seus equipamentos, da sua equipe e dos seus riscos.

## 11.4.4 Dados para calibração, validação e melhoria dos modelos

Os modelos de predição só se tornam mais confiáveis quando são comparados com dados reais.

Essa comparação pode ocorrer de duas formas principais:

• calibração

• validação

A calibração busca ajustar parâmetros do modelo para que ele represente melhor o comportamento observado na operação. Isso pode envolver, por exemplo, a escolha de constantes empíricas mais compatíveis com a realidade local, a revisão de hipóteses adotadas ou a definição de fatores de segurança mais adequados.

A validação, por sua vez, verifica se o modelo, depois de ajustado ou selecionado, produz resultados coerentes com eventos reais observados em campo.

No caso do flyrock, essa etapa é especialmente importante porque muitos modelos foram desenvolvidos a partir de condições específicas, que podem não representar perfeitamente a realidade de uma determinada mina ou obra.

Para calibrar e validar modelos, são necessários dados como:

• parâmetros reais do plano de fogo

• características do explosivo utilizado

• afastamento e tampão efetivos

• mecanismo provável de lançamento

• distância máxima observada

• direção dos fragmentos projetados

• condições geológicas associadas ao evento

• registros fotográficos, filmagens ou levantamentos de campo

Sem esses dados, o modelo continua sendo apenas uma referência geral. Com esses dados, ele passa a ser uma ferramenta mais conectada à realidade da operação.

## 11.4.5 Dados de exposição e consequência

Na gestão de risco, não basta conhecer apenas o comportamento do desmonte. Também é necessário conhecer o que está exposto ao risco.

Isso significa registrar e avaliar:

• posição de pessoas antes da detonação

• localização de equipamentos móveis

• posição de estruturas fixas

• vias de acesso próximas

• áreas operacionais simultâneas

• limites de propriedade

• comunidades ou terceiros no entorno

• áreas ambientais sensíveis

• infraestrutura crítica, como redes elétricas, correias, britadores, oficinas e prédios administrativos

Essas informações são fundamentais porque o risco depende da combinação entre evento e consequência. Um mesmo alcance de fragmento pode ter significados muito diferentes dependendo do que existe naquela direção.

Por exemplo:

• um lançamento de 200 m para uma área vazia pode representar apenas um desvio a ser corrigido

• o mesmo lançamento de 200 m em direção a uma via, equipamento ou área ocupada pode representar um evento crítico

Por isso, a decisão de risco precisa integrar dois tipos de dado:

*dados do desmonte + dados de exposição*

Sem essa integração, a análise fica incompleta.

## 11.4.6 Qualidade, padronização e rastreabilidade dos dados

A utilidade dos dados depende diretamente da sua qualidade. Dados incompletos, imprecisos ou registrados sem padrão podem gerar interpretações equivocadas. Em alguns casos, podem criar uma falsa sensação de controle, pois a operação parece ter registros, mas esses registros não são suficientes para sustentar decisões confiáveis.

Para que os dados sejam úteis à gestão de risco, eles precisam ser:

• completos

• rastreáveis

• padronizados

• comparáveis ao longo do tempo

• vinculados ao desmonte específico

• disponíveis para análise posterior

• registrados por pessoas capacitadas

• acompanhados de evidências quando possível




A rastreabilidade é especialmente importante. Ela permite reconstruir o desmonte depois da detonação, entendendo o que foi planejado, o que foi executado, quais ajustes foram feitos e quais resultados foram observados.

Essa capacidade é essencial para aprendizado técnico, auditorias, investigação de incidentes e defesa técnica da operação.

## 11.4.7 Dados como base da decisão, não apenas do relatório

Um erro comum é tratar os dados apenas como documentação posterior ao desmonte. Nesse caso, eles servem para preencher relatórios, arquivar informações e atender exigências formais, mas não influenciam efetivamente a tomada de decisão.

Na gestão de risco, os dados devem ter uma função mais ativa. Eles devem ajudar a decidir:

• se o plano de fogo precisa ser ajustado

• se a zona de exclusão deve ser ampliada

• se equipamentos devem ser removidos

• se determinada área deve ser interditada

• se o desmonte pode ser executado com segurança

• se é necessário adiar a detonação

• se o histórico recomenda maior conservadorismo

• se os controles existentes são suficientes

Dessa forma, o dado deixa de ser apenas registro e passa a ser instrumento de decisão.

Uma operação madura não coleta dados apenas para comprovar o que fez. Ela coleta dados para aprender, ajustar, decidir e reduzir risco.

# 11.5 Cenários de risco e barreiras de controle

A gestão de risco do flyrock exige mais do que reconhecer que existem incertezas. É necessário transformar essas incertezas em cenários concretos de análise, capazes de orientar decisões antes da detonação.

Um cenário de risco representa uma situação em que determinadas condições podem favorecer a ocorrência de flyrock ou aumentar suas consequências. Ele combina três elementos principais:

• uma condição crítica ou ameaça

• um mecanismo provável de geração

• uma consequência possível

Essa abordagem é importante porque aproxima a análise da realidade de campo. Em vez de tratar o flyrock apenas como um fenômeno genérico, o profissional passa a perguntar:

*"Quais situações específicas podem gerar risco neste desmonte?"*

A partir dessa pergunta, torna-se possível identificar barreiras de controle adequadas. Essas barreiras são medidas técnicas, operacionais ou administrativas aplicadas para impedir que o cenário de risco se materialize ou para reduzir suas consequências caso ele ocorra.

## 11.5.1 O que é um cenário de risco no contexto do flyrock

No contexto do flyrock, um cenário de risco pode ser entendido como uma combinação de fatores que aumenta a possibilidade de projeção de fragmentos além dos limites desejados.

Por exemplo:

• afastamento real menor que o planejado na primeira linha

• tampão insuficiente ou mal executado

• presença de fraturas abertas conectando a carga à face livre

• colar do furo muito fraturado

• carga excessiva próxima ao topo do furo

• geometria irregular da face

• direção de saída voltada para equipamentos ou estruturas

• falha no isolamento da área

• presença de pessoas ou equipamentos dentro da zona vulnerável

Cada um desses cenários exige uma leitura própria. Um afastamento reduzido pode estar mais associado a **face burst**. Um tampão insuficiente pode favorecer **cratering** ou **rifling**. Uma falha no cerco de área pode não aumentar a probabilidade de geração de flyrock, mas aumenta drasticamente a consequência, porque expõe pessoas ou equipamentos ao risco.

Por isso, a análise de cenários permite separar duas dimensões importantes:

• cenários que aumentam a probabilidade de ocorrência

• cenários que aumentam a severidade das consequências

Ambos são relevantes para a gestão de risco.

## 11.5.2 Transformando incertezas em cenários analisáveis

Nem toda incerteza precisa ser tratada de forma abstrata. Para que ela seja útil à tomada de decisão, deve ser transformada em uma pergunta operacional.

Por exemplo, em vez de apenas afirmar que existe incerteza geológica, o profissional pode perguntar:

• há fraturas abertas na face que podem reduzir o confinamento?

• existe zona alterada no topo da bancada?

• há cavidades, vazios ou planos de fraqueza próximos aos furos?

• a litologia muda dentro da área do desmonte?

Da mesma forma, em vez de falar genericamente em incerteza operacional, é possível perguntar:

• o afastamento real foi conferido?

• os furos apresentaram desvios significativos?

• houve variação na profundidade dos furos?

• o carregamento executado corresponde ao planejado?

• o tampão foi aplicado com altura e qualidade adequadas?

E, no caso da incerteza humana ou organizacional:

• a equipe compreendeu o plano de fogo?

• houve comunicação clara antes da detonação?

• os acessos foram efetivamente bloqueados?

• os vigias de cerco foram posicionados corretamente?

• existe autorização para interromper a detonação em caso de dúvida?

Esse tipo de pergunta transforma a incerteza em item verificável. A partir disso, a análise deixa de ser genérica e passa a orientar ações concretas.

### 11.5.3 Barreiras preventivas e barreiras mitigadoras

As barreiras de controle podem ser divididas, de forma simples, em dois grandes grupos:

• barreiras preventivas

• barreiras mitigadoras

As **barreiras preventivas** atuam antes do evento e têm como objetivo reduzir a probabilidade de ocorrência do flyrock. Elas procuram impedir que a condição crítica se forme ou que o mecanismo de lançamento seja ativado.

Entre as principais barreiras preventivas, destacam-se:

• revisão do plano de fogo

• controle do afastamento real

• ajuste de carga em regiões críticas

• aumento ou melhoria do tampão

• conferência dos furos antes do carregamento

• inspeção da face livre

• identificação de fraturas, vazios e zonas alteradas

• controle da sequência de iniciação

• capacitação da equipe

• aplicação rigorosa dos procedimentos operacionais

As **barreiras mitigadoras**, por sua vez, não impedem necessariamente que o flyrock ocorra, mas reduzem as consequências caso ele aconteça.

Entre as principais barreiras mitigadoras, destacam-se:

• definição adequada da zona de exclusão

• evacuação de pessoas

• retirada ou proteção de equipamentos

• bloqueio de acessos

• posicionamento de vigias de cerco

• sinalização e comunicação antes da detonação

• uso de barreiras físicas quando aplicável

• controle do retorno após a detonação

• inspeção pós-fogo antes da liberação da área




Essa distinção é fundamental. Um bom plano de fogo reduz a probabilidade de ocorrência. Uma boa zona de exclusão reduz a exposição. As duas dimensões precisam trabalhar juntas.

## 11.5.4 Camadas de controle no gerenciamento do flyrock

A gestão eficaz do flyrock não deve depender de uma única barreira. Ela deve ser construída por camadas de controle.

A lógica é simples: se uma barreira falhar ou for insuficiente, outras barreiras devem continuar protegendo pessoas, equipamentos e estruturas.

No contexto do flyrock, essas camadas podem ser organizadas da seguinte forma:

• **camada de projeto**, que envolve plano de fogo, carga, malha, afastamento, tampão, sequência e direção de saída

• **camada geológica**, que envolve leitura da face, identificação de descontinuidades, zonas fraturadas, cavidades e variações do maciço

• **camada operacional**, que envolve perfuração, carregamento, conferência dos furos, aplicação do tampão e execução conforme o plano

• **camada de modelagem**, que envolve estimativas de alcance, análise de cenários, comparação de modelos e fatores de segurança

• **camada de exposição**, que envolve retirada de pessoas, equipamentos e controle de áreas vulneráveis

• **camada de cerco de área**, que envolve bloqueios, vigias, sinalização, comunicação e controle de acessos

• **camada de verificação**, que envolve inspeção antes da detonação, autorização final, checklist e liberação segura após o fogo

Essa abordagem por camadas evita que a segurança dependa apenas de um cálculo, de uma pessoa ou de um procedimento isolado. Ela torna o controle mais robusto e mais defensável.

## 11.5.5 Exemplos de cenários de risco e barreiras associadas

Para entender melhor essa lógica, podemos observar alguns exemplos práticos.

Em um cenário de **afastamento real menor que o projetado**, o mecanismo mais provável é o **face burst**, com projeção à frente da bancada. As barreiras preventivas incluem conferência da face, levantamento do afastamento efetivo, ajuste de carga na primeira linha e revisão da direção de saída. As barreiras mitigadoras incluem ampliação da zona de exclusão à frente da face e retirada de equipamentos posicionados nessa direção.

Em um cenário de **tampão insuficiente ou mal executado**, os mecanismos mais prováveis são **cratering** e **rifling**. As barreiras preventivas incluem medição da altura real do tampão, uso de material adequado, controle do carregamento próximo ao topo do furo e inspeção do colar. As barreiras mitigadoras incluem ampliação da zona de exclusão ao redor do desmonte e atenção especial a estruturas ou pessoas em cotas superiores.

Em um cenário de **fraturas abertas conectando a carga à face livre**, o risco está associado à fuga preferencial de gases e à perda localizada de confinamento. As barreiras preventivas incluem leitura geológica da face, ajuste de carga, tamponamento adicional, alteração do plano de fogo e, quando necessário, exclusão de furos críticos. As barreiras mitigadoras incluem ampliação da área isolada na direção provável de projeção.

Em um cenário de **equipamento posicionado dentro da zona vulnerável**, o problema principal não é necessariamente o aumento da probabilidade de flyrock, mas o aumento da consequência. A barreira principal é a retirada do equipamento, sua proteção ou a alteração da zona de exclusão. Isso mostra que a gestão de risco não envolve apenas controlar o fenômeno, mas também controlar a exposição.

Em um cenário de **falha no cerco de área**, o risco se torna crítico mesmo que o plano de fogo esteja bem elaborado. Nesse caso, as barreiras envolvem comunicação clara, posicionamento correto dos vigias, bloqueio físico dos acessos, confirmação da evacuação, uso de sirenes, autorização final e controle do retorno após a detonação.

## 11.5.6 Da lista de riscos à decisão operacional

A identificação de cenários e barreiras só tem valor quando influencia a decisão operacional.

Por isso, cada cenário analisado deve levar a uma pergunta prática:

• o desmonte pode seguir como planejado?

• é necessário ajustar o plano de fogo?

• a zona de exclusão deve ser ampliada?

• equipamentos precisam ser retirados?

• alguma área adicional deve ser bloqueada?

• a equipe precisa reforçar a comunicação ou o cerco?

• a detonação deve ser adiada até nova verificação?

Essa é a diferença entre uma análise formal e uma análise útil. A gestão de risco não consiste apenas em preencher uma matriz ou listar perigos. Ela consiste em usar essa análise para tomar decisões que realmente reduzam a exposição e aumentem a segurança.

No controle do flyrock, uma decisão operacional bem fundamentada deve considerar:

• o mecanismo mais provável de lançamento

• as condições reais do desmonte

• a confiabilidade dos dados disponíveis

• a presença de incertezas relevantes

• as barreiras preventivas existentes

• as barreiras mitigadoras necessárias

• a severidade das consequências possíveis

• a capacidade real de controlar a área em campo

Dessa forma, os cenários de risco e as barreiras de controle funcionam como ponte entre a compreensão técnica do flyrock e a gestão prática da segurança na operação.

# 11.6 Diferença entre prever e gerenciar

Após compreender a importância dos dados de campo, dos cenários de risco e das barreiras de controle, torna-se necessário consolidar uma distinção fundamental para a maturidade técnica no controle do flyrock:

*prever e gerenciar são atividades diferentes, embora complementares.*

A previsão procura estimar o comportamento possível do fenômeno. A gestão, por sua vez, transforma essa estimativa em decisão, controle e ação prática no campo.

Essa diferença é essencial porque, no contexto do flyrock, o objetivo final da engenharia não é apenas calcular uma distância provável de lançamento, mas garantir que pessoas, equipamentos e estruturas permaneçam protegidos mesmo diante das incertezas do desmonte.

## 11.6.1 O que significa prever

Prever, no contexto do flyrock, significa tentar estimar o comportamento do sistema com base em informações técnicas disponíveis.

Essa previsão pode ser realizada por meio de:

• modelos empíricos e semiempíricos

• modelos balísticos

• análise de SDoB e confinamento

• simulações computacionais

• dados históricos

• registros de campo

• observações de eventos anteriores

• análises probabilísticas

A previsão busca responder perguntas como:

• qual pode ser o alcance dos fragmentos?

• quais mecanismos de lançamento são mais prováveis?

• quais condições aumentam ou reduzem o risco?

• como diferentes parâmetros influenciam o resultado?

• quais cenários devem ser considerados mais críticos?

Ela é uma etapa indispensável, porque organiza o raciocínio técnico e permite comparar alternativas. Sem previsão, a decisão fica excessivamente intuitiva. Com previsão, o profissional passa a ter uma base mais estruturada para avaliar o comportamento esperado do desmonte.

No entanto, a previsão continua sendo uma estimativa. Ela depende dos dados disponíveis, das premissas adotadas, da escolha do modelo e da qualidade da interpretação técnica.

Por isso, prever significa estimar o que pode acontecer, e não garantir exatamente o que irá acontecer.

## 11.6.2 O que significa gerenciar

Gerenciar significa agir sobre o sistema para reduzir o risco associado ao flyrock.

Enquanto a previsão busca compreender o comportamento possível dos fragmentos, a gestão de risco busca definir o que deve ser feito diante desse comportamento possível.

A gestão procura responder perguntas como:

• o risco identificado é aceitável?

• quem ou o que pode ser atingido?

• quais consequências podem ocorrer?

• quais controles devem ser adotados?

• a zona de exclusão está adequada?

• os acessos estão bloqueados?

• os equipamentos precisam ser retirados?

• a detonação pode seguir ou deve ser adiada?

Na prática, gerenciar envolve:

• ajustar o plano de fogo

• reduzir a probabilidade de ocorrência

• limitar as consequências possíveis

• definir áreas de segurança

• evacuar pessoas

• retirar ou proteger equipamentos

• controlar acessos

• aplicar fatores ou margens de segurança

• registrar decisões e premissas

• revisar resultados após a detonação

Assim, gerenciar não é apenas calcular. É decidir, implementar, verificar e controlar.

No contexto do flyrock, uma boa gestão transforma conhecimento técnico em proteção real no campo.

## 11.6.3 Por que prever não elimina a necessidade de gerenciar

Um erro comum é acreditar que, quanto melhor for a previsão, menor será a necessidade de gestão de risco. Na realidade, ocorre o contrário: uma boa previsão deve fortalecer a gestão, e não substituí-la.

Mesmo quando um modelo é bem aplicado, ainda permanecem incertezas associadas à geologia, à execução, ao fator humano e à própria variabilidade do fenômeno.

Isso significa que:

• um alcance calculado não garante contenção absoluta dos fragmentos

• um modelo validado não elimina desvios operacionais

• um bom histórico não impede a ocorrência de uma condição geológica local desfavorável

• uma tecnologia avançada não substitui controle de área e disciplina operacional

A previsão ajuda a entender o cenário, mas a gestão define as barreiras necessárias para lidar com esse cenário.

Por isso, a segurança não deve depender apenas da pergunta:

*"Qual foi o alcance estimado?"*

Ela deve depender também de perguntas como:

• existe alguém exposto dentro ou próximo dessa distância?

• a zona de exclusão considera incertezas e cenários críticos?

• os equipamentos foram retirados da área vulnerável?

• existe controle efetivo dos acessos?

• há margem de segurança compatível com a consequência possível?

• se o resultado real superar a estimativa, ainda haverá proteção suficiente?

Essas perguntas mostram que previsão sem gestão é insuficiente para garantir segurança.

## 11.6.4 A passagem da física para a decisão

Até este ponto do curso, o flyrock foi estudado principalmente como fenômeno físico e operacional. Foram analisados seus mecanismos, causas, modelos, variáveis e tecnologias de apoio.

Agora, o foco passa a ser a decisão.

Essa mudança pode ser resumida da seguinte forma:

• a física ajuda a entender como o fragmento pode ser lançado

• os modelos ajudam a estimar até onde ele pode chegar

• os dados ajudam a aproximar a análise da realidade local

• a gestão de risco define o que deve ser feito para impedir a exposição

Essa passagem é fundamental porque o problema do flyrock não termina quando se calcula uma distância. Ele só é efetivamente controlado quando essa distância, somada às incertezas e consequências possíveis, é traduzida em medidas operacionais claras.

Em outras palavras, a pergunta deixa de ser apenas:

*"Qual é o alcance do flyrock?"*

E passa a ser:

*"Como garantir que ninguém esteja exposto ao alcance plausível do flyrock?"*

Essa segunda pergunta é mais completa, mais segura e mais alinhada com a responsabilidade técnica.

## 11.6.5 Previsão, gestão e responsabilidade técnica

A diferença entre prever e gerenciar também está diretamente ligada à responsabilidade técnica.

O profissional responsável não deve apenas demonstrar que aplicou um modelo ou calculou uma distância. Ele precisa demonstrar que interpretou o resultado, avaliou as incertezas, considerou as consequências e adotou medidas compatíveis com o risco.

Isso envolve uma cadeia de responsabilidade:

• compreender o fenômeno

• estimar cenários possíveis

• avaliar exposição e consequência

• definir controles adequados

• garantir execução dos controles

• registrar decisões e justificativas

• revisar resultados após a detonação

Quando essa cadeia é bem conduzida, a decisão se torna mais defensável técnica e operacionalmente.

Por outro lado, quando a decisão se baseia apenas em um número calculado, sem análise crítica e sem controle de campo, a operação fica vulnerável. Nesse caso, mesmo que o modelo tenha sido aplicado corretamente, a gestão do risco pode ter sido insuficiente.

Por isso, no contexto do flyrock, prever é uma etapa importante, mas gerenciar é a responsabilidade central.

## 11.7 Necessidade de incorporar risco, consequência e zona de exclusão

Depois de compreender a diferença entre prever e gerenciar, o próximo passo é consolidar os elementos que transformam a análise técnica do flyrock em decisão operacional. Para isso, é necessário incorporar três conceitos fundamentais:

• risco

• consequência

• zona de exclusão

Esses três elementos mudam a forma de interpretar o problema. A pergunta deixa de ser apenas:

*"Qual é a distância estimada de lançamento?"*

E passa a ser:

*"Qual é o risco associado a esse lançamento e como a operação deve impedir a exposição de pessoas, equipamentos e estruturas?"*

Essa mudança é essencial porque o flyrock não pode ser tratado apenas como uma distância. Ele precisa ser analisado como um evento capaz de gerar consequências, dependendo de onde ocorre, em qual direção se manifesta e o que está exposto dentro da área potencialmente atingida.

### 11.7.1 Da distância ao risco

A distância de lançamento é uma informação importante, mas não é suficiente para representar o risco.

Um modelo pode estimar que determinado fragmento alcance 150 m, 300 m ou 500 m. No entanto, esse número, isoladamente, não informa se haverá dano, acidente ou perda operacional. Para isso, é necessário avaliar o contexto.

Por exemplo:

• um fragmento lançado a 400 m em direção a uma área vazia pode não atingir nenhum alvo relevante

• um fragmento lançado a 120 m em direção a uma área com pessoas, equipamentos ou estruturas pode representar um evento crítico

• um fragmento lançado dentro da mina pode ser controlável se a área estiver isolada

• o mesmo fragmento pode ser inaceitável se atingir uma via pública, comunidade ou instalação sensível

Isso mostra que a distância é apenas uma parte da análise. O risco depende da combinação entre o evento possível e a exposição existente.

Por isso, a análise deve evoluir de uma lógica puramente espacial para uma lógica de risco. Não basta perguntar até onde o fragmento pode chegar. É necessário perguntar o que existe dentro dessa distância, qual a vulnerabilidade dos elementos expostos e quais consequências podem ocorrer caso o evento aconteça.

### 11.7.2 Consequência como parte inseparável da análise

O risco associado ao flyrock não depende apenas da possibilidade de lançamento, mas também da consequência do impacto.

A consequência está relacionada ao tipo de alvo que pode ser atingido. Entre os principais elementos expostos, destacam-se:

• pessoas

• equipamentos móveis

• instalações fixas

• estruturas civis

• redes elétricas

• correias transportadoras

• britadores e plantas de beneficiamento

• vias de acesso

• comunidades próximas

• propriedades externas

• áreas ambientais sensíveis

A mesma condição de desmonte pode gerar níveis de risco muito diferentes conforme o que está exposto. Um lançamento em direção a uma pilha de material, por exemplo, tem consequência diferente de um lançamento em direção a uma área com trabalhadores. Da mesma forma, um fragmento que atinge uma área isolada tem significado diferente de um fragmento que atinge uma estrutura crítica para a continuidade da operação.

Essa análise é especialmente importante porque, no caso de pessoas, a tolerância ao risco deve ser extremamente baixa. Mesmo que a probabilidade de ocorrência seja pequena, a consequência pode ser grave ou fatal. Por isso, quando existe possibilidade de exposição humana, a gestão deve ser mais conservadora.

No caso de equipamentos e estruturas, a consequência também deve ser avaliada com cuidado. Danos materiais podem gerar custos elevados, paralisações, perda de produção, investigação, autuações e impactos reputacionais. Portanto, a consequência não deve ser interpretada apenas como dano físico imediato, mas como o conjunto de efeitos que pode se desdobrar após o evento.

## 11.7.3 Exposição: o elo entre evento e consequência

A exposição é o elemento que conecta a possibilidade de flyrock à existência real de risco.

Um fragmento só se torna uma ameaça concreta quando existe algo vulnerável em sua trajetória ou dentro da área potencialmente atingida. Por isso, controlar a exposição é uma das formas mais eficazes de reduzir o risco, mesmo quando a incerteza sobre o alcance permanece.

No contexto do desmonte, a exposição pode envolver:

• trabalhadores na área de risco

• vigias posicionados inadequadamente

• equipamentos estacionados em locais vulneráveis

• veículos transitando próximos à área de detonação

• estruturas fixas próximas à frente de lavra

• atividades simultâneas dentro da área de influência

• terceiros em áreas externas próximas

A gestão do flyrock precisa, portanto, atuar em duas frentes:

• reduzir a probabilidade de geração do flyrock por meio de controles de projeto e execução
• reduzir a exposição por meio de evacuação, bloqueio, isolamento e controle da área

Essa segunda frente é fundamental. Mesmo que não seja possível eliminar completamente a possibilidade de lançamento, é possível impedir que pessoas e ativos vulneráveis estejam presentes em áreas onde poderiam ser atingidos.

## 11.7.4 Zona de exclusão como resposta prática ao risco

A zona de exclusão é uma das principais respostas práticas à gestão do risco de flyrock.

Ela representa a área que deve ser isolada antes da detonação para garantir que pessoas, equipamentos ou elementos vulneráveis não permaneçam expostos aos efeitos perigosos do desmonte.

No contexto do flyrock, a zona de exclusão deve considerar:

• alcance estimado dos fragmentos

• incertezas associadas à previsão

• histórico de eventos da operação

• mecanismos prováveis de lançamento

• direção de saída do desmonte

• topografia e diferenças de cota

• presença de pessoas, equipamentos e estruturas

• consequências potenciais em caso de falha

• capacidade real de controlar acessos e evacuar a área

Essa definição não deve ser tratada como um número arbitrário, nem como uma distância fixa aplicada automaticamente a todos os desmontes. Ela deve ser resultado de uma análise técnica e operacional, capaz de integrar predição, risco, consequência e exposição.

A zona de exclusão é, portanto, a materialização da gestão de risco no campo. Ela transforma a análise em ação concreta: retirar pessoas, afastar equipamentos, bloquear acessos, posicionar vigias, comunicar a detonação e controlar o retorno após o fogo.

## 11.7.5 Zona de exclusão não é apenas distância

Um erro comum é tratar a zona de exclusão apenas como uma distância ao redor do desmonte.

Embora a distância seja um elemento importante, ela não é suficiente. Uma zona de exclusão efetiva precisa ser planejada, comunicada, implementada e verificada em campo.

Isso envolve:

• delimitação clara da área a ser isolada

• identificação dos acessos que precisam ser bloqueados

• definição de pontos de controle e vigias

• comunicação com equipes internas e áreas vizinhas

• uso de sinalização e avisos sonoros

• confirmação da evacuação antes da detonação

• autorização final para o fogo

• controle do retorno após a detonação

Essa visão é especialmente importante porque uma zona de exclusão mal implementada pode falhar mesmo quando a distância definida parece adequada. Se houver acesso não bloqueado, comunicação deficiente, vigia mal posicionado ou retorno prematuro à área, o risco permanece.

Portanto, a zona de exclusão deve ser entendida como um sistema operacional de controle, e não apenas como um raio desenhado no mapa.

## 11.7.6 Integração entre predição, consequência e decisão

A definição da zona de exclusão deve nascer da integração entre diferentes informações.

A predição fornece uma estimativa do que pode acontecer. A análise de consequência mostra o que pode ser atingido e qual seria a gravidade do evento. A avaliação de exposição identifica quem ou o que está dentro da área vulnerável. A decisão operacional transforma tudo isso em controles concretos.

Essa integração pode ser representada pela seguinte lógica:

• estimar o alcance plausível

• avaliar os mecanismos prováveis

• identificar pessoas, equipamentos e estruturas expostas

• analisar a severidade das consequências

• definir margem de segurança adequada

• estabelecer a zona de exclusão

• implementar o cerco de área

• verificar a evacuação e o bloqueio dos acessos

• liberar a detonação apenas quando os controles estiverem confirmados

Essa sequência mostra que a gestão do flyrock é um processo de decisão estruturado. O cálculo é importante, mas ele é apenas uma parte do processo. A segurança depende da capacidade de transformar cálculo e análise em controle efetivo no campo.

## 11.7.7 Preparação para o próximo curso

A incorporação dos conceitos de risco, consequência e zona de exclusão representa a transição natural entre este curso e o próximo.

Neste primeiro curso, o foco foi compreender o flyrock: seus mecanismos, fundamentos físicos, causas, controles, modelos e limitações. A partir dessa base, torna-se possível avançar para uma etapa mais aplicada, voltada à definição, implantação e gestão da zona de exclusão.

O próximo curso aprofundará justamente essa dimensão prática. Nele, a zona de exclusão será tratada não apenas como uma distância de segurança, mas como um processo completo de gestão operacional do risco de flyrock, envolvendo critérios de decisão, fatores de segurança, procedimentos de cerco, comunicação, evacuação, vigilância, documentação e melhoria contínua.

Dessa forma, o Módulo 11 cumpre uma função estratégica dentro da formação. Ele encerra a discussão sobre as limitações da predição e abre caminho para uma abordagem mais ampla, na qual o flyrock passa a ser gerenciado como risco operacional crítico.

# 11.8 Fechamento do módulo

Ao longo deste módulo, foi construída a transição entre a lógica da predição e a lógica da gestão de risco aplicada ao flyrock.

Nos módulos anteriores, o curso concentrou-se em compreender o fenômeno, seus mecanismos, causas, formas de controle, fundamentos físicos, modelos de predição e tecnologias de apoio. Neste módulo, o foco avançou para uma questão essencial da prática profissional:

*como tomar decisões seguras mesmo quando a previsão possui limitações.*

Esse avanço é fundamental, pois o controle do flyrock não depende apenas da capacidade de estimar uma distância de lançamento. Depende também da capacidade de interpretar essa estimativa, reconhecer incertezas, avaliar consequências, controlar a exposição e implementar barreiras efetivas em campo.

Assim, o Módulo 11 consolidou uma mudança importante de perspectiva. O flyrock deixou de ser analisado apenas como fenômeno físico e passou a ser tratado como risco operacional crítico, que precisa ser gerenciado por meio de critérios técnicos, dados confiáveis, decisões conservadoras e controle operacional disciplinado.

## 11.8.1 Síntese da transição da predição para a gestão de risco

A principal ideia desenvolvida neste módulo é que prever e gerenciar são atividades diferentes, embora complementares.

A predição continua sendo uma ferramenta importante. Ela permite estimar alcances, comparar cenários, avaliar mecanismos prováveis e reconhecer condições mais críticas. No entanto, seus resultados não devem ser interpretados como verdades absolutas ou limites exatos entre o seguro e o inseguro.

Por isso, foi reforçado que:

• modelos produzem estimativas, não garantias absolutas

• resultados numéricos devem ser interpretados com cautela

• dados de campo são essenciais para dar consistência à análise

• incertezas residuais permanecem mesmo após bons controles

• risco residual precisa ser reconhecido e avaliado

• decisões conservadoras devem considerar probabilidade, consequência e exposição

Também foi mostrado que a gestão do risco de flyrock exige a construção de cenários. Em vez de tratar o risco de forma genérica, o profissional deve identificar situações específicas que podem favorecer o ultralançamento, como afastamento reduzido, tampão insuficiente, fraturas abertas, falhas de carregamento, equipamentos expostos ou deficiência no cerco de área.

A partir desses cenários, torna-se possível definir barreiras de controle adequadas, tanto preventivas quanto mitigadoras. As barreiras preventivas buscam reduzir a probabilidade de ocorrência do flyrock. As barreiras mitigadoras buscam reduzir suas consequências, especialmente por meio da evacuação, da retirada de equipamentos, do bloqueio de acessos e da definição adequada da zona de exclusão.

Dessa forma, a segurança deixa de depender de uma única fórmula ou de uma única medida e passa a ser construída por camadas de controle.

## 11.8.2 O que o aluno deve ter entendido ao final do módulo

Ao concluir este módulo, o aluno deve compreender que:

• a predição do flyrock é importante, mas não encerra o problema da segurança

• o resultado de um modelo deve ser interpretado como referência técnica, não como valor absoluto

• a falsa precisão pode levar a decisões inseguras quando números são tratados como certezas

• a incerteza residual permanece mesmo após planejamento, modelagem, controle e tecnologia

• o risco residual precisa ser avaliado antes da detonação

• dados de campo são essenciais para calibrar modelos, validar hipóteses e sustentar decisões

• cenários de risco ajudam a transformar incertezas em análises práticas

• barreiras preventivas e mitigadoras precisam atuar de forma integrada

• consequência e exposição são partes inseparáveis da análise de risco

• zona de exclusão não é apenas uma distância, mas um sistema operacional de controle

Mais importante ainda, o aluno deve ter assimilado que a pergunta central da engenharia não deve ser apenas:

*"Qual é o alcance estimado do flyrock?"*

Mas sim:

*"Quais decisões e controles são necessários para garantir que pessoas, equipamentos e estruturas não fiquem expostos ao risco?"*

Essa mudança de pergunta representa a maturidade técnica esperada ao final deste módulo.

## 11.8.3 Ponte para a conclusão do curso

Com este módulo, o curso chega ao ponto em que o entendimento técnico do flyrock se conecta diretamente à tomada de decisão.

Até aqui, foram desenvolvidos os principais elementos necessários para compreender o fenômeno: energia, confinamento, mecanismos de geração, causas, controle, modelagem, tecnologia, incerteza e gestão de risco. Esses elementos não devem ser vistos de forma isolada. Eles formam um sistema integrado de análise e decisão.

O próximo módulo terá justamente a função de consolidar essa visão. Nele, será realizada a síntese final do curso, integrando os conceitos centrais e reforçando o papel do profissional na prevenção de acidentes, na cultura de segurança e na continuidade do aprendizado técnico.

Dessa forma, o Módulo 11 encerra a transição entre predição e gestão de risco, preparando o aluno para a conclusão geral do curso. A partir deste ponto, o flyrock deve ser compreendido não apenas como um fenômeno que pode ser estudado e estimado, mas como um risco crítico que precisa ser gerenciado com responsabilidade, disciplina operacional e engenharia aplicada.

# Módulo 12. Conclusão e Síntese Final

## 12.1 Abertura do módulo e sentido do encerramento

Ao chegar a este módulo final, é importante compreender que o encerramento do curso não representa apenas uma revisão dos conteúdos apresentados. Ele representa a consolidação de uma visão técnica integrada sobre o flyrock no desmonte de rochas com explosivos.

Ao longo da apostila, o fenômeno foi estudado de forma progressiva. Primeiro, foram apresentados os conceitos fundamentais do desmonte, da energia explosiva e dos principais riscos associados à detonação. Em seguida, foram analisados os mecanismos de geração do flyrock, a importância do confinamento, suas principais causas, as estratégias de controle, os modelos de predição, as tecnologias de apoio e, por fim, a transição da previsão para a gestão de risco.

Esse percurso foi estruturado para que o aluno não compreenda o flyrock apenas como um evento isolado, mas como resultado da interação entre energia, rocha, geometria, confinamento, execução, variabilidade geológica, fator humano e exposição ao risco.

Neste módulo, o objetivo é integrar esses elementos e consolidar o sentido técnico do curso. Mais do que repetir conceitos, a proposta é organizar a visão construída ao longo da apostila, reforçar as relações entre os temas estudados e destacar suas implicações práticas para a atuação profissional.

Essa etapa é fundamental porque o controle do flyrock exige visão sistêmica. Não basta conhecer uma fórmula, aplicar um procedimento ou reconhecer um mecanismo de lançamento. É necessário compreender como todos esses elementos se conectam dentro da realidade operacional do desmonte.

### 12.1.1 O que foi construído ao longo do curso

Durante o curso, foi construída uma base técnica ampla sobre o flyrock, partindo da compreensão do fenômeno até sua interpretação como risco operacional crítico.

Ao longo dos módulos, o aluno passou a compreender:

• o que é o flyrock e por que ele representa um dos principais riscos do desmonte de rochas com explosivos

• como o fenômeno está relacionado à liberação, distribuição e perda de controle da energia explosiva

• por que o confinamento é um dos pilares fundamentais para o controle do desmonte

• quais são os principais mecanismos de geração, como face burst, cratering e rifling

• como fatores de projeto, execução, geologia e fator humano influenciam o comportamento do sistema

• de que forma o flyrock pode ser prevenido, controlado e mitigado

• quais são as possibilidades e limitações dos modelos de predição

• como dados de campo, tecnologias e registros operacionais podem apoiar a análise

• por que a gestão de risco é necessária para transformar estimativas em decisões seguras

Esse percurso não foi apenas informativo. Ele teve um caráter formativo, pois buscou desenvolver uma forma de pensar o flyrock com base em engenharia, observação de campo, análise crítica e responsabilidade técnica.

Ao final do curso, espera-se que o aluno não apenas reconheça o fenômeno, mas seja capaz de interpretar suas causas, avaliar condições críticas e compreender os limites da previsão e do controle.

### 12.1.2 Por que encerrar com integração é importante

Um dos maiores riscos no estudo de temas complexos é a compreensão fragmentada. Quando os conceitos são vistos de forma isolada, perde-se a conexão entre causa e efeito, reduz-se a capacidade de análise e aumenta-se a possibilidade de decisões inadequadas.

No caso do flyrock, essa integração é ainda mais importante, porque o fenômeno raramente resulta de uma única causa. Em geral, ele surge da combinação entre diferentes fatores, como baixa condição de confinamento, geometria desfavorável, falhas de execução, variações geológicas, excesso de energia local, fragilidades operacionais e exposição inadequada de pessoas ou equipamentos.

Por isso, o encerramento do curso precisa ir além de uma simples recapitulação. Ele deve reforçar que:

• energia, confinamento e geometria definem a base física do desmonte

• geologia e variabilidade do maciço influenciam diretamente o comportamento real da detonação

• execução operacional transforma o projeto em realidade de campo

• modelos e tecnologias ajudam a estimar, comparar e reduzir incertezas

• gestão de risco transforma conhecimento técnico em decisão prática

• zona de exclusão e controle de área reduzem a exposição às consequências do evento

Essa visão integrada permite compreender que o flyrock não deve ser tratado apenas como uma distância, uma fórmula ou um efeito isolado da detonação. Ele deve ser entendido como parte de um sistema operacional que precisa ser planejado, executado, monitorado, registrado e continuamente aperfeiçoado.

## 12.1.3 O curso como base para uma atuação técnica mais segura

O conhecimento desenvolvido ao longo do curso possui um objetivo central: contribuir para uma atuação mais segura, consciente e tecnicamente fundamentada no desmonte de rochas com explosivos.

Ao compreender o flyrock de forma estruturada, o profissional passa a ter melhores condições de:

• identificar condições críticas antes da detonação

• interpretar sinais de perda de confinamento ou descontrole da energia

• reconhecer mecanismos prováveis de lançamento

• avaliar cenários de risco com maior consistência

• aplicar modelos de predição com senso crítico

• utilizar dados de campo para apoiar decisões

• definir controles preventivos e mitigadores adequados

• adotar decisões conservadoras quando houver incerteza relevante

Essa aplicação prática é essencial. O curso não foi desenvolvido para permanecer apenas no campo teórico, mas para apoiar decisões reais de engenharia, segurança e operação.

O conhecimento técnico, quando bem aplicado, torna-se instrumento de proteção. Ele permite reduzir a exposição ao risco, melhorar a qualidade dos desmontes, prevenir acidentes, fortalecer a responsabilidade técnica e contribuir para uma cultura operacional mais segura.

## 12.1.4 Encerramento como preparação para continuidade

Embora este seja o módulo final do Curso 1, ele também representa um ponto de transição.

Até aqui, o foco principal foi compreender o flyrock em profundidade. A proposta foi construir uma base sólida sobre seus fundamentos, mecanismos, causas, formas de controle, métodos de predição, limitações e implicações práticas.

A partir dessa base, torna-se possível avançar para uma etapa mais aplicada, voltada à gestão do risco e à definição de zonas de exclusão. Esse avanço será natural, porque não é possível definir uma zona de exclusão de forma tecnicamente consistente sem compreender antes o fenômeno que se pretende controlar.

Dessa forma, este encerramento prepara o aluno para a continuidade dos estudos, especialmente em temas como:

• critérios de risco

• definição de zonas de exclusão

• fatores de segurança

• análise de consequência e exposição

• procedimentos de cerco de área

• comunicação, evacuação e vigilância

• tomada de decisão operacional antes da detonação

Assim, o encerramento deste curso não deve ser entendido como o fim do aprendizado, mas como a consolidação da base necessária para uma aplicação mais consciente e estruturada. O aluno encerra esta etapa com uma compreensão técnica do flyrock e se prepara para avançar para a gestão prática do risco em campo.

# 12.2 Síntese dos conceitos centrais do curso

Ao longo do curso, o flyrock foi analisado sob diferentes perspectivas, sempre com o objetivo de construir uma compreensão técnica sólida, progressiva e aplicada. Neste momento, é necessário consolidar os conceitos centrais que sustentam todo o raciocínio desenvolvido ao longo da apostila.

Esta síntese não tem como objetivo repetir conteúdos, mas organizar os fundamentos essenciais de forma integrada, permitindo que o aluno enxergue com clareza a lógica do fenômeno e compreenda por que o controle do flyrock depende da combinação entre conhecimento técnico, leitura de campo, planejamento, execução disciplinada e gestão de risco.

Os pontos apresentados a seguir representam a base estrutural de todo o curso.

## 12.2.1 O que é flyrock e por que ele é crítico

O flyrock pode ser entendido como o lançamento indesejado de fragmentos de rocha gerados pela liberação descontrolada de energia em um desmonte com explosivos, de modo que esses fragmentos ultrapassem os limites de segurança definidos para a operação e representem risco a pessoas, equipamentos ou estruturas.

Essa definição é importante porque mostra que o problema não está simplesmente no movimento da rocha. O deslocamento do material faz parte do próprio objetivo do desmonte. A questão crítica surge quando esse movimento deixa de estar contido dentro dos limites previstos e passa a representar risco.

Mais do que um efeito secundário, o flyrock representa:

• um dos riscos mais críticos associados ao uso de explosivos

• uma das principais causas de acidentes graves em operações de desmonte

• um evento com potencial de consequências severas para pessoas, equipamentos, estruturas e áreas externas à operação

Ao longo do curso, foi possível diferenciar três condições importantes:

• **lançamento controlado**, que faz parte do comportamento esperado do desmonte

• **lançamento excessivo**, que indica desvio ou perda parcial de controle, mas ainda pode permanecer dentro de uma área segura

• **ultralançamento ou flyrock**, que ocorre quando fragmentos ultrapassam os limites de segurança definidos para a detonação

Essa distinção é fundamental porque evita interpretações equivocadas. Nem todo deslocamento de material é flyrock, mas todo fragmento lançado além dos limites de segurança representa uma falha relevante no controle do desmonte.

Portanto, o ponto central não é a existência de movimento de fragmentos, mas a perda de controle sobre esse movimento e a possibilidade de exposição de pessoas, equipamentos ou estruturas ao impacto.

## 12.2.2 O papel da energia e do confinamento

O núcleo físico do flyrock está na relação entre a energia liberada pelo explosivo e a capacidade do sistema de conter, direcionar e distribuir essa energia dentro do maciço rochoso.

Quando o confinamento é adequado, a energia tende a ser utilizada predominantemente para fragmentar a rocha, formar fraturas, promover deslocamento controlado e gerar uma pilha compatível com os objetivos operacionais do desmonte.

Quando o confinamento é insuficiente, a energia pode encontrar caminhos de menor resistência, escapar de forma prematura ou concentrar-se em regiões específicas. Nessas condições, parte da energia deixa de ser convertida em trabalho útil e passa a acelerar fragmentos de forma violenta, gerando lançamentos excessivos ou flyrock.

Essa relação foi um dos eixos centrais do curso e pode ser sintetizada da seguinte forma:

*flyrock é, em grande parte, uma manifestação da perda de confinamento e da liberação descontrolada da energia explosiva.*

Compreender essa lógica permite interpretar melhor os principais mecanismos de geração, como face burst, cratering e rifling. Também permite identificar condições críticas em campo, como burden reduzido, tampão insuficiente, fraturas conectadas à carga, zonas alteradas, colar fragilizado e desvios de execução.

Dessa forma, o controle do flyrock começa antes da detonação, na capacidade de projetar, verificar e executar um desmonte em que a energia esteja compatível com o nível real de confinamento disponível.

## 12.2.3 O SDoB como chave interpretativa

O conceito de SDoB, ou **Scaled Depth of Burial**, foi apresentado como uma ferramenta conceitual para interpretar o comportamento do confinamento em relação à energia da carga explosiva.

De forma geral, o SDoB relaciona a profundidade efetiva de enterramento da carga com a carga explosiva equivalente considerada na análise. Por isso, ele não deve ser entendido apenas como uma medida geométrica, mas como uma relação escalonada entre confinamento e energia.

Essa leitura permite avaliar se o sistema tende a se comportar de forma:

• superconfinada

• adequadamente confinada

• subconfinada

Quando o sistema está adequadamente confinado, a energia tende a ser melhor aproveitada para fragmentação e deslocamento controlado. Quando o sistema está subconfinado, aumenta a possibilidade de ejeção de material e projeção de fragmentos. Quando está excessivamente confinado, podem surgir outros problemas operacionais, como fragmentação inadequada, vibração elevada ou deslocamento insuficiente.

A importância do SDoB está justamente em permitir uma leitura relativa do confinamento. Uma mesma altura de tampão pode representar uma condição segura para uma carga pequena e uma condição crítica para uma carga maior. Por isso, o confinamento não deve ser avaliado apenas em termos absolutos, mas sempre em relação à energia disponível.

Assim, o SDoB não deve ser visto apenas como um parâmetro numérico. Ele deve ser entendido como:

• uma ferramenta de interpretação do equilíbrio entre energia e confinamento

• um apoio para reconhecer regimes de comportamento do desmonte

• uma referência para comparar cenários

• um elemento auxiliar na análise do risco de flyrock

Essa compreensão é essencial porque ajuda o profissional a enxergar o desmonte como um sistema de equilíbrio, no qual pequenas alterações na carga, no tampão, no diâmetro ou na geometria podem modificar significativamente o comportamento esperado.

## 12.2.4 A previsibilidade limitada do fenômeno

Outro conceito central consolidado ao longo do curso é o limite da previsão do flyrock.

Apesar dos avanços em modelagem, análise de dados, tecnologias de monitoramento, registros de campo e métodos de predição, o flyrock continua sendo um fenômeno altamente sensível às condições reais do desmonte.

Isso ocorre porque seu comportamento depende da interação entre múltiplos fatores, incluindo:

• energia explosiva disponível

• nível de confinamento• geometria do plano de fogo

• condições geológicas do maciço

• qualidade da perfuração

• execução do carregamento

• desempenho do tampão

• sequência de iniciação

• forma, massa e trajetória dos fragmentos

• exposição de pessoas, equipamentos e estruturas

Essa combinação torna possível estimar tendências, comparar cenários, identificar condições críticas e avaliar níveis de risco. No entanto, não permite prever com precisão absoluta o comportamento de cada fragmento, sua velocidade inicial, sua trajetória específica ou sua distância final em todos os eventos.

Por isso, a predição deve ser tratada como ferramenta de apoio à decisão, e não como garantia de segurança. Os modelos são úteis porque organizam o raciocínio técnico, permitem comparar alternativas e ajudam a reconhecer cenários mais críticos. Porém, seus resultados precisam ser interpretados com cautela, considerando incertezas, histórico local, dados de campo, consequências potenciais e margens de segurança adequadas.

Dessa forma, a previsão não substitui a gestão de risco. Ela alimenta a gestão de risco.

O profissional deve utilizar as estimativas como base para tomar decisões mais seguras, definindo controles preventivos, medidas mitigadoras, critérios conservadores, zonas de exclusão e procedimentos de campo compatíveis com o risco real da operação.

# 12.3 Revisão integrada das relações entre energia, confinamento, geologia, execução, trajetória e risco

Após consolidar os conceitos centrais do curso, este tópico tem como objetivo dar um passo além: integrar os principais elementos estudados em uma visão única e sistêmica.

Ao longo da apostila, cada tema foi apresentado de forma organizada para facilitar o aprendizado. Energia, confinamento, mecanismos, geologia, execução, trajetória, modelos e risco foram tratados em momentos específicos, com diferentes níveis de aprofundamento. No entanto, na prática, o flyrock não ocorre de forma segmentada.

Ele é resultado da interação simultânea entre:

• energia explosiva

• confinamento

• geometria do desmonte

• condições geológicas

• qualidade da execução

• mecanismos de lançamento

• trajetória dos fragmentos

• exposição de pessoas, equipamentos e estruturas

Compreender essas conexões é essencial para sair de uma visão fragmentada e avançar para uma abordagem realmente eficaz de controle, prevenção e gestão de risco.

## 12.3.1 Energia e confinamento como núcleo do sistema

No centro do fenômeno está a relação entre a energia liberada pelo explosivo e a capacidade do sistema de conter, direcionar e distribuir essa energia no maciço rochoso.

Esse é o núcleo físico do flyrock.

Quando há equilíbrio entre energia e confinamento, a energia tende a ser utilizada de forma mais eficiente para fragmentar a rocha e promover o deslocamento controlado do material. Nesse caso, o desmonte tende a produzir os efeitos desejados dentro da área prevista.

Quando há desequilíbrio, a energia pode escapar por caminhos de menor resistência, concentrar-se em regiões específicas e acelerar fragmentos de forma intensa. É nesse contexto que surgem os principais mecanismos de flyrock, como face burst, cratering e rifling.

Essa relação pode ser sintetizada da seguinte forma:

*o flyrock é uma consequência direta do desequilíbrio entre energia disponível e confinamento efetivo.*

Todos os demais fatores estudados ao longo do curso atuam, direta ou indiretamente, sobre esse equilíbrio. A geometria do plano de fogo influencia o confinamento. A geologia pode aumentar ou reduzir a resistência local. A execução pode preservar ou comprometer o projeto. O tampão pode conter ou permitir a fuga prematura dos gases. A sequência de iniciação pode favorecer ou prejudicar a liberação controlada da energia.

Por isso, controlar o flyrock significa, antes de tudo, controlar a relação entre energia e confinamento dentro das condições reais do campo.

## 12.3.2 Geologia e execução como condicionantes reais

Embora o projeto estabeleça uma condição técnica planejada, o comportamento real do desmonte é definido pela interação entre esse projeto e as condições encontradas em campo.

Entre os principais condicionantes reais, destacam-se dois grupos fundamentais:

• a geologia

• a execução operacional

A geologia influencia diretamente a resposta do maciço à detonação. Ela define a resistência da rocha, a presença de fraturas e descontinuidades, a existência de zonas alteradas, a possibilidade de fuga preferencial de gases e o nível efetivo de confinamento disponível em cada região do desmonte.

A execução, por sua vez, determina como o plano de fogo projetado será transformado em realidade operacional. Nessa etapa, podem surgir variações de perfuração, desvios de furos, diferenças entre burden projetado e burden real, alterações no carregamento, variações na altura de tampão, problemas na qualidade do material de tamponamento e ajustes realizados durante a operação.

Esses fatores fazem com que:

*o sistema real nunca seja exatamente igual ao sistema projetado.*

Essa diferença não deve ser vista apenas como uma limitação, mas como uma característica natural do desmonte de rochas com explosivos. A engenharia precisa reconhecer essa diferença e trabalhar com ela de forma consciente, por meio de inspeções, registros, ajustes, margens de segurança e decisões conservadoras.

Muitas condições críticas associadas ao flyrock surgem justamente quando o projeto é interpretado como se representasse perfeitamente a realidade de campo. Por isso, a prevenção depende da capacidade de comparar o planejado com o executado e de reconhecer, antes da detonação, quando as condições reais exigem revisão da estratégia.

## 12.3.3 Trajetória como consequência do desequilíbrio

A trajetória dos fragmentos não deve ser analisada como um fenômeno isolado. Ela é consequência das condições de lançamento criadas no momento da detonação.

Essas condições dependem de fatores como:

• forma como a energia foi liberada

• nível de confinamento efetivo

• mecanismo de geração predominante

• posição do fragmento no maciço

• direção do caminho de menor resistência

• ângulo e velocidade inicial de lançamento

• forma, massa e dimensão do fragmento

• influência da topografia e da resistência do ar

Quando ocorre perda de confinamento, fragmentos podem ser acelerados de forma mais intensa, lançados em ângulos desfavoráveis e atingir distâncias superiores ao esperado. Por isso, a trajetória observada em um evento de flyrock é o resultado final de uma cadeia de condições anteriores.

Em outras palavras:

*a trajetória é a manifestação visível do comportamento do sistema.*

Ela não explica sozinha a causa do flyrock, mas ajuda a interpretar o mecanismo que pode ter ocorrido. Uma projeção frontal pode indicar face burst. Uma projeção vertical ou radial pode estar associada a cratering. Uma ejeção pelo colar pode sugerir rifling ou falha de tampão.

Assim, analisar a trajetória é importante, mas essa análise precisa estar conectada ao conjunto do desmonte. A pergunta técnica não deve ser apenas "até onde o fragmento chegou?", mas também "por que ele foi lançado nessa direção, com essa energia e a partir de qual mecanismo?".

### 12.3.4 Risco como resultado da interação entre fenômeno e exposição

O último elemento da integração é o risco.

O risco não depende apenas da ocorrência física do flyrock, mas da combinação entre o comportamento do fenômeno e a presença de pessoas, equipamentos, estruturas ou áreas vulneráveis dentro da região potencialmente atingida.

Isso significa que o mesmo alcance de fragmento pode representar níveis de risco diferentes em contextos distintos. Um fragmento lançado em direção a uma área vazia e controlada possui uma consequência muito diferente de um fragmento lançado em direção a uma via de acesso, uma estrutura crítica, um equipamento ou uma área com presença humana.

Assim, o risco resulta da interação entre:

• probabilidade de ocorrência

• intensidade do fenômeno

• direção e alcance do lançamento

• elementos expostos

• vulnerabilidade desses elementos

• severidade das consequências possíveis

• eficácia das barreiras de controle existentes

Essa lógica pode ser sintetizada da seguinte forma:

*flyrock é o fenômeno; risco é o impacto potencial desse fenômeno sobre algo exposto.*

Por isso, a gestão do flyrock não pode se limitar à redução da probabilidade de lançamento. Ela também precisa reduzir a exposição e controlar as consequências. Isso envolve definir zonas de exclusão, retirar pessoas e equipamentos, bloquear acessos, posicionar vigias, comunicar a detonação, aplicar fatores de segurança e verificar a área antes da liberação do fogo.

Nesse sentido, a integração entre energia, confinamento, geologia, execução, trajetória e risco conduz a uma conclusão essencial: o controle do flyrock depende da capacidade de transformar conhecimento técnico em decisão operacional. A segurança não está apenas em compreender o fenômeno, mas em usar essa compreensão para impedir que sua ocorrência resulte em acidente.

# 12.4 Papel do profissional na prevenção de acidentes

Após compreender os fundamentos físicos, as causas, os mecanismos de geração, os modelos de predição e os limites de controle do flyrock, é necessário trazer a discussão para um dos elementos mais decisivos de todo o sistema: o profissional que planeja, executa, supervisiona e toma decisões no desmonte.

O conhecimento técnico, por si só, não garante segurança. Ele precisa ser aplicado de forma consciente, disciplinada e responsável. Um plano de fogo bem elaborado, um modelo bem aplicado ou uma tecnologia avançada perdem parte do seu valor quando não são acompanhados por leitura crítica de campo, controle da execução, registro adequado e tomada de decisão conservadora.

No contexto do flyrock, a atuação profissional é determinante porque muitas condições críticas precisam ser reconhecidas antes da detonação. O risco pode estar em uma face irregular, em um burden real menor que o projetado, em um tampão mal executado, em uma fratura conectada à carga, em uma mudança geológica localizada ou em uma falha no controle da área.

Por isso, o controle do flyrock não depende apenas de parâmetros, fórmulas ou procedimentos. Ele depende diretamente da capacidade do profissional de interpretar sinais, corrigir desvios, tomar decisões, registrar informações, proteger pessoas e sustentar a segurança do processo como um todo.

## 12.4.1 Responsabilidade técnica no desmonte

O desmonte de rochas com explosivos é uma atividade de alto impacto e alto risco, que exige responsabilidade técnica em todas as suas etapas. Cada decisão tomada no planejamento, na preparação, no carregamento, na detonação e na liberação da área pode influenciar diretamente o comportamento do sistema.

O profissional envolvido no processo atua sobre elementos fundamentais, como:

• definição dos parâmetros do plano de fogo

• avaliação das condições geológicas e operacionais

• escolha e distribuição dos explosivos

• controle do afastamento, do espaçamento, da carga e do tampão

• acompanhamento da perfuração e do carregamento

• definição das áreas de segurança

• verificação das condições reais antes da detonação

• registro das informações e justificativas técnicas adotadas

Isso significa que suas decisões influenciam diretamente a forma como a energia será liberada, confinada e direcionada no maciço rochoso. Consequentemente, influenciam também a probabilidade de ocorrência de lançamentos excessivos ou eventos de flyrock.

A responsabilidade técnica não se limita ao cumprimento formal de normas ou procedimentos. As normas estabelecem uma base mínima de segurança, mas cabe ao profissional interpretar essa base à luz das condições reais de campo. Em muitos casos, a decisão segura exige ir além do mínimo estabelecido, adotando critérios mais conservadores quando houver incerteza relevante, exposição de pessoas, proximidade de estruturas ou histórico de eventos críticos.

Portanto, o desmonte não é apenas uma operação técnica. É uma atividade que exige responsabilidade direta sobre suas consequências, tanto do ponto de vista operacional quanto humano, legal e institucional.

## 12.4.2 Capacidade de leitura crítica e decisão

Um dos aspectos mais importantes da atuação profissional no controle do flyrock é a capacidade de interpretar o que está acontecendo em campo.

Essa leitura envolve observar, comparar e questionar as condições reais da operação. O profissional precisa avaliar se aquilo que está sendo executado corresponde ao que foi planejado e, principalmente, se as condições encontradas continuam compatíveis com uma detonação segura.

Entre os pontos que exigem leitura crítica, destacam-se:

• condições da face livre e da crista da bancada

• presença de fraturas, juntas, cavidades ou zonas alteradas

• diferença entre burden projetado e burden real

• desvios de perfuração

• profundidade real dos furos

• presença de água ou material instável

• qualidade do carregamento

• altura e material do tampão

• posicionamento de equipamentos e estruturas

• efetividade do isolamento e do controle de acessos

Mais do que identificar esses elementos, o profissional precisa interpretá-los corretamente. Uma fratura aberta na face pode indicar perda localizada de confinamento. Um tampão menor que o previsto pode aumentar o risco de cratering ou rifling. Um equipamento posicionado em uma direção vulnerável pode transformar um desvio operacional em um evento de alta consequência.

Essa capacidade é essencial porque o campo nunca é exatamente igual ao projeto. O plano de fogo representa uma intenção técnica, mas sua aplicação ocorre em um ambiente variável, sujeito a condições geológicas, operacionais e humanas que podem alterar o comportamento esperado do desmonte.

Por isso, a segurança depende da capacidade de adaptação do profissional. Quando a realidade de campo mostra uma condição diferente da prevista, a resposta não deve ser ignorar o desvio, mas avaliar seu significado e decidir se o desmonte pode seguir, se precisa ser ajustado ou se deve ser adiado até que a condição seja controlada.

## 12.4.3 Prevenção como dever técnico e ético

A prevenção de acidentes não é apenas uma boa prática operacional. Ela é uma responsabilidade técnica e ética.

No contexto do flyrock, a prevenção exige agir antes que o evento ocorra. Isso significa reconhecer condições críticas, aplicar controles adequados, reduzir a exposição e impedir que a operação avance quando existirem dúvidas relevantes sobre a segurança.

O profissional deve:

• agir de forma conservadora diante de incertezas

• não ignorar sinais de risco

• não normalizar pequenos lançamentos fora do esperado

• não aceitar execução fora do plano sem avaliação técnica

• não avançar com condições inseguras

• comunicar desvios de forma clara

• registrar decisões e justificativas

• priorizar a segurança acima de metas operacionais

Essa postura é fundamental porque o flyrock possui baixa tolerância ao erro. Um único fragmento lançado além dos limites de segurança pode causar danos graves ou irreversíveis. Por isso, a decisão técnica deve sempre considerar a severidade potencial do evento, e não apenas sua probabilidade aparente.

A atuação ética também envolve transparência e aprendizado. Informações não devem ser omitidas para preservar indicadores ou evitar discussões internas. Desvios, quase eventos e lançamentos fora do esperado precisam ser registrados e analisados, pois representam oportunidades de melhoria do sistema.

Dessa forma, a prevenção se torna parte da responsabilidade profissional. Ela não depende apenas de regras escritas, mas da postura de quem decide, executa e supervisiona o desmonte.

## 12.4.4 Conhecimento como instrumento de proteção

Todo o conhecimento desenvolvido ao longo do curso tem um propósito claro: reduzir risco e prevenir acidentes.

Entender o flyrock permite ao profissional atuar de forma mais consciente em todas as etapas do desmonte. Esse conhecimento ajuda a antecipar condições críticas, evitar erros de projeto e execução, aplicar controles mais eficazes, interpretar resultados de campo e tomar decisões mais seguras diante da incerteza.

Nesse sentido, o conhecimento deixa de ser apenas um recurso técnico e passa a ser um instrumento de proteção.

Ele protege:

• as pessoas que trabalham na operação

• os vigias e equipes envolvidas no cerco de área

• os equipamentos móveis e fixos

• as estruturas próximas ao desmonte

• as comunidades e áreas externas potencialmente expostas

• a continuidade operacional

• a responsabilidade técnica dos profissionais

• a integridade do próprio processo de desmonte

Essa é uma das mensagens mais importantes deste curso. A segurança no controle do flyrock não nasce apenas de normas, modelos ou procedimentos. Ela nasce da combinação entre conhecimento técnico, experiência de campo, disciplina operacional, cultura de segurança e responsabilidade na tomada de decisão.

Quando o profissional compreende o fenômeno, reconhece seus limites e aplica esse conhecimento de forma prática, ele contribui diretamente para a redução de acidentes e para a evolução da engenharia de desmonte.

# 12.5 Importância da cultura de segurança

Após destacar o papel do profissional na prevenção de acidentes, é necessário ampliar a análise para um nível ainda mais abrangente. A segurança no desmonte de rochas com explosivos não depende apenas da atuação individual de engenheiros, blasters, supervisores ou operadores. Ela depende também da cultura organizacional em que esses profissionais estão inseridos.

Mesmo com bons projetos, procedimentos bem definidos, tecnologias de apoio e profissionais qualificados, o controle do flyrock pode ser comprometido se o ambiente de trabalho não valorizar a segurança de forma consistente. Em operações onde a produtividade sempre prevalece sobre a prevenção, onde desvios são normalizados ou onde quase eventos não são registrados, o sistema se torna progressivamente mais vulnerável.

No contexto do flyrock, essa questão é especialmente importante. Como o fenômeno possui baixa tolerância ao erro e pode gerar consequências graves a partir de um único evento, a cultura de segurança precisa estar presente em todas as etapas do desmonte, desde o planejamento até a liberação da área após a detonação.

A técnica é essencial, mas a cultura de segurança é o que sustenta a aplicação correta dessa técnica no dia a dia.

## 12.5.1 Segurança como valor e não apenas procedimento

Um dos principais aspectos da cultura de segurança é a forma como a segurança é compreendida dentro da operação.

Existe uma diferença fundamental entre cumprir procedimentos apenas por obrigação e agir com convicção sobre a importância da segurança. Quando a segurança é tratada apenas como uma exigência formal, uma etapa burocrática ou um requisito a ser cumprido rapidamente antes da detonação, aumenta a probabilidade de que desvios sejam ignorados, verificações sejam feitas de forma superficial e decisões sejam tomadas com base na conveniência operacional.

No controle do flyrock, essa postura pode ser extremamente perigosa. Um checklist preenchido sem verificação real, um cerco de área realizado sem confirmação efetiva, uma comunicação incompleta ou uma dúvida técnica não discutida podem comprometer todo o sistema de controle.

Por outro lado, quando a segurança é tratada como valor, ela passa a orientar decisões e comportamentos. A equipe entende que procedimentos existem para proteger pessoas, equipamentos e estruturas. A operação reconhece que uma detonação só deve ocorrer quando as condições estiverem sob controle. A liderança reforça que interromper uma atividade insegura não é falha, mas responsabilidade.

Nesse sentido, segurança eficaz não é apenas seguir regras. É compreender o motivo dessas regras e agir de acordo com elas, mesmo sob pressão operacional.

## 12.5.2 Comunicação, disciplina e correção de desvios

A cultura de segurança se manifesta principalmente no comportamento diário da operação. No desmonte de rochas com explosivos, ela aparece na forma como as equipes se comunicam, seguem procedimentos, registram informações, tratam desvios e tomam decisões antes da detonação.

Entre seus principais pilares, destacam-se:

• comunicação clara

• disciplina operacional

• correção ativa de desvios

A comunicação clara permite que informações relevantes sobre o desmonte sejam compartilhadas entre as equipes. Isso inclui condições da face, alterações no carregamento, presença de água, furos problemáticos, mudanças no plano de fogo, posicionamento de equipamentos, definição do cerco de área e confirmação da evacuação.

Quando a comunicação falha, informações críticas podem não chegar a quem precisa decidir. No contexto do flyrock, isso pode significar que uma condição de risco conhecida por uma pessoa não seja considerada pela equipe responsável pela detonação.

A disciplina operacional garante que os procedimentos sejam seguidos de forma consistente. Isso envolve executar corretamente a perfuração, o carregamento, o tamponamento, a ligação dos acessórios, a inspeção final, o bloqueio dos acessos, o acionamento dos avisos e a liberação segura da área.

Já a correção de desvios exige que condições fora do padrão sejam tratadas antes que evoluam para situações críticas. Um burden menor que o previsto, um tampão insuficiente, uma fratura aberta na face, um equipamento em posição vulnerável ou uma falha no bloqueio de acesso não devem ser vistos como detalhes menores. Cada um desses pontos pode representar uma fragilidade no sistema de controle.

Nesse contexto, ignorar um desvio significa aceitar o aumento do risco.

## 12.5.3 Aprendizado com eventos e quase eventos

Outro elemento essencial da cultura de segurança é a capacidade de aprender com a prática.

No controle do flyrock, esse aprendizado depende do registro, da análise e da discussão técnica de eventos reais. Sempre que ocorre um lançamento excessivo, um fragmento fora da área esperada, uma falha de cerco, um dano a equipamento ou qualquer condição fora do padrão, a operação ganha uma oportunidade de compreender melhor seu próprio sistema.

Esse aprendizado envolve:

• registrar ocorrências

• analisar causas e fatores contribuintes

• avaliar falhas de projeto, execução ou controle de área

• identificar padrões recorrentes

• implementar medidas corretivas

• verificar se as ações adotadas foram efetivas

No entanto, não apenas eventos com consequências devem ser considerados. Os quase eventos também são fundamentais. Um quase evento é uma situação que não gerou dano, mas poderia ter gerado em circunstâncias ligeiramente diferentes.

No contexto do flyrock, podem ser considerados quase eventos situações como:

• fragmentos encontrados próximos ao limite da área de segurança

• lançamento acima do esperado, mas sem dano

• falha identificada no cerco antes da detonação

• equipamento retirado no último momento de uma área vulnerável

• dúvida operacional que revelou uma fragilidade no procedimento

• condição geológica crítica identificada tardiamente

Essas situações são valiosas porque revelam fragilidades antes que elas resultem em acidente. Operações maduras não tratam quase eventos como ocorrências irrelevantes. Elas os tratam como alertas do sistema.

Quando a operação valoriza esse aprendizado, cada ocorrência deixa de ser apenas um problema e passa a ser uma fonte de evolução técnica e organizacional.

## 12.5.4 Cultura de segurança como base do controle do flyrock

Ao integrar todos esses elementos, fica claro que a cultura de segurança é a base que sustenta o controle do flyrock.

Ela garante que o conhecimento técnico seja aplicado corretamente, que os procedimentos sejam realmente cumpridos, que os desvios sejam tratados com seriedade e que as decisões sejam orientadas pela proteção de pessoas, equipamentos, estruturas e áreas externas à operação.

Sem essa base, a técnica perde eficácia. O plano de fogo pode estar bem elaborado, mas não ser seguido corretamente. Os modelos podem indicar risco, mas a decisão pode ignorar a incerteza. Os procedimentos podem existir, mas serem aplicados apenas formalmente. A zona de exclusão pode ser definida, mas não ser efetivamente controlada.

Com uma cultura de segurança sólida, ocorre o contrário. A equipe passa a reconhecer sinais de risco, comunicar desvios, cumprir etapas críticas, interromper atividades inseguras, registrar eventos e buscar melhoria contínua. O controle do flyrock deixa de depender apenas de ações pontuais e passa a fazer parte da forma como a operação trabalha.

Assim, a cultura de segurança transforma o controle do flyrock em uma prática consistente, contínua e efetiva. Ela fortalece a disciplina operacional, melhora a qualidade das decisões e aumenta a confiabilidade do desmonte.

A partir dessa base, o curso avança para seu último aprofundamento antes do encerramento, tratando da necessidade de atualização contínua como parte da evolução profissional e da melhoria permanente no controle do flyrock.

# 12.6 Necessidade de atualização contínua

Ao longo de todo o curso, ficou evidente que o flyrock é um fenômeno complexo, sensível e altamente dependente de múltiplos fatores. Ele envolve a interação entre energia explosiva, confinamento, geologia, geometria do desmonte, execução operacional, trajetória dos fragmentos e exposição ao risco.

Diante dessa complexidade, uma conclusão se torna inevitável: não existe domínio definitivo sobre o tema. Existe evolução contínua do conhecimento, da prática, dos métodos de análise e das formas de controle.

Por isso, a conclusão deste curso não deve ser entendida como o fim do aprendizado, mas como o início de uma atuação mais consciente, crítica e tecnicamente amadurecida. O profissional que trabalha com desmonte de rochas precisa compreender que o controle do flyrock exige estudo permanente, observação de campo, análise de dados, atualização técnica e disposição para rever práticas sempre que necessário.

## 12.6.1 O flyrock como tema de aprendizado permanente

O flyrock não é um tema estático. Seu comportamento depende de um conjunto de fatores que variam de uma operação para outra e, muitas vezes, de um desmonte para outro dentro da mesma operação.

Entre esses fatores, destacam-se:

• interação entre energia e confinamento

• comportamento variável do maciço rochoso

• presença de fraturas, descontinuidades e zonas alteradas

• diferenças entre projeto e execução real

• qualidade da perfuração, do carregamento e do tampão

• influência da sequência de iniciação

• respostas não lineares do sistema

Essa combinação faz com que cada desmonte possa trazer novas informações. Uma detonação bem-sucedida confirma práticas adequadas. Um desvio revela pontos que precisam ser analisados. Um quase evento pode mostrar uma fragilidade antes que ela resulte em acidente. Um evento real, quando investigado corretamente, pode gerar aprendizado técnico significativo.

Por isso, entender o flyrock não é um ponto de chegada. É um processo contínuo de aprendizado.

O profissional precisa manter uma postura de observação permanente, reconhecendo que mesmo operações maduras ainda podem evoluir. A experiência acumulada é valiosa, mas só se transforma em conhecimento quando é analisada, registrada, discutida e utilizada para melhorar decisões futuras.

## 12.6.2 Evolução técnica, tecnológica e metodológica

A área de desmonte de rochas e controle de flyrock está em constante evolução. Novas tecnologias, métodos de análise e ferramentas de apoio vêm ampliando a capacidade de compreender melhor o comportamento das detonações e reduzir incertezas associadas ao processo.

Nos últimos anos, observa-se avanço em diferentes frentes, como:

• tecnologias de monitoramento

• filmagens e análises por vídeo

• uso de drones e levantamentos visuais

• escaneamento de faces e modelagem geométrica

• ferramentas digitais de coleta e análise de dados

• softwares especializados de modelagem

• métodos probabilísticos de avaliação

• inteligência artificial e análise de padrões

• integração entre dados de campo e tomada de decisão

Além das tecnologias, também evoluem as metodologias de controle. Novos estudos são publicados, modelos são revisados, critérios são discutidos, práticas operacionais são aprimoradas e lições aprendidas em diferentes contextos passam a contribuir para o avanço da engenharia de desmonte.

Isso significa que aquilo que hoje é considerado boa prática pode ser aperfeiçoado no futuro.

Manter-se atualizado é essencial para aplicar técnicas mais eficazes, interpretar melhor os dados disponíveis, reduzir riscos e tomar decisões mais consistentes. A atualização técnica não deve ser vista como atividade eventual, mas como parte da responsabilidade profissional de quem atua com explosivos e desmonte de rochas.

## 12.6.3 Aprendizado a partir da prática e dos dados

Grande parte do conhecimento mais valioso sobre flyrock vem da prática. A literatura técnica, os modelos e as normas são fundamentais, mas a realidade de campo fornece informações indispensáveis para compreender o comportamento específico de cada operação.

Esse aprendizado pode surgir de diferentes fontes, como:

• análise de desmontes realizados

• comparação entre projetado e executado

• avaliação dos resultados obtidos

• registro de lançamentos excessivos

• investigação de eventos e quase eventos

• análise de fragmentos encontrados fora da área esperada

• revisão de dados de perfuração, carregamento e tampão

• observação da resposta do maciço em diferentes setores da mina ou obra

Quando essas informações são registradas corretamente, organizadas e analisadas de forma sistemática, elas deixam de ser apenas experiência dispersa e passam a constituir uma base técnica de aprendizado.

Nesse contexto, a experiência deixa de ser apenas empírica e passa a ser estruturada.

Essa transformação é essencial. Uma equipe pode executar centenas de desmontes ao longo do tempo, mas, se os dados não forem registrados e analisados, grande parte do aprendizado se perde. Por outro lado, quando a operação cria uma rotina de registro, análise e revisão, cada detonação contribui para aumentar o conhecimento sobre o maciço, os parâmetros de projeto, os controles operacionais e os critérios de segurança.

Assim, os dados de campo se tornam uma das principais fontes de evolução técnica no controle do flyrock.

## 12.6.4 Postura profissional de aperfeiçoamento contínuo

Mais do que acessar informações ou utilizar novas tecnologias, a atualização contínua depende de postura profissional.

Essa postura envolve:

• curiosidade técnica

• disposição para aprender

• abertura para rever práticas

• humildade para reconhecer limitações

• disciplina para registrar e analisar resultados

• compromisso com a melhoria constante

O profissional que evolui no tema flyrock não se limita a repetir procedimentos. Ele questiona resultados, compara cenários, investiga desvios, aprende com erros e acertos e busca compreender cada vez melhor o sistema em que atua.

Essa postura é especialmente importante porque o desmonte de rochas ocorre em ambientes variáveis. O que funcionou em uma condição pode não funcionar da mesma forma em outra. Um parâmetro adequado para determinado setor pode ser inadequado em outro. Uma prática historicamente aceita pode precisar ser revista diante de novos dados, novas condições operacionais ou maior nível de exposição ao risco.

Por isso, a segurança depende da capacidade de evoluir continuamente.

A atualização contínua não significa abandonar a experiência acumulada, mas fortalecê-la com novos conhecimentos, dados mais consistentes, tecnologias de apoio e análise crítica. É essa combinação entre experiência, estudo, observação e melhoria permanente que permite ao profissional atuar com maior segurança, maturidade e responsabilidade no controle do flyrock.

# 12.7 Encerramento técnico e continuidade dos estudos

Ao longo deste curso, foi construída uma base técnica ampla, estruturada e progressiva sobre o flyrock no desmonte de rochas com explosivos.

Foram abordados seus fundamentos físicos, seus mecanismos de geração, suas causas associadas ao projeto, à execução, à geologia e ao fator humano, suas formas de controle e mitigação, as possibilidades e limitações da modelagem e, por fim, a necessidade de compreender a incerteza como parte natural do sistema.

Esse conjunto de conhecimentos cumpre um papel essencial: permitir que o profissional compreenda o flyrock de forma técnica, crítica e integrada.

Ao final deste curso, deve estar claro que o flyrock não é um fenômeno aleatório, sem causa ou impossível de ser analisado. Ele está associado a condições específicas de energia, confinamento, geometria, maciço rochoso, execução e controle operacional. Ao mesmo tempo, também deve estar claro que o flyrock não é totalmente previsível, pois seu comportamento depende da interação entre múltiplas variáveis e de condições reais de campo que nem sempre podem ser conhecidas com precisão absoluta antes da detonação.

Essa compreensão conduz à principal mensagem consolidada ao longo de toda a apostila:

*o objetivo da engenharia não é prever o flyrock com precisão absoluta, mas compreender o fenômeno e gerenciar o risco com responsabilidade.*

Essa é uma mudança importante de perspectiva. A segurança no desmonte não depende da promessa de controle total, mas da capacidade de reconhecer limites, interpretar sinais, aplicar conhecimento técnico, adotar decisões conservadoras e impedir que pessoas, equipamentos e estruturas fiquem expostos a riscos inaceitáveis.

## 12.7.1 O que o aluno leva deste curso

Ao concluir este curso, o aluno deve levar mais do que um conjunto de conceitos. Ele deve levar uma forma mais estruturada de pensar o flyrock e de interpretar seu papel dentro do desmonte de rochas com explosivos.

Ao longo da formação, foram desenvolvidas bases para que o aluno seja capaz de:

• compreender o comportamento do flyrock de forma técnica e organizada

• diferenciar lançamento esperado, lançamento excessivo e ultralançamento

• identificar condições críticas em projeto e em campo

• interpretar o papel da energia, do confinamento e da geometria do desmonte

• reconhecer os mecanismos de geração, como face burst, cratering e rifling

• compreender a influência da geologia, da execução e do fator humano

• avaliar a importância do tampão, do burden, da carga e da sequência de iniciação

• entender os limites da modelagem e da previsão

• reconhecer a importância dos dados de campo e da rastreabilidade

• adotar uma postura técnica mais crítica, preventiva e conservadora

Mais do que ensinar respostas prontas, o curso buscou desenvolver uma lógica de análise. Essa lógica permite ao profissional observar o desmonte com mais profundidade, interpretar suas variáveis, reconhecer fragilidades e tomar decisões mais seguras.

O aluno deve sair deste curso entendendo que o flyrock não pode ser tratado de forma simplista. Ele exige integração entre teoria e prática, entre projeto e execução, entre modelos e dados reais, entre normas e julgamento técnico, entre eficiência operacional e proteção da vida.

Essa é a principal contribuição formativa do curso: construir uma base de entendimento capaz de orientar decisões mais conscientes.

## 12.7.2 Continuidade do aprendizado e aprofundamento prático

Embora este curso ofereça uma base completa para a compreensão do flyrock, a aplicação prática desses conceitos representa um novo nível de desenvolvimento profissional.

Compreender o fenômeno é a primeira etapa. A etapa seguinte é transformar essa compreensão em critérios, decisões, procedimentos e controles aplicáveis à realidade operacional.

Essa aplicação envolve temas como:

• definição e dimensionamento de zonas de exclusão

• análise de risco em diferentes contextos operacionais

• avaliação de consequência e exposição

• aplicação de fatores de segurança

• uso estruturado de dados e modelos na tomada de decisão

• construção e padronização de critérios operacionais

• organização de procedimentos de cerco de área

• comunicação, evacuação, vigilância e controle de acessos

• registro, auditoria e melhoria contínua das decisões de segurança

Esses temas exigem um aprofundamento próprio, pois envolvem a transformação do conhecimento técnico em gestão prática do risco. Por esse motivo, eles serão desenvolvidos em um segundo curso específico, voltado à zona de exclusão, ao cerco de área e à gestão operacional do risco de flyrock.

É importante destacar que os cursos são independentes, mas complementares. Este curso fornece a base de entendimento sobre o fenômeno. O próximo curso desenvolve a aplicação prática desse conhecimento na tomada de decisão, na definição de áreas seguras e na gestão do risco em campo.

Para o profissional que deseja avançar, o próximo passo é transformar compreensão em decisão estruturada.

## 12.7.3 Mensagem final de encerramento

O estudo do flyrock conduz a uma conclusão clara e madura: não se trata de eliminar completamente o risco, mas de compreendê-lo e controlá-lo da melhor forma possível.

Ao longo deste curso, foi possível entender que o fenômeno pode ser analisado com profundidade, mas não pode ser previsto com exatidão absoluta. Também ficou claro que a segurança depende da forma como lidamos com essa incerteza.

A prática segura do desmonte não se apoia em certezas absolutas. Ela se apoia em:

• conhecimento técnico

• análise crítica

• leitura de campo

• disciplina operacional

• responsabilidade profissional

• postura conservadora

• cultura de segurança

• aprendizado contínuo

Em operações com explosivos, a diferença entre um desmonte seguro e um evento crítico muitas vezes está na qualidade das decisões tomadas antes da detonação. Está na forma como o profissional interpreta o maciço,

avalia o confinamento, verifica a execução, reconhece desvios, define controles e decide proteger pessoas e ativos mesmo diante de pressões operacionais.

Por isso, o controle do flyrock deve ser entendido como parte essencial da boa engenharia de desmonte. Ele exige conhecimento, experiência, método, registro, comunicação e responsabilidade.

Com isso, este curso cumpre seu propósito: formar profissionais capazes de compreender o flyrock com profundidade e atuar de forma mais segura, consciente e responsável no desmonte de rochas com explosivos.

# Referências e Leituras Complementares


Richards, A. B., & Moore, A. J. (2004, 1-4 de fevereiro). Flyrock control: by chance or design [Artigo]. XXX Annual Conference on Explosives and Blasting Technique, New Orleans, LO, Estados Unidos.

Lwin, M. M., & Aung, Z. M. (2019). Prediction and controlling of flyrock due to blasting for Kyaukpahto Gold Mine. International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering, 5(10), 338–346. https://doi.org/10.31695/ijasre.2019.33574.

Raina, A. K. (2023). Flyrock in surface mining: origin, prediction, and control. CRC Press.

Duncan, B. (2022). Flyrock exclusion zone analysis: Hanson Sancrox Quarry [Relatório Técnico]. Orica Technical Services. https://majorprojects.planningportal.nsw.gov.au/prweb/PRRestService/mp/01/getContent?AttachRef=RFI-38694989%2120221017T051046.515%20GMT

Benin, A. K., Akuinor, B. T., & Khandelwal, M. (in press). Estimating, appraising and establishing blast exclusive zone at huni pit: a case study. Journal of Safety and Sustainability. https://doi.org/10.1016/j.jsasus.2024.01.001

Silva, T. A. (2022). Tecnologias de otimização de desmonte de rochas para evitar ultralançamentos (flyrock) [Monografia de Graduação, Universidade Federal do Mato Grosso]. Biblioteca Digital. http://bdm.ufmt.br/handle/1/2672

Sevelka, T. (2022). Preventing the potentially deadly consequences of flyrock: Mandatory minimum setbacks and separation distances required. Grassroots Journal of Natural Resources, 5(4), 66–98. https://doi.org/10.33002/nr2581.6853.050405

Moore, A. J., & Richards, A. B. (2005). Kalgoorlie consolidated gold mines golden pike cut-back flyrock control and calibration of a predictive model [Relatório Técnico]. https://superpit.com.au/wp-content/uploads/2015/05/Terrock-Supplementary-Golden-Pike-Flyrock-Modelling-Report.pdf

Szendrei, T., & Tose, S. (2023). Flyrock in surface mining Part II-Causes, sources, and mechanisms of rock projection. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 123(12), 557–564. http://dx.doi.org/10.17159/24119717/2583/2023

Carlos, L. J., Emilio, L. J., Francisco, J. A. C., & Yvonne Visser de, R. (2017). Drilling and blasting of rocks. Routledge.

Yerko Pizarro C. & Wenceslao Valenzuela. (Abril 2017) ESTUDIO PROYECCIÓN AÉREA DE ROCA EN VOLADURA (FLYROCK) CM CERRO VERDE – PERÚ. ( Rev_2 _ Technical Services Perú Orica)

Lundborg N, 1981: “The Probability of Flyrock”, Sve De Fo Report, DS 1981.

ABNT. NBR 9.653. Guia para avaliação dos efeitos pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas. 2018.

Szendrei, T. and Tose, S. 2022 Flyrock in surface mining – Limitations of current predictive models and a better alterative through modelling the aerodynamics of flyrock trajectory. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, vol. 122, no. 12, pp. 725–732

Verakis, H., & Lobb, T. (2007). Flyrock revisited: An ever-present danger in mine blasting. U.S. Department of Labor, MSHA, Technical Support, A&CC. International Society of Explosives Engineers.

Fletcher, L. R., & D'Andrea, D. V. (2000). Control of flyrock in blasting. In Proceedings of the International Society of Explosives Engineers Conference (p. 167). Twin Cities Research Center, Bureau of Mines, U.S. Department of the Interior. International Society of Explosives Engineers.

Bajpayee TS, Rehak TR, Mowrey GL, Ingram DK. Blasting injuries in surface mining with emphasis on flyrock and blast area security. J Safety Res. 2004;35(1):47-57. doi: 10.1016/j.jsr.2003.07.003. PMID: 14992846.

Kecojevic, V., & Radomsky, M. (2005). Flyrock phenomena and area security in blasting-related accidents. Safety Science, 43(10), 737–750. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2005.07.006

Balakrishnan, V., Rai, P. (2021). An Overview of Flyrock and its Prediction in Surface Mine Blasting using Soft Computing Techniques, Recep Tayyip Erdogan University Journal of Science and Engineering, 2(2), 105-119. Doi: 10.53501/rteufemud.986903

Mwafulirwa, K. Y. (2014). Methodology for characterising the efficacy of blasting in open-pit mines; Video and image analysis (Dissertação de mestrado, Universidade do Porto). Universidade do Porto. https://hdl.handle.net/10216/73233

Richards, A. B., & Moore, A. J. (2022). Blast impact assessment for the proposed Willatook Wind Farm Quarry. Terrock Consulting Engineers Pty Ltd. Retrieved from https://www.willatookwindfarm.com.au/wp-content/uploads/2022/06/Appendix-E4-Quarry-blasting.pdf

Barcelos, V. F. (2023). Revolução digital nas operações de desmonte de rochas (Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais). LUME Repositório Digital. https://lume.ufrgs.br/handle/10183/266110

Pimentel,, B. J. O (2025) Tese de Mestrado – Universidade Europeia do Atlantico. ANÁLISE DO RISCO DE ULTRALANÇAMENTO EM UMA MINA DE COBRE NO BRASIL UTILIZANDO O MODELO TERROCK

SILVA, V. C (2019). Desmonte de Rochas. São Paulo: Oficina de Textos.

Nieble, C. M. (2017). Desmontes cuidadosos com explosivos: Aspectos de engenharia e ambientais. Oficina de Textos.

López Jimeno, C., López Jimeno, E., & García Bermúdez, P. (2003). Manual de perforación y voladura de rocas (1a ed.). U.D. Proyectos E.T.S.I. Minas U.P.M.

Hopler, R. (1998). *Blasters Handbook* (17th ed.). ISEE Explosives Engineers.

Figueiredo, J., Torres, V., Cruz, R., & Moreira, D. (2023). Blasting Fragmentation Study Using 3D Image Analysis of a Hard Rock Mine. Applied Sciences, 13(12), 7090. https://doi.org/10.3390/app13127090

SANTOS, Lúcio Flávio Coelho dos. Desmonte controlado em pedreiras. 2023. 50 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2023. https://monografias.ufop.br/handle/35400000/6088

Ghasemi, E., Sari, M., & Ataei, M. (2012). Development of an empirical model for predicting the effects of controllable blasting parameters on flyrock distance in surface mines. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 52, 163-170. https://acikerisim.aksaray.edu.tr/xmlui/bitstream/handle/20.500.12451/2132/ghasemi-ebrahim-2012.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Jahed Armaghani, D., Tonnizam Mohamad, E., Hajihassani, M., Alavi Nezhad Khalil Abad, S. V., Marto, A., & Moghaddam, M. R. (2016). Evaluation and prediction of flyrock resulting from blasting operations using empirical and computational methods. *Engineering with Computers*, *32*, 109-121. https://www.researchgate.net/profile/Danial-Jahed-

Armaghani/publication/273886493_Evaluation_and_prediction_of_flyrock_resulting_from_blasting_operations_using_empirical_and_computational_methods/links/550f6d340cf2752610a03f4f/Evaluation-and-prediction-of-flyrock-resulting-from-blasting-operations-using-empirical-and-computational-methods.pdf

Koopialipoor, M., Fallah, A., Armaghani, D. J., Azizi, A., & Mohamad, E. T. (2019). Three hybrid intelligent models in estimating flyrock distance resulting from blasting. Engineering with Computers, 35, 243-256. https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s00366-018-0596-4.pdf

Babaeian, M., Sereshki, F., Ataei, M., Nehring, M., & Mohammadi, S. (2023). Application of soft computing, statistical and multi-criteria decision-making methods to develop a predictive equation for prediction of flyrock distance in open-pit mining. *Mining*, *3*(2), 304-333. https://www.mdpi.com/2673-6489/3/2/19/pdf

Szendrei, T., & Tose, S. (2022). Flyrock in surface mining-Limitations of current predictive models and a better alterative through modelling the aerodynamics of flyrock trajectory. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 122(12), 725-732. https://www.scielo.org.za/pdf/jsaimm/v122n12/09.pdf

Pizarro, Y., & Valenzuela, W. (2017). Estudio proyección aérea de roca en voladuras (Flyrock). Mina Cerro Verde – Orica Perú.

LANGEFORS, Ulf; KIHLSTRÖM, Björn. *The modern technique of rock blasting*. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1978.

PERSSON, Per-Anders; HOLMBERG, Roger; LEE, Jaimin. *Rock blasting and explosives engineering*. Boca Raton: CRC Press, 1994.

KONYA, Calvin J.; WALTER, Edward J. *Surface blast design*. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1990.

ISEE. *Blasters' handbook*. 18. ed. Cleveland: International Society of Explosives Engineers, 2011.

COOPER, Paul W. *Explosives engineering*. New York: Wiley-VCH, 1996.

OLOFSSON, Sven-Olov. *Applied explosives technology for construction and mining*. 2. ed. Applex, 1990.

CHIAPPETTA, R. F. Prediction and control of flyrock in surface blasting. In: Proceedings of the ISEE, 1983.

MCKENZIE, Cameron K. Flyrock range prediction using scaled depth of burial. In: Proceedings of the ISEE, 2009.

LITTLE, Thomas N. Flyrock and blast area security. In: ISEE Blasters' Handbook, 2011.

BRASIL. Decreto nº 10.030/2019.

BRASIL. NR-19 – Explosivos.

BRASIL. NRM-16 – Explosivos e acessórios.

Mine Safety and Health Administration (MSHA). (2001). Blasting safety standards (30 CFR Part 56/57). U.S. Department of Labor.

Australian Standard. (1993). AS 2187.2 – Explosives – Storage and use – Use of explosives.

Department of Mines and Petroleum (DMP). (2015). Guideline: Management of blasting risk in mining operations. Government of Western Australia.

European Federation of Explosives Engineers (EFEE). (2011). Guidelines for safe blasting operations in Europe.

SINGH, P. K.; ROY, M. P. Damage to surface structures due to flyrock. International Journal of Rock Mechanics, 2010.

Natural Resources Canada. (2011). Canadian guidelines for blasting operations in mines and quarries.

Health and Safety Executive (HSE). (2004). Quarries regulations 1999: Approved code of practice (L118). UK Government.

MONJEZI, M.; KARAMI, M. Prediction of flyrock using ANN. Engineering with Computers, 2011.

KUMAR, R.; CHATTERJEE, A. Flyrock risk analysis. Mining Science, 2012.

DEEPAK, K.; BAJPAI, S. Flyrock prediction and control. International Journal of Mining Science, 2014.

WORKMAN, J. L.; CALDWELL, R. Prediction of flyrock. Proceedings ISEE, 2001.

LUNDGREN, J.; OLOFSSON, S. Flyrock prediction. Fragblast, 2009.

Jimeno, C. L., Jimeno, E. L., & Carcedo, F. J. A. (1995). Drilling and blasting of rocks. CRC Press.

Hustrulid, W. A. (Ed.). (1999). Blasting principles for open pit mining (Vol. 1 & 2). CRC Press.

Sanchidrián, J. A. (2006). Quantitative analysis of blast fragmentation. International Journal of Rock Mechanics.

Nielsen, K. (1998). Blast design and assessment for surface mines. Balkema.

Bhandari, S. (1997). Engineering rock blasting operations. CRC Press.

Singh, P. K., & Roy, M. P. (2005). Rock blasting effects and operations. CRC Press.

Roy, P. P. (2005). Rock blasting effects and operations. CRC Press.

Rorke, A. J. (1997). Rock blasting and overbreak control.

Little, T. N. (2006). Blasting and explosives safety handbook.

APOSTILA DO CURSO

# FUNDAMENTOS, MECANISMOS E CONTROLE DE FLYROCK

## 1. O QUE ESTA APOSTILA ENTREGA

O flyrock, ou ultralançamento de fragmentos rochosos, é um dos riscos mais críticos do desmonte de rochas com explosivos. Um único fragmento lançado além da área segura pode causar acidentes graves, danos a equipamentos, impactos em estruturas e sérias consequências operacionais, legais e reputacionais.

Esta apostila foi desenvolvida para oferecer uma compreensão técnica, progressiva e aplicada do fenômeno, conduzindo o aluno desde os fundamentos do desmonte e da liberação de energia até os mecanismos de geração, causas principais, formas de controle, modelos de predição, limitações da modelagem e fundamentos da gestão de risco.

Mais do que apresentar definições, o material busca desenvolver uma forma de pensar o flyrock como problema real de engenharia, integrando energia, confinamento, geologia, execução, variabilidade operacional, normas, responsabilidade técnica e tomada de decisão.

Ao final, o aluno terá uma base sólida para interpretar o fenômeno em campo, reconhecer condições críticas, compreender os limites da previsão e avançar com mais segurança para o Curso 2, dedicado à definição da zona de exclusão e à gestão prática do risco de flyrock.



## 2. PARA QUEM É ESTA APOSTILA

- Engenheiros de minas
- Engenheiros civis
- Geólogos e geotécnicos
- Blasters
- Técnicos de mineração
- Profissionais de perfuração e desmonte
- Supervisores e gestores de operações
- Consultores e pesquisadores da área
- Engenheiros e técnicos de segurança

## 3. DIFERENCIAL DO CURSO

Este curso não trata o flyrock de forma superficial. Ele apresenta o tema como um fenômeno técnico complexo, sensível e multifatorial, que precisa ser compreendido antes de ser controlado.

A proposta é unir fundamentos físicos, experiência operacional, leitura de campo, normas, modelos de predição e cultura de segurança, mostrando que o controle do flyrock não depende de uma única fórmula, mas da aplicação integrada da engenharia, da disciplina operacional e da responsabilidade técnica.

Blasting TREINAMENTOS

CONHECIMENTO QUE **TRANSFORMA** DETONAÇÕES EM RESULTADOS SEGUROS.




INSTRUTOR: **BRUNO PIMENTEL**

ATUALIZAÇÃO: **JUN/2026**