

Aplicação de modelos de ruptura de taludes como ferramenta auxiliar no desmonte de rochas em pedreira de Campina Grande-PB: um estudo de caso

Rayff de Melo Ramos ^[1], Guilherme dos Santos Teles ^[2], Alexandre José Buril de Macêdo ^[3], Harrizon Lima de Almeida ^[4], Arlindo José Bazante ^[5].

[1] rayff.ufcg@gmail.com. [2] guilherme.santos@professor.ufcg.edu.br. [3] ajburil@ufpa.br. [4] harrizonri@gmail.com. Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)/Unidade Acadêmica de Mineração e Geologia (UAMG).

RESUMO

Na mineração, algumas das primeiras etapas do processo produtivo são a perfuração e o desmonte de rochas, as quais possuem vários parâmetros de análise para sua eficácia operacional, que visam redução de custos e maximização do lucro da lavra do bem mineral. Um desses parâmetros que muitas vezes não recebe a devida atenção é a geologia estrutural do maciço. Nesse contexto, este trabalho apresenta, com base em resultados práticos, os reflexos positivos sobre as operações de perfuração e desmonte de rochas, resultantes da identificação de modelos de ruptura de taludes, por meio de análise cinemática da geologia estrutural. A pesquisa foi realizada em duas etapas, uma teórica e outra prática, com estudo de caso em uma lavra localizada na cidade de Campina Grande-PB. A partir da amostragem das descontinuidades rochosas e do seu tratamento em softwares específicos, foi possível a identificação do modelo de ruptura predominante no talude. Os dados demonstraram que a utilização do modelo de ruptura na configuração do plano de fogo a ser utilizado resulta em melhoria operacional das atividades de perfuração e desmonte de rochas.

Palavras-chave: Geologia estrutural. Modelo de ruptura. Talude. Perfuração e desmonte de rochas.

ABSTRACT

In mining, one of the first stages of the production process is the drilling and dismantling of rocks, which have several parameters of analysis for their operational effectiveness, which aim to reduce costs and maximize the profit for the mining of mineral good. One of these parameters, which not often receive due attention, is the structural geology of the massif. In this context, this work presents, based on practical results, the positive effects on drilling and rock dismantling operations, resulting from the identification of slope rupture models, through kinematic analysis of structural geology. The research was carried out in two stages, a theoretical and a practical one, with a case study in a mine located in the city of Campina Grande-PB. From the sampling of rock discontinuities and their treatment in specific softwares, it was possible to identify the predominant rupture model in the slope. The data demonstrated that the use of the rupture model in the configuration of the fire plane to be used results in an operational improvement of drilling and rock dismantling activities.

Keywords: *Structural geology. Model of rupture. Slope. Drilling and dismantling of rocks.*

1 Introdução

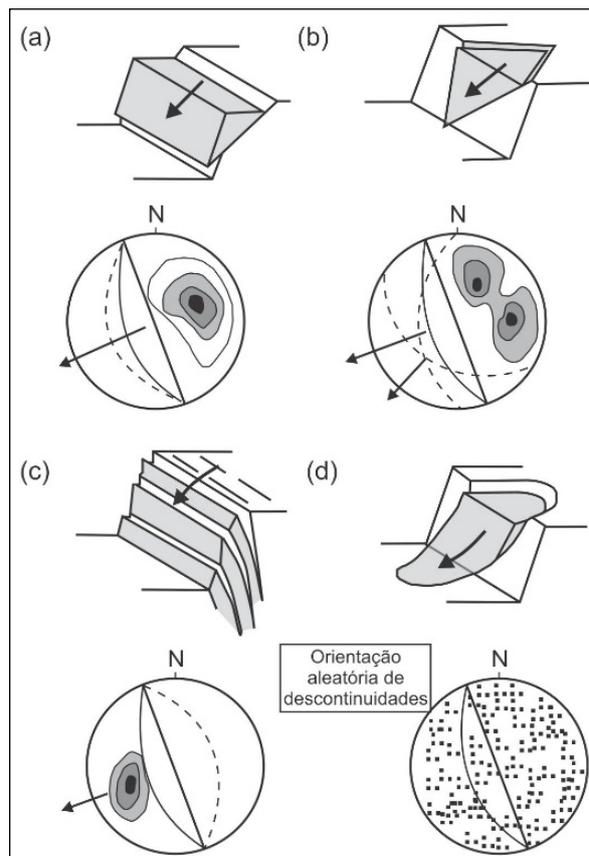
A mineração é uma atividade que busca o aproveitamento de bens naturais não renováveis. Quando bem empregada, aplicando-se conceitos da engenharia de minas, é possível potencializar o lucro financeiro, através da máxima extração possível do bem mineral, reduzindo, assim, gastos desnecessários (GUZZELLI *et al.*, 2012). Na maioria dos projetos de mineração, estão presentes as operações de perfuração e desmonte de rochas, as quais podem onerar de forma significativa o ciclo de operações que envolvem a produção do empreendimento.

Segundo Guazzelli *et al.* (2012), os principais elementos que compõe os custos das operações de perfuração e desmonte de rochas são identificados como custos variáveis e fixos. Os custos variáveis englobam aqueles envolvidos diretamente na operação dos equipamentos, tais como a mão de obra e os materiais de consumo. Já os custos fixos, também conhecidos como custos indiretos, relacionam-se às taxas e depreciação dos equipamentos.

Para Lillo e Oyarzun (2013), uma aproximação que permite uma rápida avaliação de condições de estabilidade, do projeto das escavações em maciços rochosos, com forte controle estrutural e distribuição não homogênea – ou anisotrópica – de descontinuidades, é a análise cinemática. Isso está relacionado, fundamentalmente, com as orientações das descontinuidades principais dos maciços e com o ângulo de atrito (ou fricção) entre as descontinuidades. A análise cinemática permite, portanto, analisar a estabilidade dos tipos de ruptura básicos, muito frequentes em taludes, como planar, cunha, tombamento e circular (Figura 1).

Poucos são os estudos que relacionam as melhorias das operações de perfuração e desmonte de rochas, a partir da identificação de modelos de ruptura em taludes. Dessa forma, este trabalho busca abordar essa necessidade. Para tanto, realizou-se um estudo de caso em uma pedreira de Campina Grande/PB, com o objetivo de indicar sua viabilidade.

Figura 1 – Principais tipos de ruptura, em taludes, com comportamento estrutural e condições prováveis de deslizamento: a) Planar; (b) Em cunha; c) Por tombamento; e (d) Circular



Fonte: modificado de Wyllie e Mah (2005)

2 Importância da geologia na perfuração e no desmonte de rochas

O conhecimento geológico é um domínio necessário para a compreensão das variáveis envolvidas na fragmentação de rochas. Segundo Correia (2011), podem-se considerar dois tipos de variáveis no desmonte de maciços rochosos: as não controláveis e as controláveis. Entende-se por variáveis não controláveis aquelas diretamente relacionadas às condições naturais da geologia do maciço em questão. As variáveis controláveis, por sua vez, são as que envolvem os parâmetros operacionais das atividades de perfuração e desmonte de rochas (Quadro 1).

Quadro 1 – Exemplos de variáveis do maciço rochoso que interferem na perfuração e no desmonte de rochas

Variáveis não controláveis	Variáveis controláveis	
Quanto à geologia do maciço	Quanto à perfuração envolvida	Quanto ao desmonte utilizado
Descontinuidades (fraturas, fissuras, dobras, falhas, etc.)	Diâmetro, comprimento e inclinação do furo	Tipo e energia do explosivo
Grau de alteração	Subfuração	Método de colocação do explosivo nos furos
Presença de água	Altura da bancada	Comprimento e composição da carga explosiva
Tipo de estrutura (em banco, laminar, colunar, etc.)	Razão de carga	Diagrama de detonação e ligação de detonadores (em V ou diagonal)
Dureza e densidade	Tipo, equipamento, eficiência e acessórios de perfuração	Direção da movimentação da rocha
Elasticidade e plasticidade	Manuseamento dos acessórios	Material usado no tamponamento
Resistência à compressão e à tração	Manutenção dos equipamentos	Tipo de detonador usado (não-elétrico ou elétrico)
Textura, composição mineral e petrográfica	Tipo, composição dos botões, forma da face dos botões e nº de botões do bit	Retardo utilizado
Abrasividade	Volume in situ a ser perfurado	Limpeza e nº de frentes livres

Fonte: adaptado de Correia (2011)

O conhecimento dos parâmetros geológicos e geotécnicos que caracterizam os maciços rochosos, e que condicionam o seu comportamento, é a base para a compreensão dos mecanismos de ruptura das rochas, da propagação e de dissipação da energia associada à detonação de explosivos. Para Góis *et al.* (2011), a análise das propriedades do maciço rochoso é importante para o sucesso das operações de desmonte de rocha com explosivos, de forma que as variações na composição mineralógica e na estrutura geológica de qualquer maciço afetam, com maior ou menor incidência, as operações de perfuração, influenciando o método de perfuração, o tipo de equipamento e os

aspectos do plano de fogo (explosivos, acessórios e sequência de iniciação).

3 Objetivos da investigação geológica relativa à estabilidade de taludes

A estabilidade de taludes rochosos é influenciada pela geologia estrutural da rocha em que o talude é escavado. De acordo com Wyllie e Mah (2005), a geologia estrutural relaciona-se às quebras naturais na rocha, como fraturas, juntas e falhas, que são geralmente denominadas descontinuidades. As propriedades das descontinuidades, relativas à estabilidade, incluem orientação, persistência, rugosidade, preenchimento, estado de alteração, frequência, resistência das paredes e presença de água. As descontinuidades podem representar zonas de fraqueza na rocha, as quais, conseqüentemente, reduzem a resistência do maciço, de modo que rupturas tendem a ocorrer preferencialmente ao longo delas, como ocorrido na mina Bing Canyon em 2013 (Figura 2).

Wyllie e Mah (2005) afirmam que alguns dos estudos de estabilidade de taludes que abordam a geologia estrutural envolvem duas etapas. A primeira corresponde à determinação das propriedades das descontinuidades, o que envolve o mapeamento de afloramentos e cortes e a examinação de testemunhos de sondagem, conforme apropriado para as condições do local. A segunda etapa consiste na determinação da influência das descontinuidades na estabilidade do maciço, com ênfase no estudo da relação entre a orientação das descontinuidades e do talude. O objetivo deste estudo, denominado de análise cinemática, é identificar possíveis modos de ruptura em taludes.

Figura 2 – Exemplo de ruptura ocorrida em talude da mina Bingham Canyon (10/04/13)



Fonte: Lillo e Oyarzun (2013)

4 Análise cinemática

Para a identificação do tipo de ruptura do talude, utiliza-se a projeção estereográfica, na qual indica-se a direção provável em que o bloco gerado deverá deslizar, sua extensão, e as condições potenciais de estabilidade. Esse procedimento é conhecido como análise cinemática.

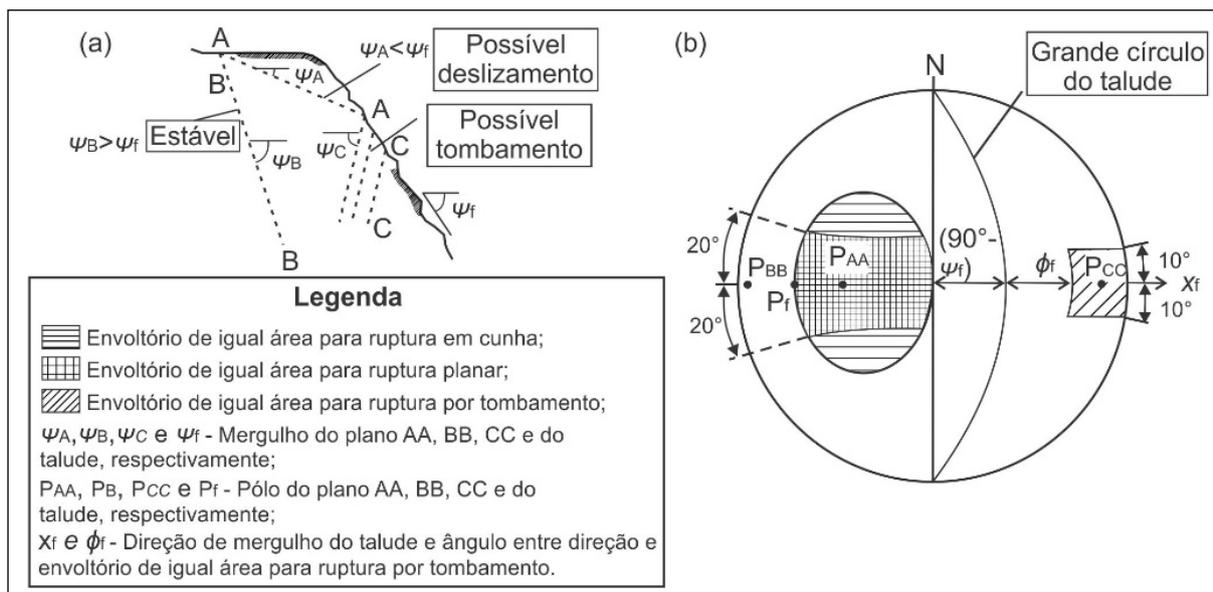
Um exemplo de análise cinemática é mostrado na Figura 3, na qual o talude de rocha contém três famílias de descontinuidades.

O risco de essas descontinuidades resultarem em ruptura do poliedro formado depende da relação

angular relativa entre as direções do poliedro formado e a inclinação do talude. No entanto, enquanto a análise permite uma indicação das condições de estabilidade, não se levam em conta as forças externas, como pressões hidrostáticas ou reforços, que podem ter efeitos significativos sobre a estabilidade do talude (WYLLIE; MAH, 2005).

O procedimento usual na aplicação dessa técnica é a identificação dos potenciais blocos instáveis, seguido de uma análise detalhada da estabilidade destas superfícies de ruptura (agentes externos).

Figura 3 – Análise cinemática dos blocos de rocha no talude: (a) família de descontinuidades no talude; e (b) envoltórios de igual área em estereograma.



Fonte: modificado de Wyllie e Mah (2005)

5 Caracterização geomecânica e desmonte por explosivos

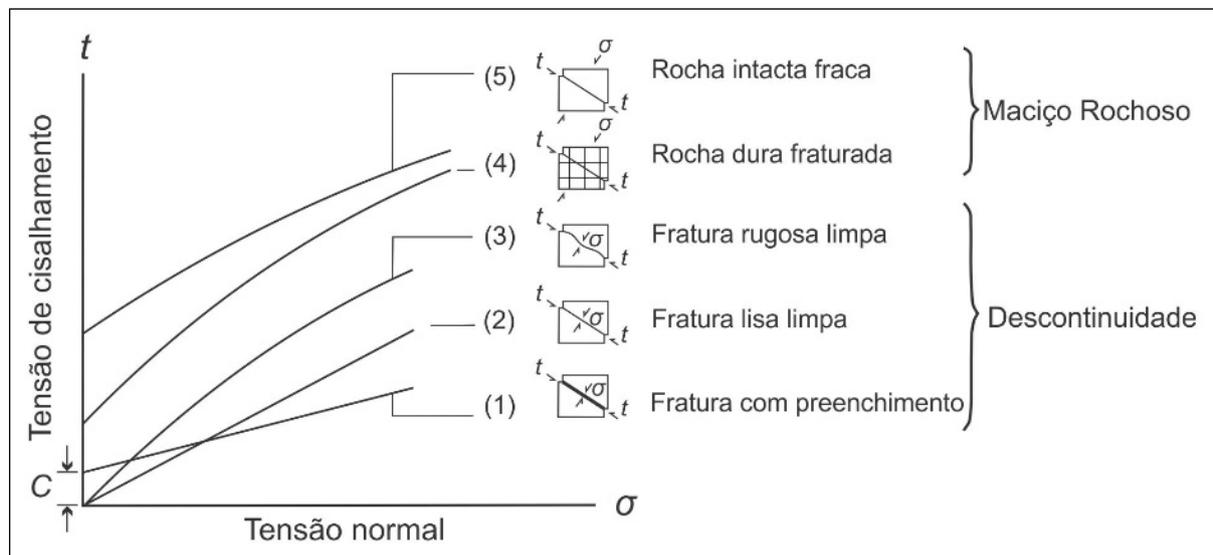
Todas as rochas apresentam algum tipo de descontinuidade, sejam microfissuras ou microfissuras, que influenciam nas suas propriedades físicas e mecânicas (Figura 4), além dos resultados nos desmontes.

As superfícies de descontinuidade podem ser de diferentes tipos: planos de estratificação; planos de laminação e foliação; planos de xistosidade; fraturas e juntas, que podem apresentar-se preenchidas, fechadas ou abertas. Mendes (2015) afirma que, devido a essas variações no tipo das descontinuidades,

existem diferentes graus de transmissão da energia do explosivo. As descontinuidades são superfícies sobre as quais as ondas de choque são refletidas e refratadas, dispersando a energia desenvolvida. Além disso, as fraturas e juntas afetam o plano de fogo, induzindo o escape dos gases prematuramente e provocando fragmentação irregular.

Com o objetivo de obter a melhor caracterização geomecânica dos maciços (no que diz respeito ao sistema de descontinuidades), são utilizadas técnicas que permitem obter e quantificar determinados tipos de informações relevantes ao plano de fogo (Figura 4 e Quadro 2).

Figura 4 – Relação entre as tensões de cisalhamento e normal, sobre uma superfície de ruptura para cinco diferentes condições geológicas



Fonte: Wyllie e Mah (2005)

Quadro 2 – Classificação das fraturas e superfícies e seus potenciais efeitos quanto à propagação das ondas de choque

Absorção da energia da onda de tensão nas fraturas	Abertura das fraturas (mm)	Natureza das fraturas
Pequena (<20%)	0 0-4.0	Fortemente cimentada. Cimentada com um material de impedância acústica similar ao da matriz.
Ligeira (20-40%)	< 0.5 < 4.0	Fraturas preenchidas com ar e água. Cimentada com um material de impedância acústica 1.5-2 vezes menor que a da matriz.
Média (40-80%)	0.5-1.0	Fraturas abertas preenchidas com ar e água.
Grande (>80%)	0.1-1.0 1.0	Fraturas preenchidas com material solto e poroso. Fraturas abertas e preenchidas de material solto poroso, ar e água.

Fonte: modificado de Llera et al. (1987)

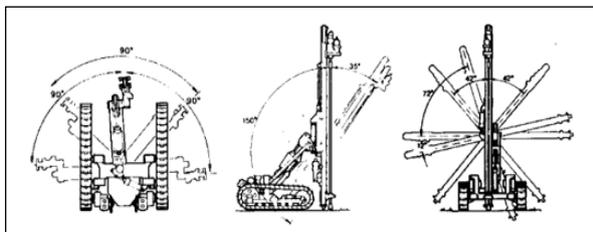
Desta forma, segundo Cavadas (2012), as principais informações quantitativas são: orientação; espaçamento; persistência; rugosidade; abertura; existência de material no interior das descontinuidades; percolação de fluidos; famílias de descontinuidades com características semelhantes.

Outro aspecto importante do projeto da perfuração é o que se entende por controle geoestrutural do maciço rochoso, o qual se refere à orientação relativa da frente e direção de desmonte com a orientação e inclinação dos estratos (LLERA et al., 1987).

6 Desmonte de rochas

A escavação de taludes rochosos geralmente envolve perfuração e detonação. Os principais métodos de perfuração aplicados em desmontes de rochas com explosivos, tanto em obras de superfície como subterrâneas, são: perfuração rotativa com brocas tricônicas (*Holler Bit*); roto-percussiva com martelo de superfície (*Top-Hammer*) (Figura 5); e roto-percussiva com martelo de fundo (*Down the Hole*) (SILVA, 2011). A responsabilidade pela concepção e implementação de operações de perfuração e detonação varia conforme o tipo de projeto. Wyllie e Mah (2005) afirmam que essa situação permite que os planos de fogo sejam ajustados para acomodar fatores como variações na geologia e otimização de operações de equipamentos.

Figura 5 – Exemplo de perfuratriz com martelo de superfície sobre trator com esteiras, muito versátil quanto à mobilidade e angulação de trabalho, bastante utilizada em desmontes realizados em bancadas (principalmente em pedreiras)



Fonte: modificado de Sousa (2019)

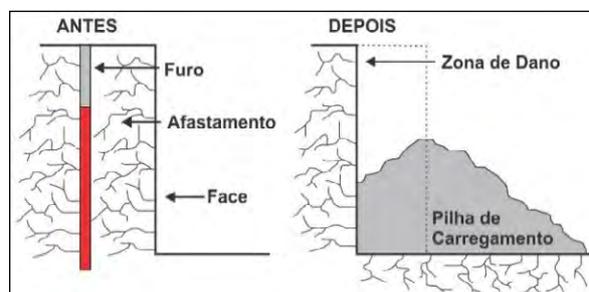
Para fragmentação com explosivos, o objetivo é produzir uma pilha de material adequada para os equipamentos de escavação, transporte e cominuição. Além disso, os tempos de movimentação dos equipamentos, após o desmonte, são minimizados se a geração de matacões for controlada, reduzindo, também, o tempo destinado aos fogos secundários. Outro requisito de desmonte é controlar os danos à rocha remanescente e, conseqüentemente, minimizar os processos de instabilidade do talude (WYLLIE; MAH, 2005).

6.1 Desmonte de rochas em bancadas

Esse tipo de desmonte tem como objetivo a conformação da lavra em degraus verticais e/ou inclinados, onde a coesão do material não permite

a escavação direta. Logo, faz-se uso da energia química dos explosivos (Figura 6) para se garantir uma condição adequada de estabilidade e operacionalidade (MENDES, 2015).

Figura 6 – Alguns parâmetros de uma mina e sua detonação em banco



Fonte: adaptado de Mendes (2015)

A bancada possui três superfícies características: a praça, superfície em que operam os equipamentos de carga e de transporte; a face, superfície vertical ou inclinada com a horizontal, de acordo com as condições geomecânicas do material em escavação (que determinam a sua estabilidade) e também em função do plano de fogo a ser utilizado; e o topo, que pode ser uma praça ou apenas a superfície horizontalizada superior do banco. Conforme explica Mendes (2015), a altura das bancadas varia de 3 a 20 metros, a qual é determinada por regulamentações previstas em lei, por segurança, pelas propriedades dos maciços rochosos, pelo tipo e tamanho dos equipamentos de escavação e pela necessidade de maximizar a eficiência no custo total de perfuração e desmonte. Essa conformação permite maior agilidade e desempenho dos equipamentos de perfuração, de carga e de transporte. Assim, ela se torna necessária na obtenção dos melhores resultados com a utilização de explosivos, a partir de frentes livres bem estabelecidas.

6.2 Análise da fragmentação da pilha de carregamento

Uma pilha com fragmentação inadequada, normalmente resultará em um custo mais elevado no desmonte secundário, no carregamento, no transporte, na britagem e na manutenção dos equipamentos utilizados, nessas etapas, que têm suas produtividades comprometidas (Quadro 3).

Quadro 3 – Impactos negativos e riscos causados aos processos que envolvem a detonação e a formação de uma pilha inadequada

Controle do Maciço	Carregamento	Transporte	Britagem	Meio Ambiente
Instabilidade dos taludes	Menor presença das caçambas	Atraso na pilha de deposição	Blocos inadequados no britador	Pulso de ar excessivo
	Desmonte secundário	Pisos irregulares	Atrasos nas correias	Ultralançamento
Sobre-escavação do maciço	Pilha baixa e compacta	Ângulos acentuados das vias de acesso		Poeira e gases
Aumento no tempo de estabilização	Aumento nos custos da manutenção	Aumento nos custos de manutenção	Aumento nos custos da manutenção	Vibrações do terreno
	Aumento do ciclo dos equipamentos de escavação	Desgastes dos pneus e/ou das correias transportadoras		Danos às instalações, estruturas e pessoas

Fonte: adaptado de Silva (2009)

A fragmentação da pilha pode ser melhorada diante do uso de: (i) malha adequada e compatível; (ii) relação condizente da malha com a altura de corte; (iii) melhor precisão na perfuração; (iv) conjunto adequado de explosivos e acessórios; (v) sequência de iniciação compatível com a estrutura da rocha; (vi) melhor precisão nos tempos de retardo; e (vii) em alguns casos, uso de explosivos mais energéticos.

6.3 Avaliação global do desempenho do desmonte de rocha em bancadas

De acordo com Silva (2009), para avaliar a qualidade de um desmonte de rochas, devem-se analisar os seguintes fatores:

- Fragmentação da rocha desmontada e compactação da pilha;
- Geometria;
- Praça resultante;
- Fraturas no maciço remanescente resultantes da operação;
- Presença de blocos no interior do piso do banco;
- Entorno: vibrações, projeções dos fragmentos e onda aérea produzida pela detonação

Ainda, para melhor avaliação, pode-se utilizar métodos de análise quantitativa: fotográfico, fotogramétrico, fotografia ultrarrápida; estudo da produtividade dos equipamentos; curva granulométrica; percentagem do material que

requer fragmentação secundária; e quantificação das interrupções no britador primário devido aos matacões (SILVA, 2011).

7 Materiais e métodos

Este trabalho foi dividido em duas etapas, uma teórica e outra prática.

A primeira baseou-se em pesquisa bibliográfica, a qual foi realizada em meios eletrônico e impresso, servindo de embasamento teórico para a etapa prática.

A segunda etapa consistiu no estudo de caso (etapa de campo), que buscou refletir, na prática, a importância da correlação existente entre a identificação de modelos de rupturas em taludes e a eficiência operacional envolvida na etapa de perfuração e desmonte de rochas.

O estudo de caso foi realizado através de uma parceria entre as empresas Desmontec PB Serviços Técnicos de Mineração LTDA, Rocha Asfalto e Mineração e a Unidade Acadêmica de Mineração e Geologia (UAMG) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). A área de estudo está localizada na cidade de Campina Grande-PB, na propriedade da empresa Rocha Asfalto e Mineração (Figuras 7A e 7B, página seguinte), que explora granito para produção e comercialização de brita utilizada na construção civil.

A área de ocorrência do maciço rochoso estudado está situada na Suíte Camalaú, de idade Paleoproterozóica, formada por ortognaisses e sienitos, onde ocorre uma zona de cisalhamento transcorrente sinistral.

Figura 7 – A) Vista da pedreira com destaque para o local de realização do estudo de caso (traço e seta em vermelho); B) Visão panorâmica da pedreira, com destaque para o talude analisado



Fonte: A) Modificado do Google Earth (2019); B) Dados da pesquisa

A partir do levantamento geológico em campo, foi realizada a análise petrográfica (*in situ*) das rochas presentes no maciço e a amostragem das atitudes dos planos de descontinuidades do talude estudado (com auxílio de bússola do tipo Brunton).

Os dados obtidos em campo foram tratados com o auxílio dos softwares Stereonet 10 e Excel 2013. Com o Stereonet 10, foram plotados os dados de atitudes

dos planos (descontinuidades) subdivididos em: tipo, direção, mergulho, sentido do mergulho e família (sendo essa última baseada em direções preferenciais); dessa forma, observaram-se as interseções dos planos das famílias preferenciais (com o objetivo de determinar prováveis formas e direções de deslizamento de blocos no talude).

Com o Excel 2013, os dados foram organizados em tabela e visualizados por meio de gráficos. Por fim, com a junção dos dados da perfuração e do desmonte de rocha (fornecidos pela Desmontec PB), obteve-se um cenário de análise de inferência, favorável à percepção da influência dos modelos de ruptura em taludes na qualidade da eficiência operacional da perfuração e do desmonte de rocha, determinando qual a melhor forma de iniciar as minas (furos carregados com explosivos) – e quais as direções mais indicadas aos planos de corte.

8 Resultados

A partir dos parâmetros do plano de fogo, observados no Figura 8, vê-se que o comprimento do talude a ser estudado é de 36 metros (Figura 9A). Ao longo desse perfil, 27 descontinuidades (juntas e veios) foram medidas no caminhamento com sentido NE para SW, ao longo da direção 020° do talude.

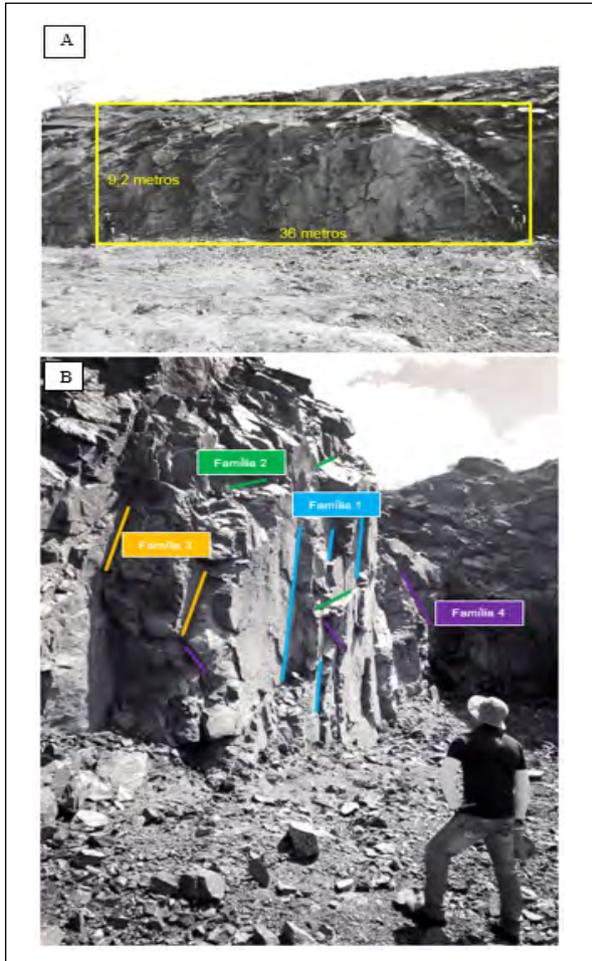
As juntas e os veios foram classificados em 4 famílias (1, 2, 3 e 4), separadas com base na direção preferencial da superfície de ruptura (Figura 9B, Quadro 4), sendo definidos os espaçamentos médios de cada grupo (Figura 10).

Figura 8 – Modelo de plano de fogo utilizado pela Desmontec no desmonte da pedreira pertencente a Rocha Asfalto e Mineração

		ROCHA ASFALTO PLANO DE FOGO CAMPINA GRANDE	
Local: Campina Grande/PB		Fogo Nº: 15	Data:
Tipo de Rocha: Gnaiss		() Compacta	(X) Fraturada
		() Decomposta	() Com Água
Hora:			
CARGA MÁXIMA POR ESPERA (kg):	Confidencial	PROFUNDIDADE MÉDIA (m):	9,2
ESTACAS:	-	ALT. SUB. FURAÇÃO (m):	0,40
DENSIDADE (t/m³):	2,7	DIÂMETRO DO FURO:	3"
AFASTA(m)/ESPAÇ.(m):	1,8x4,0	ÂNGULO:	15°
TOTAL DE FUROS:	61	METROS PERFUADOS:	Confidencial
LARGURA DA BANCADA (m):	36	VOL. POR FURO (m³):	Confidencial
TAMPÃO:	1,30	VOL. TOTAL (m³):	Confidencial
RAZÃO DE CARGA (kg/m³):	0,629	CARTUCHOS (kg):	-
EXPLOS. C. FUNDO:	Confidencial	TOTAL DE EXPLOSIVOS (kg):	Confidencial
CORDEL DETONANTE:	Confidencial	METRO:	Confidencial
REFORÇADOR:	Confidencial	UNIDADE:	Confidencial
EXCEL DE COLUNA:	12m/250ms	UNIDADE:	Confidencial
HTD/RETARDO:	Confidencial	TOTAL HTD/RETRDOS:	Confidencial
HTD/RETARDO:	Confidencial	TOTAL HTD/RETRDOS:	Confidencial
SPOLETIM:	Confidencial	UNIDADE:	Confidencial
ENGENHEIRO:		BLASTER:	
ÁREA:		Data:	
ASS.:			

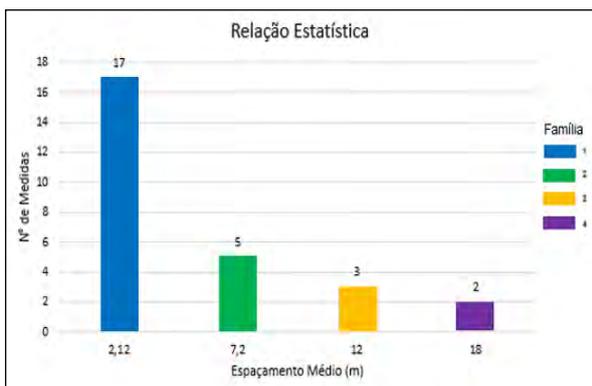
Fonte: dados da pesquisa

Figura 9 – A) Visão frontal do talude analisado, com comprimento de 36 m e 9,2 m de altura (demarcados na região em amarelo que cobre as duas pessoas na foto); B) Vista de perfil do talude analisado, com as famílias de descontinuidades representativas pelos tipos 1, 2, 3 e 4 em destaque



Fonte: fotos dos autores

Figura 10 – Relação estatística entre o número de medidas, por família, e o espaçamento médio delas.



Fonte: dados da pesquisa

8.1 Dados obtidos em campo

A análise petrográfica *in situ* do maciço permitiu constatar que ele corresponde a um granodiorito rico em biotita (com cristais levemente orientados), de coloração cinza escuro e com matriz constituída, principalmente, de:

- 45% de plagioclásio;
- 25% de biotita;
- 20% de quartzo;
- 5% de ortoclásio;
- 5% de hornblenda.

As juntas observadas são classificadas como juntas de cisalhamento, sem preenchimento aparente, decorrentes do movimento sinistral regional.

Os veios são prováveis fraturas de extensão, essencialmente preenchidas por quartzo.

8.2 Tratamento dos dados

Com base nos dados da amostragem de campo e com auxílio do software Stereonet 10, foi feito o tratamento das informações colhidas. Inicialmente, os planos identificados foram plotados por tipos (talude, juntas e veios) e cores (Figura 11A).

Em seguida, foram plotados os respectivos polos e seus contornos de densidade. No estereograma correspondente, as cores mais quentes correspondem a uma quantidade maior de polos na região do contorno (Figura 11B).

Definiu-se, posteriormente, a face média, a partir do polo médio de cada família (Figura 11C).

A interseção entre as faces médias permite identificar, auxiliado pelo diagrama de rosetas, a direção preferencial de movimento do possível poliedro formado (Figura 11D), relativamente à frente do talude, anteveendo-se o modelo de ruptura existente.

Também é possível inferir as possíveis variações da iniciação e sequência de detonação, de forma a entender a interferência das ondas de choque e expansão dos gases nas fraturas naturais existentes no maciço rochoso.

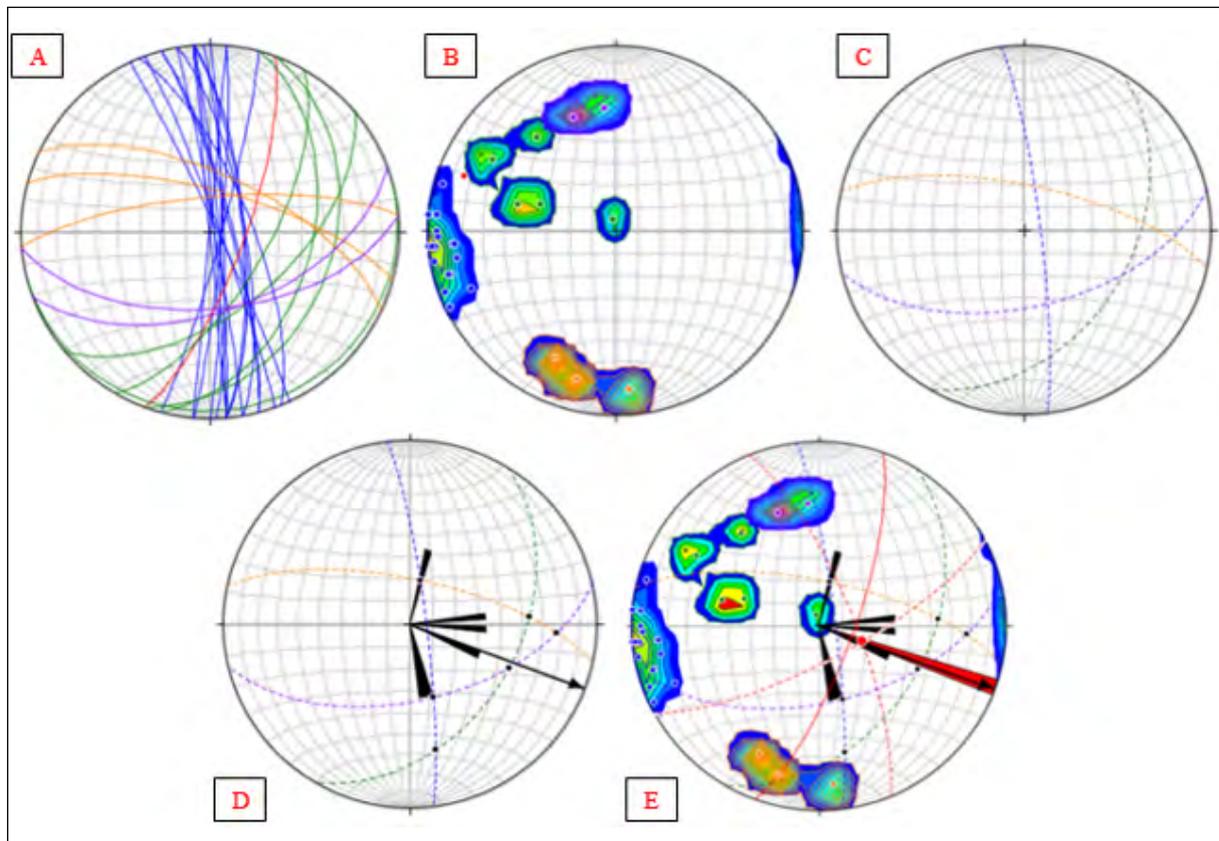
Por fim, foram plotados os planos de corte, previstos em plano de fogo (com iniciação em “V”) e conjugados com os planos do talude e médios das famílias identificadas (Figura 11E).

Quadro 4 – Amostragem das descontinuidades

Amostragem de campo					
Medida	Tipo de descontinuidade	Direção (°)	Mergulho (°)	Sentido do mergulho	Família
1	Junta de cisalhamento	338	72	NE	1
2	Junta de cisalhamento	350	75	NE	1
3	Veio (Fratura de extensão)	295	65	NE	3
4	Junta de cisalhamento	345	80	NE	1
5	Junta de cisalhamento	355	76	NE	1
6	Veio (Fratura de extensão)	285	72	NE	3
7	Junta de cisalhamento	355	75	NE	1
8	Junta de cisalhamento	340	86	NE	1
9	Junta de cisalhamento	15	45	SE	2
10	Junta de cisalhamento	50	55	SE	2
11	Junta de cisalhamento	0	85	NE	1
12	Junta de cisalhamento	15	85	NE	1
13	Junta de cisalhamento	5	85	NE	1
14	Junta de cisalhamento	5	90	-	1
15	Junta de cisalhamento	355	90	-	1
16	Junta de cisalhamento	70	55	SE	4
17	Junta de cisalhamento	355	86	NE	1
18	Junta de cisalhamento	85	56	SE	4
19	Junta de cisalhamento	350	88	NE	1
20	Junta de cisalhamento	30	65	SE	2
21	Veio (Fratura de extensão)	265	75	NE	3
22	Junta de cisalhamento	20	35	SE	2
23	Junta de cisalhamento	335	87	NE	1
24	Junta de cisalhamento	358	84	NE	1
25	Junta de cisalhamento	355	88	NE	1
26	Junta de cisalhamento	75	5	SE	2
27	Veio (Fratura de extensão)	345	81	NE	1
Espaçamento médio = Comprimento do talude (m) / N° Medidas da família	Família 1 = 36/17 = 2,12 m				
	Família 2 = 36/5 = 7,20 m				
	Família 3 = 36/3 = 12,00 m				
	Família 4 = 36/2 = 18,00 m				

Fonte: dados da pesquisa

Figura 11 – A) Atitudes dos planos medidos em campo e classificados por tipo (talude em vermelho; juntas em azul, verde e roxo; e veios em laranja); B) Identificação dos polos (talude, ponto vermelho isolado; família 1, pontos azuis; família 2, pontos verdes; família 3, pontos laranjas; e família 4, pontos roxos), com seus respectivos contornos de densidade; C) Faces médias das famílias de discontinuidades (tipos 1, 2, 3 e 4, tracejados em azul, verde, laranja e roxo, respectivamente); D) Direção preferencial natural de deslizamento, indicada pelo vetor deslocamento (seta preta) do modelo de ruptura predominante no talude; E) Plotagem de todos os planos com a direção de deslocamento média



Fonte: dados da pesquisa

8.3 Discussões

O tratamento dos dados de campo permitiu identificar, com base em análise qualitativa, a influência das discontinuidades naturais na estabilidade do talude, que apresentou dois modelos potenciais de ruptura: em cunha e planar.

O modelo de ruptura em cunha é identificado a partir das densidades de polos da família 1 (polos e tracejado azuis) e da conjugação de polos das famílias 2 e 4 e polos da família 3 (Figura 11), anteriores à face do talude. Além disso, o diagrama de rosetas, para os pontos de interseção entre as famílias 1 e 2; 1 e 3; 2 e 3; 3 e 4, fornecem um indicativo das direções de deslizamento preferenciais que são diferentes da direção de deslizamento natural do talude (Figura 11E).

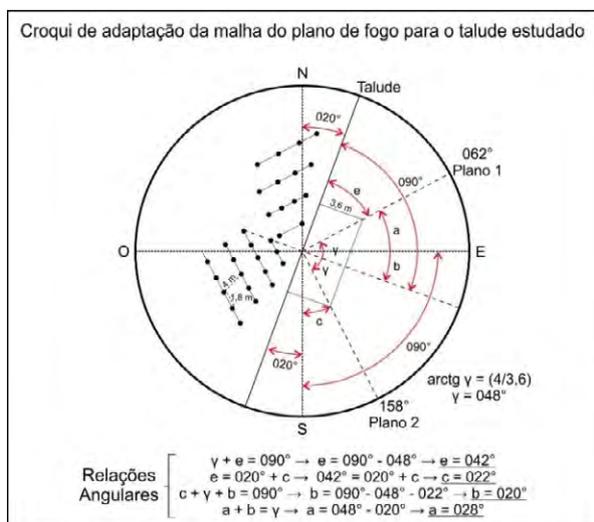
A identificação do modelo de ruptura planar é perceptível a partir da conjugação de polos das famílias 2 e 4, que ocorre atrás da face do talude (Figura 11). Pode-se perceber ainda, com base no diagrama de rosetas, que a interseção entre as famílias 2 e 4 indica uma direção de influência para um deslizamento aproximadamente paralelo ao deslizamento natural do talude (Figura 11E).

Considerando a densidade de linhas de interseção que o modelo de ruptura em cunha possui, em relação ao modelo de ruptura planar, há um forte indicativo de que um deslizamento, em sua maior parte por ruptura em cunha, ocorra naturalmente no talude. Dessa forma, uma maior performance nas operações de perfuração e desmonte de rochas será obtida com

o aproveitamento das superfícies naturais de ruptura do talude.

Assim, para a iniciação das minas foi recomendado aplicar uma malha em “V”, conforme configuração apresentada na Figura 12, com direção de desmorte coincidente com a direção de deslizamento natural do talude (que também coincide com a direção de deslizamento do modelo de ruptura planar identificado).

Figura 12 – Croqui de campo utilizado para adequação do plano de fogo ao modelo de ruptura dominante

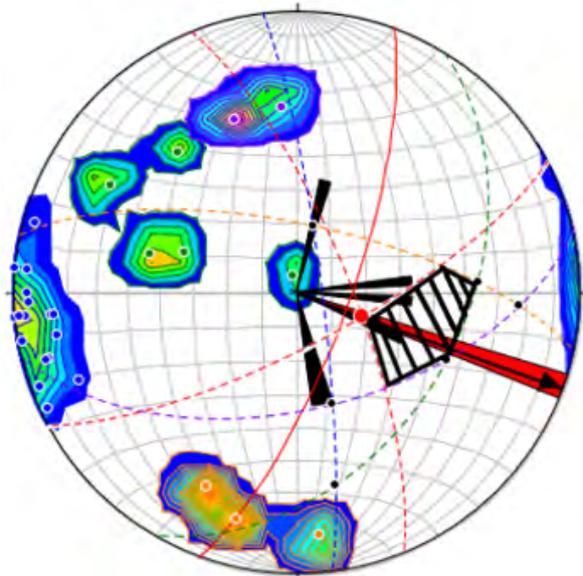


Fonte: dados modificados da pesquisa

A iniciação em malha “V” permite uma maior fragmentação do material e redução dos efeitos do desmorte. A fragmentação é intensificada porque há a adição de dois planos de corte aos planos dos modelos de ruptura identificados, permitindo a remoção de blocos mais engastados no talude (Figura 13). Para maior controle dos efeitos do desmorte, visa-se a melhor distribuição da energia dos gases, através dos vazios naturais do maciço, evitando vibrações não programadas.

Do ponto de vista econômico, uma pilha com fragmentação mais uniforme, resultante da ligação em “V” (Figuras 14A e 14B), possibilita a redução nos tempos de ciclo dos equipamentos de carregamento e de transporte e, conseqüentemente, há redução de gastos com combustível, manutenção e peças de reposição. Por outro lado, caso a ligação adotada nas minas seja outra, provavelmente serão necessários maiores cuidados para a redução dos efeitos da vibração, fator que pode reduzir a eficiência do desmorte.

Figura 13 – Exemplo de região de maior engaste (destacada pelo polígono traçado em preto) em relação ao desmorte adotado



Fonte: dados da pesquisa

Figura 14 – A) Destaque à pilha formada: observar que os blocos de maior dimensão são provenientes de regiões de maior engaste acima do talude; B) Vista da pilha formada após a detonação



Fonte: fotos dos autores

Em relação à perfuração, são percebidos aspectos positivos e negativos relacionados às estruturas identificadas, particularmente na bancada do talude analisado. Por um lado, a perfuração é favorecida pelas descontinuidades naturais do maciço, no que diz respeito à direção e ao espaçamento médio observados. Em contrapartida, o excesso de descontinuidades é desfavorável à perfuração, em decorrência da necessidade de possíveis paradas para ajuste, aumento do seu ciclo operacional e possíveis desvios, reduzindo, assim, a taxa de perfuração e a vida útil das brocas e hastes.

9 Considerações finais

A partir dos resultados obtidos no estudo de caso, foi possível identificar, por meio de análise cinemática da geologia estrutural, dois padrões prováveis de rupturas (em cunha e planar) no talude analisado e que correspondem a zonas potencialmente instáveis durante as operações de perfuração e desmonte de rochas. A identificação dessas zonas permitiu uma conformação mais adequada do plano de fogo a ser utilizado. Em função delas, foram ajustados os parâmetros da geometria de iniciação das minas (para iniciação em "V") e a razão de carregamento (quando em regiões de maior engaste natural do maciço).

Os resultados obtidos neste estudo de caso demonstraram, por meio da prática, que uma avaliação geotécnica pode ser efetiva na redução de custos durante o processo de desmonte de rochas e, também, na melhoria de qualidade da atividade mineral, como um todo.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos às empresas Desmontec PB e Rocha Asfalto e Mineração e à UAMG-UFPA pelo apoio prestado no desenvolvimento deste estudo, bem como aos revisores da revista Principia pelos valiosos comentários na revisão do manuscrito.

REFERÊNCIAS

CAVADAS, P. M. M. **Optimização do Desmonte numa Mina a Céu Aberto com Aplicação de Air Decks**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas e Geo-Ambiente) – Universidade do Porto, Porto, 2012.

CORREIA, C. A. A. **Desmonte de Rocha com Explosivos: Importância da Optimização**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia

Geotécnica e Geoambiente) – Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2011.

GÓIS, J. *et al.* **Manual do operador de explosivos: um guia de apoio para a formação**. Coimbra: Associação Portuguesa de Estudos e Engenharia de Explosivo; Associação Nacional da Indústria Extractiva e Transformadora, 2011. 151 p.

GUAZZELLI, S. R. *et al.* Análise de Custos das Operações de Perfuração e Desmonte de Rochas com a Utilização de Explosivos em Minas a Céu Aberto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MINA A CÉU ABERTO E MINA SUBTERRÂNEA - CBMINA, 7., 2012, Belo Horizonte. **Anais (...)**. Belo Horizonte: IBRAM, 2012.

LILLO, J.; OYARZUN, R. **Geología Estructural Aplicada a la Minería y Exploración Minera: Principios Básicos**. Almadén: GEMM, 2013.

LLERA, J. M. P. *et al.* **Manual de Perforacion y Voladura de Rocas**. Madri: ETIMSA, 1987.

MENDES, M. L. **Curso de Desmonte de Rochas por Explosivos: Formação de Blaster**. Minas Gerais: [s. n.], 2015.

SILVA, V. C. **Curso de Min 210 - Operações Mineiras**. 2009. Apostila (Bacharelado em Engenharia de Minas). Ouro Preto: UFOP, 2009.

SILVA, V. C. **Curso Min 112 - Operações Mineiras**. 2011. Apostila (Bacharelado em Engenharia de Minas). Ouro Preto: UFOP, 2011.

SOUSA, L. **Perfuração: Noções Básicas**. UEMG, 2017. Disponível em: <https://www.ebah.com.br/content/ABAAABVvAAL/perfuracao-nocoos-basicas>. Acesso em: 15 abr. 2019.

WYLLIE, D. C.; MAH, C. W. **Rock Slope Engineering Civil and Mining**. Londres: Spon Press, 2005.