

A IMPORTÂNCIA DA GEOLOGIA DE ENGENHARIA PARA O DIMENSIONAMENTO DOS PILARES NA CAMADA DE CARVÃO BONITO DA MINA FONTANELLA, TREVISO, SC

CLOVIS GONZATTI
RUY PAULO PHILIPP
ANTÔNIO PEDRO VIERO

Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Porto Alegre-RS - Brasil
Email: gonzatti@ufrgs.br

PAULO CESAR VIEIRA
SÍLVIO FERNANDO FERREIRA
Carbonífera Metropolitana S/A - Treviso-SC - Brasil
Email: paulo@carboniferametropolitana.com.br

RODRIGO MARTINS SARAIVA
Fundação de Ciência e Tecnologia do Estado do Rio Grande do Sul - Porto Alegre-RS - Brasil
Email: rodrigo-saraiva@cientec.rs.gov.br

RESUMO ABSTRACT

As características estruturais da camada de carvão Bonito, localizada na Bacia Carbonífera Sul-Catarinense, no estado de Santa Catarina, tem sido objeto de preocupação para os responsáveis pelo dimensionamento dos pilares nas minas subterrâneas em operação, tendo em vista a ocorrência, nas últimas duas décadas, de pelo menos três casos de ruptura de pilares que afetaram as atividades de mineração nessas minas. As características estruturais dessa camada diferem sensivelmente das demais até então mineradas no estado de Santa Catarina, sendo cada vez mais evidente a interferência negativa desses aspectos na resistência *in situ* da camada de carvão.

Tendo como campo de pesquisas uma área de aproximadamente 4 km², distribuída em quatro zonas na Mina Fontanella, em operação no município de Treviso, SC, foram desenvolvidos mapeamentos das discontinuidades presentes na camada de carvão. Os resultados mostram a presença de pelo menos três famílias

The structural characteristics of the Bonito coal seam, located in the Sul-Catarinense Carboniferous Basin, in the state of Santa Catarina, have been a subject of concern by those responsible for dimensioning the pillars of underground mines in operation, in view of the occurrence, in the last two decades, of at least three cases of rupture of pillars that affected the mining activities in these mines. The structural characteristics of this seam are substantially different from the others previously mined in the state of Santa Catarina, and the negative influence of these aspects on the *in situ* strength of the coal seam has been increasingly evident. A mapping survey of the discontinuities present in the coal seam in the Fontanella Mine, operating in the city of Treviso, SC, was conducted, along four zones of an area of approximately 4 km². The results show the presence of at least three families of major

de fraturas importantes em todas as zonas mapeadas. Por outro lado, algumas das principais características das descontinuidades, como a orientação das fraturas, a frequência total de fraturas por metro e a persistência, permitem a identificação de zonas com diferentes padrões estruturais dentro da mina.

Os resultados do mapeamento estrutural foram utilizados para a classificação geomecânica do maciço, sendo definidos índices de qualidade do maciço de carvão para as quatro zonas estudadas na Mina Fontanella e estimados valores para a resistência *in situ* da camada de carvão.

Palavras-chave: Formação Rio Bonito, carvão, mapeamento de descontinuidades, classificação geomecânica, resistência *in situ*

1 INTRODUÇÃO

A Bacia do Paraná é uma bacia intracratônica constituída por uma espessa sucessão de rochas sedimentares tendo na porção superior um pacote vulcânico, atingindo no seu total cerca de 7.000 metros de espessura. A evolução da Bacia do Paraná começa no período Ordoviciano Superior (450 milhões de anos) e estende-se até o Cretáceo Superior (65 milhões de anos). A sedimentação pode ser subdividida em seis supersequências separadas por inconformidades regionais (MILANI, 1997 e MILANI & THOMAS FILHO, 2000). As camadas de carvão estão associadas à sequência denominada Gondwana I, que é representada do ponto de vista litoestratigráfico pelas rochas sedimentares da Formação Rio Bonito, pertencentes ao Grupo Guatá. Esta unidade foi depositada no Permiano, entre 280 e 270 milhões de anos atrás, representando ambientes de sedimentação marinho e deltaico-transicional.

As características estruturais da camada de carvão Bonito, na bacia Carbonífera Sul-Catariense, tem se mostrado bastante diferentes das encontradas nas camadas sotopostas, Irapuá e Barro Branco. Esses aspectos ficaram evidentes quando, na década de 1990, três minas subterrâneas de carvão foram abertas na camada Bonito e sofreram colapso localizado ou em grandes áreas devido à ruptura de pilares (Minas Fontanella, Barro Branco e Bonito). Na época, essas minas dimensionavam seus pilares utilizando os mesmos métodos empregados nas camadas superiores,

fractures in all mapped zones. On the other hand, some of the main features of the discontinuities, such as fracture orientation, overall frequency of fractures per meter, and persistence, allowed to identify zones with different structural patterns within the mine. The results of the structural mapping were used for the geomechanical classification of the rock mass, defining quality ratings of the coal mass for the four zones studied and values for the *in situ* strength of the coal seam were estimated.

Keywords: Rio Bonito Formation, coal, discontinuities mapping, rock mass classification, *in situ* strength

considerando a resistência característica da camada de carvão Barro Branco (7,12 MPa).

Na mineração de carvão no Brasil, as características estruturais das camadas de carvão não têm sido objeto de maior preocupação, salvo as grandes estruturas como falhas e diques de diabásio, que cortam não somente a camada de carvão, mas todo o pacote sedimentar, incluindo as camadas encaixantes do piso e do teto. Essa despreocupação provavelmente esteve associada às próprias características das camadas de carvão mineradas até o final da década de 1990, as quais apresentam como principais estruturas os planos de acamamento, que por serem perpendiculares à tensão principal maior praticamente não afetam a resistência da camada de carvão.

O projeto das novas minas subterrâneas numa camada estruturalmente muito diferente das demais até então mineradas demanda a incorporação de novos elementos na arte de dimensionar os pilares. No início dos anos 2000 a Carbonífera Metropolitana, em conjunto com a CIENTEC (Fundação de Ciência e Tecnologia do Estado do Rio Grande do Sul), iniciou o Projeto Bonito, com o intuito de estudar a resistência da camada de carvão Bonito na Mina Fontanella, localizada no Município de Treviso em Santa Catarina. Nessa pesquisa, as preocupações foram além dos estudos mecânicos até então realizados nas camadas de carvão do Sul do Brasil pela própria CIENTEC nos anos 1980, dando-se ênfase, também, aos aspectos estruturais da camada de carvão. Nesse novo contexto, o mapeamento estrutural passou a

fazer parte dos levantamentos *in situ* para auxiliar na definição da resistência característica da camada de carvão Bonito.

Neste trabalho, são reportados os levantamentos estruturais realizados ao longo de quase uma década de exploração na camada de carvão Bonito da Mina Fontanella. São apresentadas as técnicas adotadas para o mapeamento e zoneamento estrutural da camada de carvão na mina, os resultados obtidos nas diferentes áreas mapeadas, a classificação geomecânica da camada em diferentes zonas da mina e estimativa da resistência *in situ* da camada. São sugeridos, ainda, procedimentos para acompanhar as variações estruturais na camada de carvão Bonito nas novas áreas de expansão da lavra na Mina Fontanella ou em novas minas.

2 OS ASPECTOS ESTRUTURAIS E A RESISTÊNCIA DO MACIÇO ROCHOSO

A quantificação dos aspectos geológicos requer, necessariamente, o entendimento de que nem sempre isso é plenamente possível (HOEK, 1999). De outra parte, quando as características físicas dos maciços rochosos são modeladas matematicamente, a precisão dos resultados é limitada. Em última análise, o tratamento das informações geológicas, visando o seu uso como base para a tomada de decisões de engenharia, deve ser norteadas por argumentos lógicos, experiência e bom senso.

Na mineração, o trabalho realizado pela engenharia é fundamentado essencialmente nas informações da geologia. Nesse ambiente, geólogos de engenharia e engenheiros de minas devem formar uma equipe para tirar o melhor proveito dos seus conhecimentos específicos. Essa atitude tende a maximizar a probabilidade de sucesso na escolha de parâmetros mais realistas para uma determinada condição de projeto. Em se tratando de pacotes de rochas carbonosas, o papel do geólogo de engenharia é ainda mais importante, na medida em que esses maciços rochosos são muito heterogêneos e mais descontínuos do que os de rochas duras, além de apresentarem anisotropia mecânica devido às suas características estruturais de formação.

As características estruturais da camada de carvão são o elo mais importante no processo

de transferência da resistência da rocha intacta, determinada em laboratório, para a condição de maciço rochoso. Esse tipo de associação vem sendo estudada por vários pesquisadores no mundo inteiro (PROTODIAKONOV, 1965; PALMS-TROM, 1985; WILSON, 1983; LAUBSCHER, 1984; RAMAMURTHY, 1986; TRUEMAN et al., 1992; VARGA 1993; KALAMARAS 1993; KALAMARAS & BIENIAWSKI 1995; SHEOREY et al., 1987; HOEK et al., 2002), sendo que nas últimas décadas esta abordagem vem ganhando importância na mineração de carvão para a estimativa da resistência *in situ* da camada, à medida que algumas classificações geomecânicas foram refinadas e passaram a levar em consideração aspectos particulares desses maciços rochosos.

Dadas as características estruturais muito especiais do carvão, estima-se que os defeitos da rocha, representados pelas suas descontinuidades primárias (“cleats”) ou secundárias (tectônicas) e com características variadas, sejam responsáveis pela redução da resistência *in situ* do maciço em até 85% relativamente à rocha intacta (KALAMARAS & BIENIAWSKI, 1995). Diferentes metodologias foram desenvolvidas para classificar diferentes condições geológico-estruturais de maciços rochosos. Algumas são menos complexas e outras mais sofisticadas que se valem de um conjunto maior de informações geológicas, como o número e orientação das famílias principais de fraturas e suas características (rugosidade, abertura, preenchimento). Foram desenvolvidas inicialmente para auxiliar no dimensionamento do sistema de suporte de túneis e com o tempo as suas aplicações foram ampliadas, incluindo a estimativa da resistência do maciço rochoso para uso nos projetos de engenharia.

Wilson (1983) foi um dos precursores no sentido de incorporar ao processo de definição da resistência característica de camadas de carvão os aspectos estruturais do maciço, sugerindo fatores de redução da resistência de laboratório dependendo do grau de fraturamento. Ainda no início da década de 1980, Hoek & Brown (1980) propuseram um critério de ruptura com o objetivo de melhor descrever o comportamento da rocha intacta nas condições de confinamento das obras de engenharia, tentar explicar a anisotropia da resistência devido aos planos de descontinuidades e,

mesmo que numa primeira aproximação, prover alguma indicação da resistência de maciços rochosos com várias famílias de descontinuidades. Para a estimativa das constantes m e s , parâmetros aproximadamente análogos ao ângulo de atrito e coesão, respectivamente, e do critério de Mohr-Coulomb de cada tipo e condição estrutural de maciço rochoso, os autores sugeriram o uso das classificações geomecânicas de Bieniawski (1976) e de Barton et al. (1974). Para maciços de carvão, Bieniawski & Bauer (1982) sugeriram uma série de valores de m e s considerando as diferentes classes com base em estudos de carvões dos EUA. Os primeiros dados relativos ao carvão, ainda que para a rocha intacta, foram apresentados por Hoek (1994) quando foi proposta uma função mais geral para o critério de ruptura e um novo índice, o GSI - Geological Strength Index. Esse novo índice, aperfeiçoado por Hoek & Brown (1997) e Hoek et al. (2002), substitui as classificações geomecânicas tradicionais e consiste num sistema capaz de expressar as condições estruturais e o estado das superfícies das descontinuidades presentes no maciço, permitindo a redução da resistência de laboratório para diferentes condições geológicas.

Na mesma direção da quantificação da influência das descontinuidades na resistência do maciço rochoso, Palmstrom (1985) sugeriu a utilização da frequência de juntas por unidade de volume (J_v) como o parâmetro mais representativo para expressar o grau de fraturamento de um maciço. Esse parâmetro seria mais apropriado que o RQD - Rock Quality Designation (DEERE, 1963) e que o espaçamento linear entre juntas proposto por Priest & Hudson (1976). O mesmo Palmstrom (1995), amparado em estudos de laboratório e numa pequena quantidade de ensaios *in situ* de rochas duras, propôs o índice RMI - Rock Mass index, utilizado para a redução da resistência da rocha intacta a partir da ponderação dos diferentes aspectos estruturais que reconhecidamente interferem na resistência do maciço. O autor leva em consideração as principais características das juntas, como a rugosidade, persistência, grau de alteração da superfície dos planos, número de famílias e espaçamento global.

Também tem sido objeto de estudos a influência da orientação das descontinuidades, em relação à direção principal de carregamento,

na resistência da rocha (HOEK & BROWN, 1980; HOEK, 1983; RAMAMURTHY, 1993; RAMAMURTHY et al. 1988; ZHONGJIE, 1993; RAMAMURTHY & ARORA, 1994; JADE & SITHARAM, 2003). As observações registram uma sensível redução da resistência, maior na condição uniaxial e menor na condição triaxial, quando a inclinação das descontinuidades em relação à direção de carregamento situa-se na faixa entre 30° e 40°. Em termos práticos, assumindo a tensão vertical como sendo a tensão principal maior num maciço carbonoso, as descontinuidades com mergulhos na faixa entre 50° e 60° são as mais desfavoráveis para a estabilidade dos pilares de sustentação da mina de carvão.

Uma abordagem dando ênfase aos aspectos estruturais das camadas de carvão foi apresentada por Esterhuizen (1995). Em estudo envolvendo camadas de carvão da África do Sul, o autor propõe a utilização de classificação geomecânica dos maciços, a partir de detalhado mapeamento estrutural da camada de carvão, para a correção da resistência característica da camada. A exemplo de Varga (1993), porém, com avanços objetivos e práticos, o autor caracterizou e hierarquizou os diferentes tipos de descontinuidades presentes nas camadas de carvão da África do Sul ("cleats", "slikensides", fraturas), obtendo como resultado padrões de maciço cuja resistência *in situ* poderia ser ajustada (estimada) a partir da aplicação do critério de resistência de Hoek & Brown (1980). O mesmo Esterhuizen (2000) propôs que o cálculo da resistência do pilar seja feito levando em conta o número de famílias de descontinuidades, a orientação das descontinuidades em relação à direção da tensão principal maior, a frequência de fraturas por metro e o ângulo de atrito dos planos da descontinuidade.

Em síntese, os aspectos estruturais do maciço rochoso que interferem negativamente na resistência podem ser assim resumidos:

- superfícies dos planos das descontinuidades lisas;
- forte alteração nos planos das descontinuidades;
- elevada frequência de fraturas por unidade linear ou de volume;
- elevado número de famílias presente no maciço;
- mergulho das descontinuidades na faixa entre 50° e 60°, aproximadamente.

Independentemente do peso dado a cada uma dessas características estruturais do maciço

e de serem consideradas todas ou apenas parte delas, o fato é que esses aspectos não podem ser esquecidos para a estimativa da resistência característica do maciço rochosos de carvão, sob pena de se incorrer em graves erros no dimensionamento dos pilares.

3 ASPECTOS GEOLÓGICOS DA CAMADA DE CARVÃO BONITO

3.1 Geologia regional

Na Bacia do Paraná, as reservas de carvão estão localizadas na sua porção sudeste, conhecida por ser uma grande bacia sedimentar gonduânica intracratônica (MILANI & THOMAS FILHO, 2000). Esta bacia se estende do centro ao sul do Brasil e inclui parte dos países Paraguai, Uruguai e Argentina. O registro da evolução da Bacia do Paraná na região sul envolveu a deposição de um espesso pacote de sedimentos incluindo na sua base, conglomerados, diamictitos, arenitos e pelitos da Formação Taciba do Grupo Itararé, depositados no período Carbonífero. Estes sedimentos foram recobertos no período Permiano por uma sucessão de leques aluviais e por espessos pacotes de arenitos marinhos e deltaicos da Formação Rio Bonito, pertencentes ao Grupo Guatá. No Brasil,

os estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul são os que contemplam as maiores jazidas com potencial de lavra subterrânea. Nas jazidas de carvão de Santa Catarina, a deposição da matéria orgânica vegetal que originou os carvões ocorreu em ambientes transicionais, com influências ora marinhas, ora continentais. Algumas camadas associam-se a depósitos fluviais, como é o caso provavelmente da camada Irapuá, enquanto as demais, incluindo a camada Bonito, estão associadas provavelmente a ambiente marinho.

A concessão da Mina Fontanella, de propriedade da Carbonífera Metropolitana S.A., está localizada na porção norte da bacia carbonífera Sul Catarinense, englobando áreas dos municípios de Treviso, Lauro Müller e Siderópolis, conforme a Figura 1. Estratigraficamente, a camada de carvão Bonito situa-se dentro da Formação Rio Bonito. Trata-se da formação mais antiga aflorante na área, sendo esta também a formação que hospeda as camadas de carvão economicamente mais importantes. A camada Bonito (Inferior) presente na Mina Fontanella é composta basicamente por camadas de carvão fosco e folhelho carbonoso, contendo intercalações de pequenas camadas de siltito e argilito e, disseminados, ainda aparecem concreções de calcário. Um perfil típico dessa camada pode ser visto na Figura 2.

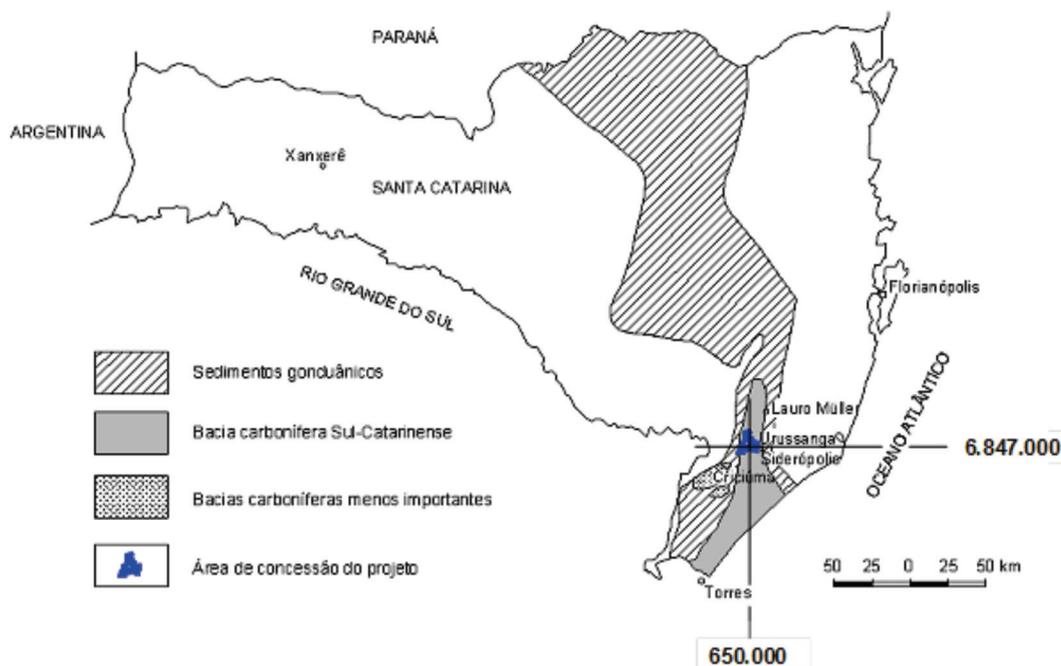


Figura 1 – Mapa de localização com a indicação, em azul, da área de concessão da Mina Fontanella (adaptado de Costa 2000)

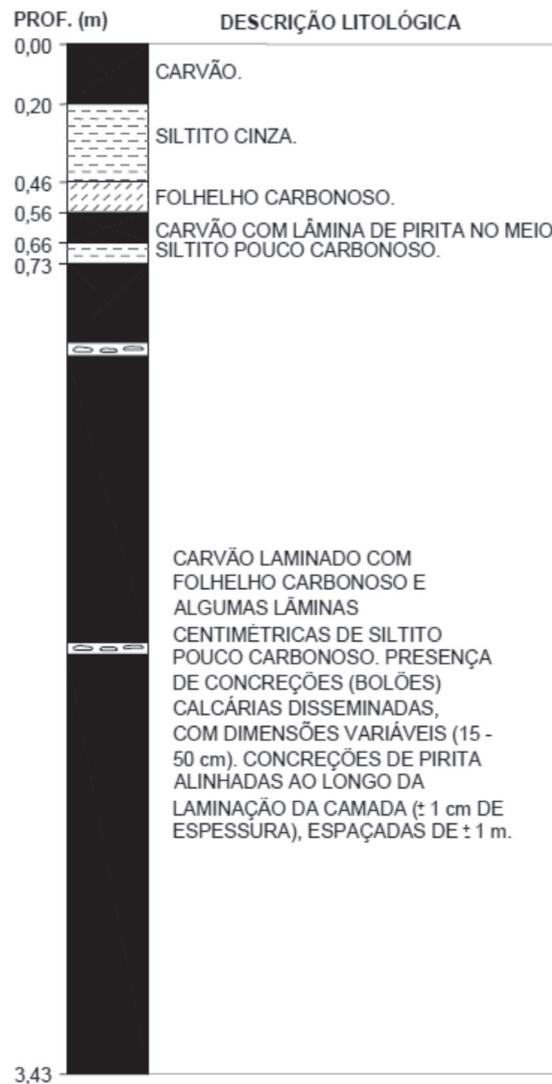


Figura 2 - Perfil típico da camada de carvão Bonito Inferior) na Mina Fontanella

3.2 Aspectos estruturais da camada de carvão Bonito na Mina Fontanella

Estruturalmente a jazida da Mina Fontanella apresenta um conjunto de falhas e intrusões de diques de diabásio com diferentes orientações, como mostra a Figura 3. Estas estruturas foram observadas *in situ* durante as atividades de lavra

na camada de carvão Barro Branco da Mina Esperança. Na sua maior parte, as estruturas se repetem na Mina Fontanella, que se desenvolve na camada de carvão Bonito cerca de 70 metros abaixo. São observadas duas orientações preferenciais para cada uma das estruturas.

As falhas identificadas são normais com orientações preferenciais para N20-45°E e N20-50°W e rejeitos de centímetros até mais de uma dezena de metros. Os diques de diabásio possuem espessuras variáveis de alguns centímetros até cerca de 1 m, com persistências de vários quilômetros. Estão orientados preferencialmente com direções N20°-40°E e N65°W-EW, apresentando um forte controle de posicionamento associado a falhas normais.

4 MAPEAMENTO DAS DESCONTINUIDADES NA CAMADA DE CARVÃO BONITO

A técnica adotada na Mina Fontanella foi o mapeamento das fraturas em janelas na parede dos pilares, de acordo com os procedimentos reconhecidos internacionalmente (ISRM 1978, Priest & Hudson 1976). Os instrumentos utilizados consistiram de uma bússola e uma trena flexível de 50 metros para a definição da linha de referência na janela. Em todos os locais de levantamento foram definidas janelas na direção do avanço da lavra - **galerias** e na direção perpendicular às galerias - **travessões**, com comprimento equivalente à dimensão do lado do pilar e altura igual à espessura da camada minerada no local mapeado (entre 3,0 m e 3,4 m). No período entre 2003 e 2011 foram mapeados nove locais em quatro diferentes zonas de amostragem da mina, conforme indicado na Figura 3, assim identificados: Zona 1 - locais P1 e P4 - Eixo 6NW; Zona 2 - locais P2 e P3 - Eixo 7SW; Zona 3 - locais E1 e E2 - Eixo 8NW e Zona 4 - locais E1, E2 e E3 - Eixo 9NW.

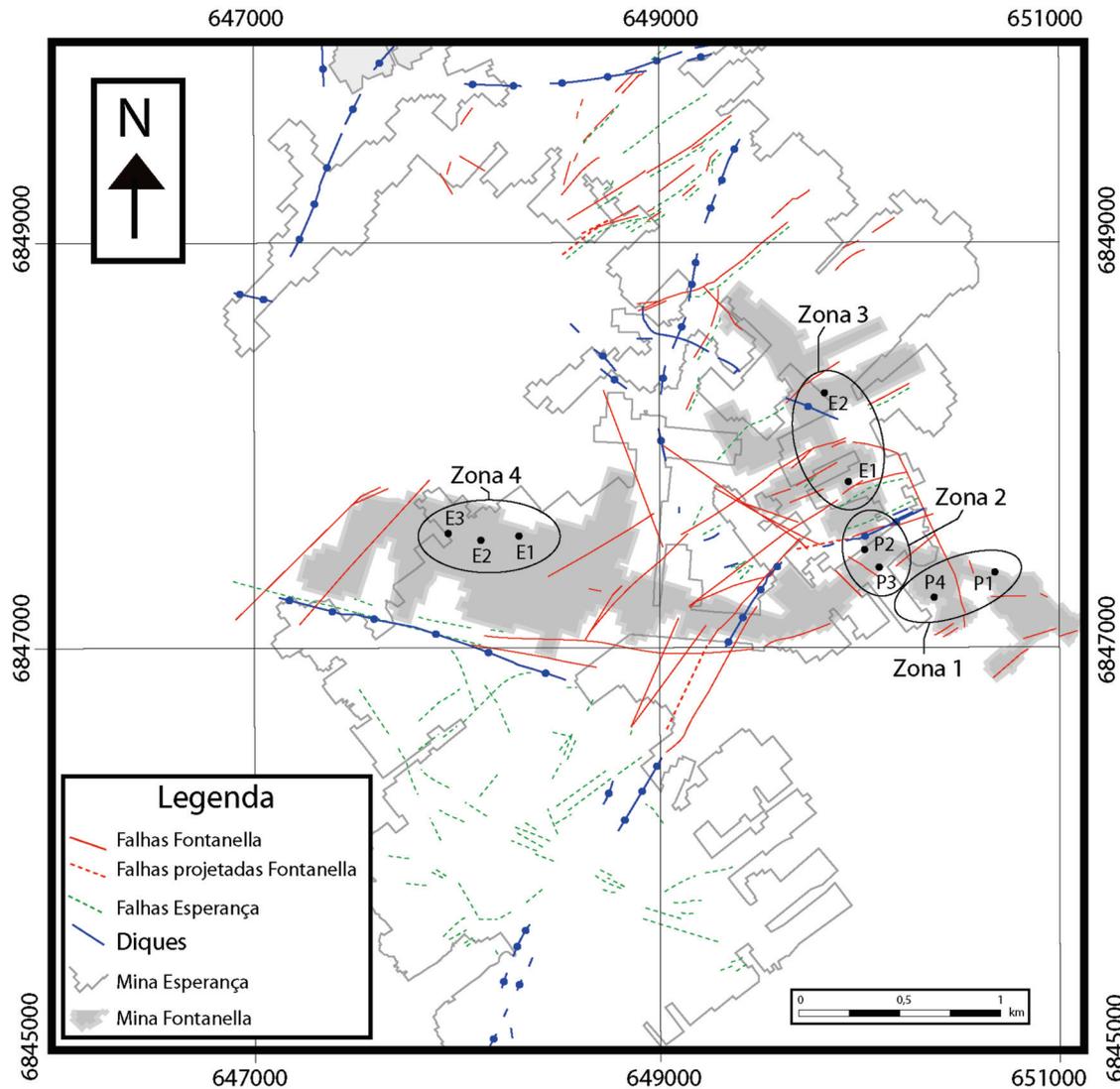


Figura 3 – Estruturas geológicas presentes na Mina Fontanella e localização dos pontos de mapeamento estrutural na camada de carvão (adaptado de Zorzi et al., 2012)

As Zonas 1 e 2 foram mapeadas por ocasião da coleta de amostras da camada de carvão para ensaios em laboratório, visando a determinação da constante característica da camada de carvão Bonito na Mina Fontanella (GONZATTI, 2007), enquanto as Zonas 3 e 4 foram objeto de estudo durante as atividades de instrumentação e monitoramento de tensões nos pilares ao longo dos Eixos 8NW e 9NW (ZORZI et al., 2012).

A Tabela 1 apresenta uma síntese dos dados quantitativos realizados nos levantamentos das descontinuidades na camada de carvão. Para a execução dos mapeamentos foram adotados os seguintes procedimentos:

a. determinação da orientação da linha de referência na meia altura do pilar;

- b. identificação de todas as fraturas com persistência superior a 0,5 m. Esse comprimento de corte foi adotado para filtrar fraturas tipo “cleats”, que estão presentes em toda a mina, e as fraturas não naturais, normalmente provocadas pelo desmonte da rocha por explosivos;
- c. determinação da posição da descontinuidade na linha de referência na janela. As descontinuidades que não atravessavam a linha de referência foram projetadas até a mesma e mapeadas normalmente;
- d. determinação do “rumo do mergulho” (0 a 360°) e do “mergulho” (0 a 90°) da descontinuidade, além das suas características, como persistência, rugosidade, resistência das paredes da fratura, condições de umidade e alteração das paredes, abertura e preenchimentos.

Tabela 1 – Síntese dos quantitativos de mapeamento estrutural realizados na camada de carvão Bonito, nos diferentes eixos de desenvolvimento na Mina Fontanella.

Zona de mapeamento	Identificação do local de mapeamento	Somatório dos comprimentos das linhas no local (m)	Área total das janelas no local (m ²)	Número de fraturas mapeadas no local
Zona 1	P1 - Eixo 6NW	73	248	69
	P4 - Eixo 6NW	67	229	79
	Totais	140	477	148
Zona 2	P2 - Eixo 7SW	74	228	54
	P3 - Eixo 7SW	83	249	64
	Totais	157	478	118
Zona 3	E1 - Eixo 8NW	72	245	28
	E2 - Eixo 8NW	80	272	56
	Totais	152	516	84
Zona 4	E1 - Eixo 9NW	74	244	72
	E2 - Eixo 9NW	75	248	69
	E3 - Eixo 9NW	81	268	66
	Totais	230	760	207

Nota 1: E1, E2, ...P1, P2, ... = locais de levantamento 1, 2, ...

Nota 2: Altura da galeria: variável entre 3,0m e 3,4m.

4.1 Tratamento estatístico dos dados e resultados obtidos

4.1.1 Orientação das principais famílias de fraturas

As medidas de orientação das fraturas foram tratadas estatisticamente fazendo-se uso de projeção estereográfica com o auxílio do software Stereo32, versão 1.0.3. Para a identificação das principais famílias de fraturas foram utilizados diagramas de rosetas, diagramas de polos e de isodensidade de polos.

Os dados obtidos em dois locais onde foram realizados mapeamentos das fraturas, em duas diferentes zonas da mina, são utilizados para detalhar os procedimentos de análise. Os dados levantados em campo são apresentados no conjunto de diagramas das Figuras 4 e 5, respectivamente para os locais de mapeamento P1-6NW da Zona 1 e E1-9NW da Zona 4. A sistemática de análise adotada para cada local de mapeamento consistiu na visualização em diagramas de polos da orientação de todos os planos de fratura mapeados num determinado local (Figuras 4a e 5a), observação dos rumos de mergulho predominantes no diagrama de rosetas e a identificação das principais famílias nas regiões de maior densidade de

polos no diagrama de isodensidades (Figuras 4b e 5b). A definição da orientação das principais famílias foi feita adotando-se os seguintes critérios quali-quantitativos:

- traçado de um cone de influência de 15°, normalmente centrado nas zonas de concentração de polos superior a 1,5%. Adicionalmente, a orientação da família deveria representar pelo menos 10% das medidas levantadas no campo. Em alguns casos, no entanto, as famílias foram definidas mesmo representando menos de 10% das medidas realizadas. Isso ocorreu quando a frequência de uma determinada família era muito superior às demais. Nessas situações, a família “pouco expressiva” normalmente representava a variação da orientação de alguma família representada por mais de 10% das medidas;
- quando os procedimentos estatísticos não foram suficientes, a experiência adquirida ao longo dos 10 anos de mapeamento e a observação *in situ* de problemas de ruptura sobre determinadas famílias de descontinuidades, foram fundamentais para a definição de quais famílias deveriam representar as descontinuidades mapeadas em determinada zona da mina.

Esse procedimento permitiu a identificação das principais famílias, ou variações de orienta-

ção de uma mesma família, em cada local de mapeamento, cujo número variou entre 2 e 6 famílias. Os resultados obtidos nos levantamentos nos 9 locais de amostragem são apresentados na

Tabela 2 e individualizados por local de levantamento. O passo seguinte foi a avaliação dos resultados considerando os dados agrupados por zona da mina.

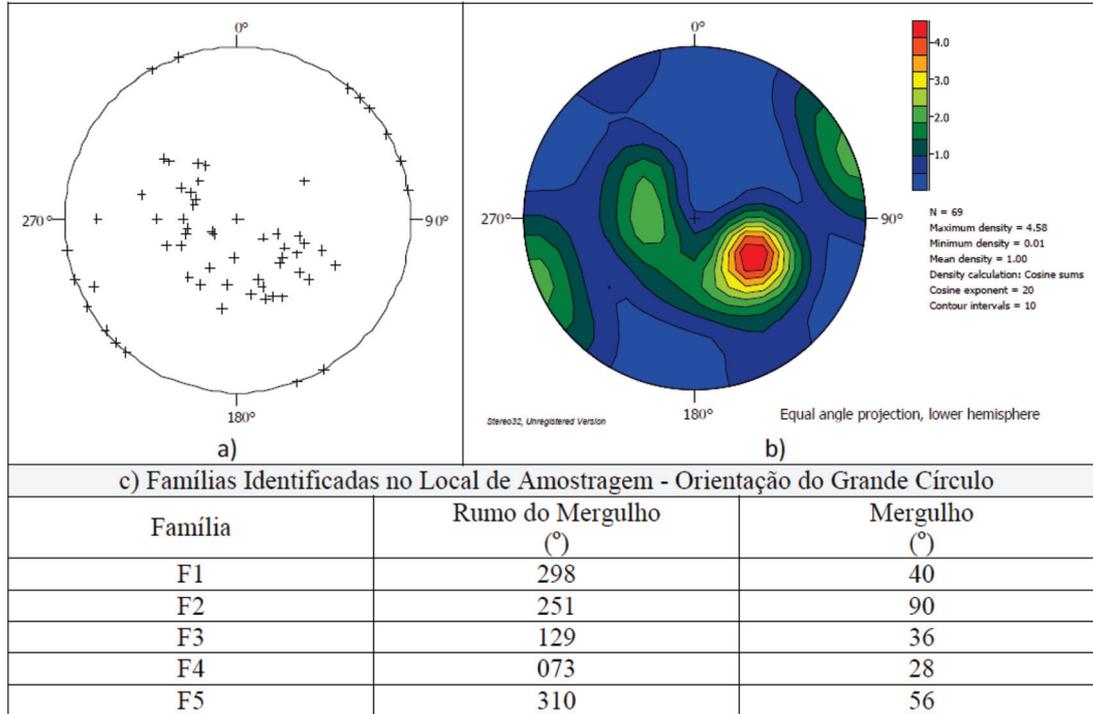


Figura 4 - Tratamento dos dados para a identificação das principais famílias de fraturas no local P1 - Eixo 6NW- Zona 1. a) Diagramas de polos de todas as discontinuidades mapeadas no local; b) Diagrama de isodensidade de polos; c) Orientação das principais famílias de fraturas

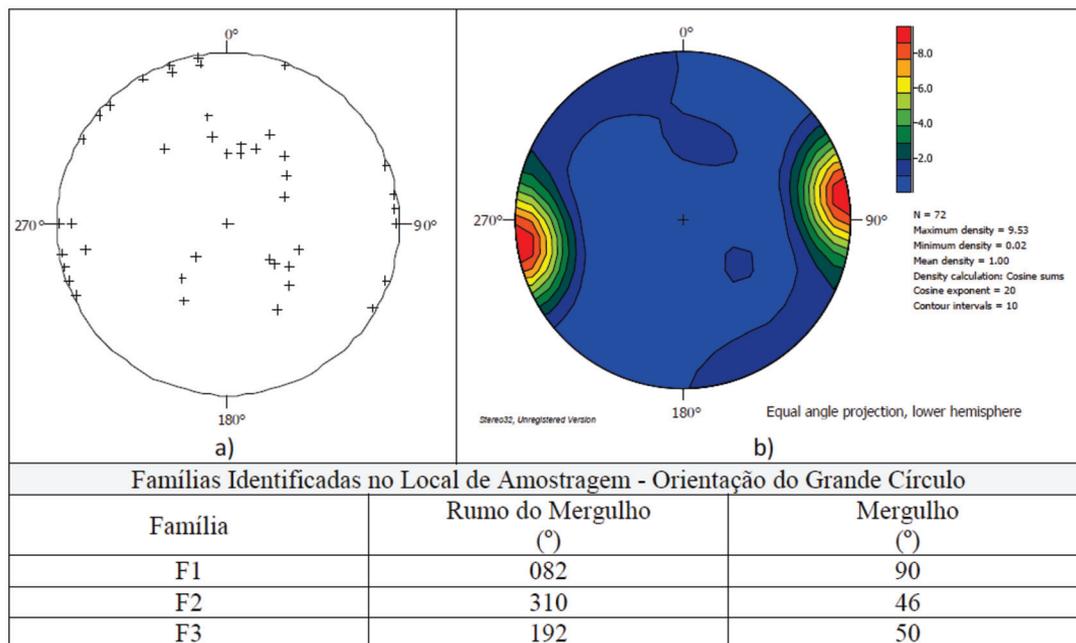


Figura 5 - Tratamento dos dados para a identificação das principais famílias de fraturas no local E1 - Eixo 9NW- Zona 4. a) Diagramas de polos de todas as discontinuidades mapeadas no local; b) Diagrama de isodensidade de polos; c) Orientação das principais famílias de fraturas

Tabela 2 – Síntese das orientações das famílias de discontinuidades mapeadas nos nove locais distribuídos nas quatro zonas de estudo na camada de carvão Bonito da Mina Fontanella.

Zona de amostragem	Local de mapeamento	Família	Rumo do Mergulho (°)	Mergulho (°)
Zona 1	P1 - Eixo 6NW	F1	298	40
		F2	251	90
		F3	129	36
		F4	073	28
		F5	310	56
	P4 - Eixo 6NW	F1	146	54
		F2	111	51
		F3	084	88
		F4	273	83
		F5	261	51
Zona 2	P2 - Eixo 7SW	F6	303	43
		F1	133	41
		F2	357	83
		F3	356	42
		F4	262	57
	P3 - Eixo 7SW	F5	200	44
		F1	171	45
		F2	179	89
		F3	347	43
		F4	275	42
Zona 3	E1 - Eixo 8NW	F1	192	88
		F2	337	43
		F3	138	39
	E2 - Eixo 8NW	F1	024	37
		F2	300	68
		F3	111	34
Zona 4	E1 - Eixo 9NW	F1	082	90
		F2	310	46
		F3	192	50
	E2 - Eixo 9NW	F1	080	90
		F2	322	54
		F3	142	72
E3 - Eixo 9NW	F1	080	90	
	F2	007	49	
	F3	142	72	

Para fins práticos, o número de famílias de fraturas em cada zona de estudo foi limitado a três, cujas orientações médias são denominadas de “representativas” da zona mapeada. Os resultados podem ser vistos nos diagramas das Figuras 6, 7, 8 e 9. Nesse processo, além das técnicas estatísticas, em algumas situações foi necessário simplificar o processo de definição das famílias representativas. É o caso da Zona 2, onde observou-se que as

famílias F2 e F3 se fazem presentes com orientações semelhantes nos dois locais mapeados (ver resultados de P2 e P3-Eixo 7SW na Tabela 2); no entanto, possuem ângulos de mergulho diferentes, entre 40° e 90° aproximadamente. Optou-se por definir uma família representativa nesta zona (F2m na Figura 7) com um valor de mergulho intermediário, por se tratar de uma inclinação mais desfavorável do ponto de vista mecânico quando

se avalia qualitativamente a resistência do pilar. Procedimento análogo foi adotado no tratamento das fraturas mapeadas na Zona 3, onde se observa que a família F1 possui orientação semelhante nos dois locais mapeados, porém com mergulhos na faixa entre 40° a 90° (ver resultados de E1 e E2-Eixo 8NW na Tabela 2 e família F1m na Figura 8). De outra parte, para ilustrar a importância do mergulho das discontinuidades e os reflexos negativos na estabilidade da periferia dos pilares, a Figura 10a mostra a família de fraturas verticais, enquanto

na Figura 10b pode ser vista uma das famílias que possuem mergulho na faixa entre 40° e 60°. Nesta última, a fratura aflora num dos vértices do pilar e configura uma geometria em que cinematicamente é possível a movimentação do bloco entre o plano de fratura e o teto, com a consequente diminuição da área resistiva do pilar. Nos gráficos da Figura 11, por sua vez, é possível observar a distribuição acumulada dos ângulos de mergulho das discontinuidades mapeadas em cada um dos nove locais, nas quatro zonas da mina.

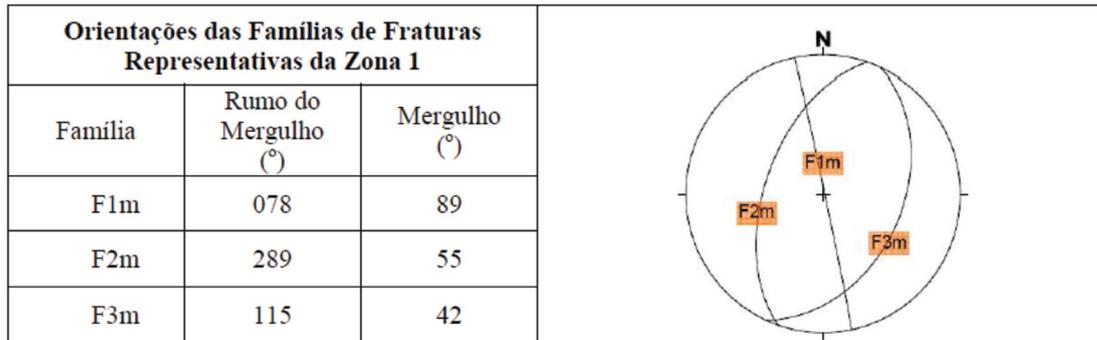


Figura 6 - Famílias de fraturas observadas na Zona 1 de mapeamento - locais P1 e P4 - Eixo 6NW. Representação dos grandes círculos em projeção estereográfica no hemisfério inferior

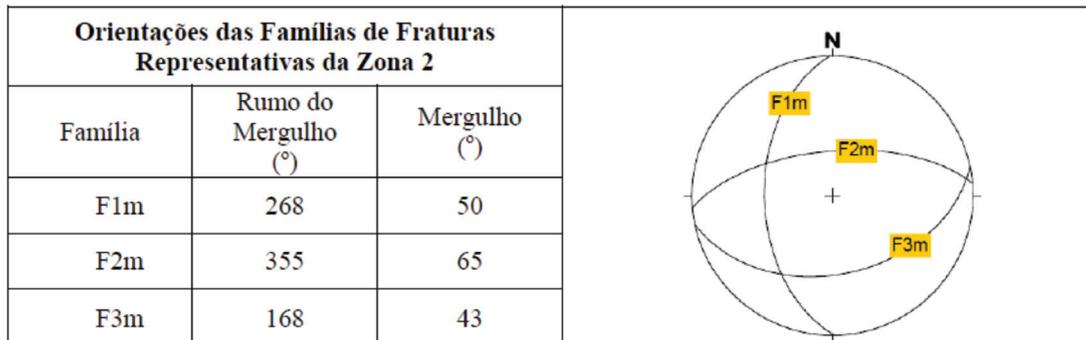


Figura 7 - Famílias de fraturas observadas na Zona 2 de mapeamento - locais P2 e P3 - Eixo 7SW. Representação dos grandes círculos em projeção estereográfica no hemisfério inferior

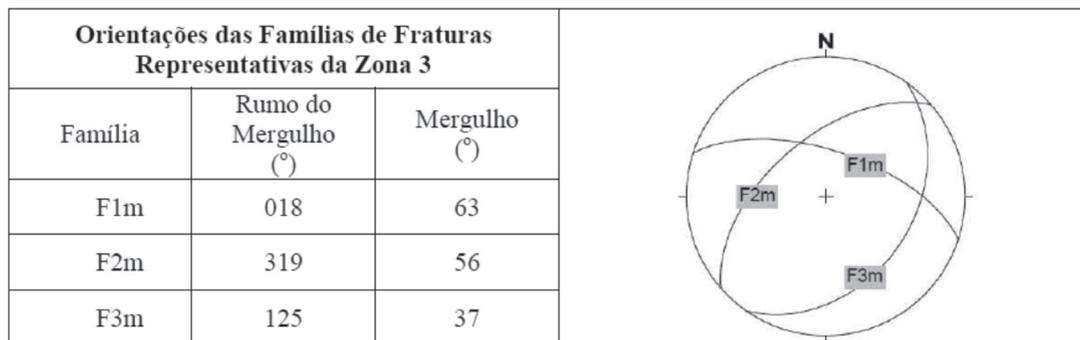


Figura 8 - Famílias de fraturas observadas na Zona 3 de mapeamento - locais E1 e E2 - Eixo 8NW. Representação dos grandes círculos em projeção estereográfica no hemisfério inferior

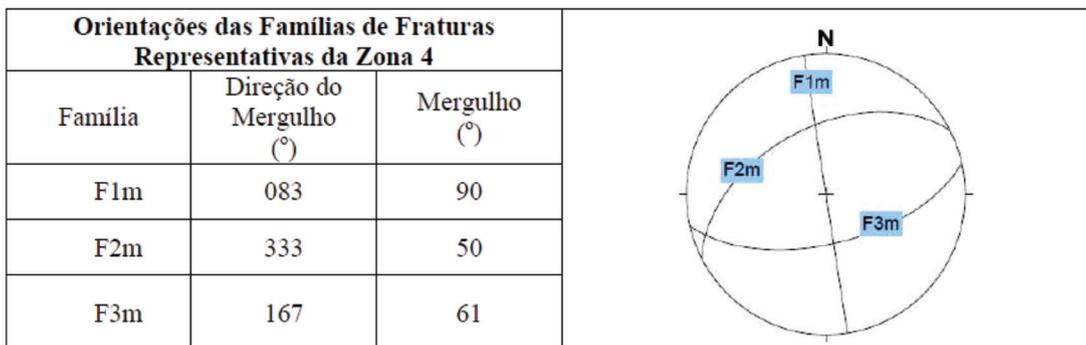


Figura 9 - Famílias de fraturas observadas na Zona 4 de mapeamento - locais E1, E2 e E3 - Eixo 9NW. Representação dos grandes círculos em projeção estereográfica no hemisfério inferior



Figura 10 - a) Plano de fratura vertical preenchido por carbonato na família de fraturas com maior frequência na camada de carvão Bonito, na Zona 4 - Eixo 9NW; b) Plano de fratura típico das famílias com mergulho na faixa entre 40° e 60° presentes nos diferentes locais de mapeamento da mina

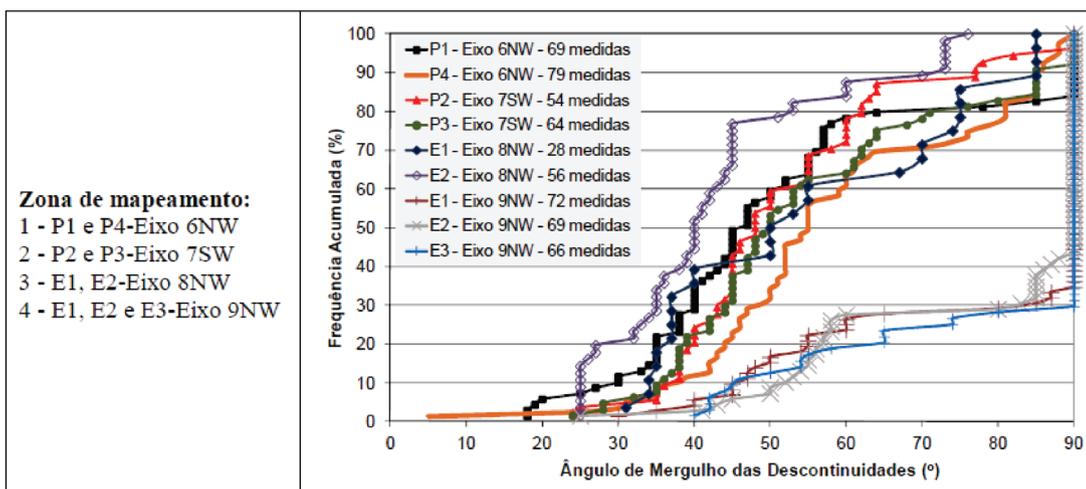


Figura 11 - Frequência acumulada do ângulo de mergulho das descontinuidades mapeadas nos diferentes locais das 4 zonas de amostragem na camada de carvão Bonito na Mina Fontanella

4.1.2 Espaçamento entre fraturas

A determinação do espaçamento entre fraturas foi feita adotando-se duas técnicas, conforme definido por Priest (1993):

- **espaçamento normal** de uma família: corresponde à distância entre duas fraturas pertencentes a uma mesma família, medida ao longo de uma linha normal aos planos das fraturas;

- **espaçamento total:** corresponde à distância entre duas fraturas quaisquer adjacentes, medida ao longo da linha de levantamento, independente da orientação da linha de levantamento e do plano da fratura. Essa medida considera todas as fraturas como pertencentes a uma mesma família.

Espaçamento normal

Na prática, o processo de estimativa do espaçamento normal de uma família é mais trabalhoso que o necessário para a determinação do espaçamento total, porque requer previamente a identificação das famílias e definição da sua orientação média. Durante os levantamentos, as distâncias medidas não necessariamente são feitas na direção normal aos planos das fraturas. Tal condição torna necessária a correção da distância medida ao longo da linha levando em consideração, tanto a orientação da linha de levantamento (rumo e inclinação), como a orientação dos planos das descontinuidades. A seguinte função matemática adotada para o cálculo da distância normal entre duas fraturas adjacentes de uma mesma família, considerando linhas de levantamento aproximadamente horizontais:

$$x_n = x_i * \text{sen}(\psi_p) * \text{abs}(\cos(\alpha_p - \alpha_l)) \quad (1)$$

onde:

x_n = distância corrigida para a direção normal entre duas fraturas adjacentes de uma mesma família (m);

x_i = distância medida entre duas fraturas adjacentes de uma mesma família ao longo da linha de levantamento (m);

ψ_p = mergulho do plano da descontinuidade da família em análise ($^\circ$);

α_p = rumo do mergulho do plano da descontinuidade da família em análise ($^\circ$);

α_l = rumo do mergulho da linha de levantamento ($^\circ$).

Já o espaçamento normal (e_n) da família foi calculado com base na seguinte equação:

$$e_n = \frac{\sum x_n}{N - 1} \quad (2)$$

onde:

e_n = espaçamento normal médio da família de fraturas (m);
 N = número de fraturas mapeadas na linha de levantamento.

O cálculo do espaçamento normal médio das famílias foi feito separadamente para cada linha de levantamento. Tal procedimento teve como resultado valores diferentes para uma mesma família num mesmo local. Isso se deve ao número variável de observações realizadas em cada linha de levantamento para uma determinada família de fraturas. Em algumas linhas de mapeamento, notadamente, o número de medidas foi pequeno e, portanto, pouco representativo estatisticamente. Na Tabela 3 é apresentada a síntese dos resultados de espaçamento normal determinado para as famílias de descontinuidades identificadas nos diferentes locais de levantamento.

Espaçamento total

Para a estimativa do espaçamento total médio (e_t) e da sua recíproca, a frequência total média de fraturas por metro (l_v), o procedimento adotado considerou as seguintes condições: - todas as linhas de levantamento de determinado local agrupadas, independente da orientação das linhas e; - todas as fraturas sem fazer distinção entre famílias. Na prática, todas as fraturas mapeadas nas duas ou mais linhas de levantamento num mesmo local são consideradas como pertencentes a uma "única" linha e a uma "única" família. Desta forma, as linhas de levantamento podem ser consideradas longas comparadas com o espaçamento total médio entre fraturas. O cálculo foi feito com base na seguinte expressão e os resultados apresentados na Tabela 4:

$$e_t = \frac{\sum x_i}{N - 1} \quad (3)$$

onde: e_t = espaçamento total entre fraturas (m);

x_i = distância medida entre duas fraturas adjacentes ao longo da linha de levantamento (m);

N = número de fraturas mapeadas na linha de levantamento.

A recíproca do espaçamento, a frequência total de fraturas por metro (λ_t), foi calculada com base na expressão proposta por Priest & Hudson (1981):

$$\lambda_t = \frac{1}{e_t} \quad (4)$$

Uma alternativa simplificada para a determinação da frequência total é a expressão:

$$\lambda_t = \frac{N}{l} \quad (5)$$

onde: l = comprimento total da linha de levantamento (m);

Ressalta-se, no entanto, que a expressão 5 é aplicável quando as linhas de levantamento forem relativamente longas (cerca de 50 m, no caso da Mina Fontanella) e as distâncias das fraturas mais próximas do início e do final da linha forem pequenas. Nessas condições, os resultados são semelhantes aos obtidos pela expressão 4. Outro aspecto é o número mínimo de medidas necessário para determinar o espaçamento médio com um nível de confiança aceitável. Quando o comprimento das linhas de levantamento é limitado por dimensões reduzidas dos lados dos pilares, mais de uma face de pilar numa mesma direção deverá ser mapeada para que se atinja um número razoável de medidas de fraturas e resultados representativos para o espaçamento médio.

Tabela 3 - Síntese dos valores de espaçamento normal observados para as diferentes famílias de descontinuidades mapeadas na camada de carvão Bonito na Mina Fontanella.

Zona de amostragem	Local de mapeamento	Família	Espaçamento normal médio, e_n (m)	
Zona 1	P1 - Eixo 6NW	(F1 + F5)	0,46 a 2,18	
		F2	0,29 a 4,63	
		(F3 + F4)	0,20 a 1,16	
	P4 - Eixo 6NW	(F1 + F2)	0,47 a 1,96	
		F3	0,65 a 2,59	
		(F4 + F5 + F6)	0,65 a 2,55	
Zona 2	P2 - Eixo 7SW	F1 + F5	0,64 a 1,47	
		F2 + F3	0,21 a 2,34	
		F4	0,37 a 1,97	
	P3 - Eixo 7SW	F1	0,54 a 1,43	
		F2 + F4	0,58 a 1,34	
		F3	0,36 a 0,54	
Zona 3	E1 - Eixo 8NW	F1	0,21 a 1,28	
		F2	1,84	
		F3	2,38	
	E2 - Eixo 8NW	F1	0,51 a 1,34	
		F2	0,41 a 2,65	
		F3	0,81 a 4,47	
Zona 4	E1 - Eixo 9NW	F1	0,94 a 1,06	
		F2	3,01	
		F3	2,60 a 2,68	
	E2 - Eixo 9NW	F1	0,91 a 1,50	
			F2	2,90
	E3 - Eixo 9NW	F1	0,73 a 1,60	
		F2	2,78 a 3,02	
		F3	1,95	

Tabela 4 – Síntese dos valores de espaçamento total e frequência de fraturas calculados para os diferentes locais de mapeamento na camada de carvão Bonito, nas quatro zonas de amostragem da Mina Fontanella.

Zona de amostragem	Local de mapeamento	Espaçamento total médio, e_t (m)		Frequência total média λ_t (fraturas/m)	
Zona 1	P1 - Eixo 6NW	0,98	0,81	1,02	1,12
	P4 - Eixo 6NW	0,73		1,37	
Zona 2	P2 - Eixo 7SW	1,16	1,20	0,86	0,83
	P3 - Eixo 7SW	1,23		0,81	
Zona 3	E1 - Eixo 8NW	2,32	1,67	0,43	0,60
	E2 - Eixo 8NW	1,33		0,75	
Zona 4	E1 - Eixo 9NW	1,03	1,13	0,97	0,89
	E2 - Eixo 9NW	1,10		0,91	
	E3 - Eixo 9NW	1,27		0,79	

Os gráficos da Figura 12 mostram a variação do espaçamento total (média móvel) à medida que aumenta o número de medidas realizadas. Em praticamente todos os locais de levantamento são necessárias entre 40 e 50 medidas, no mínimo, para a determinação adequada do espaçamento total entre fraturas. Como regra, os valores de espaçamento total obedecem a uma distribuição de probabilidade exponencial negativa do tipo $f(x_i) = \lambda_i * e^{-\lambda_i * x_i}$, que foi observada avaliando os espaçamentos, tanto individualmente por local de levantamento, como agrupados dentro de uma mesma zona, como mostram os resultados para a Zona 4, expressos na Figura 13.

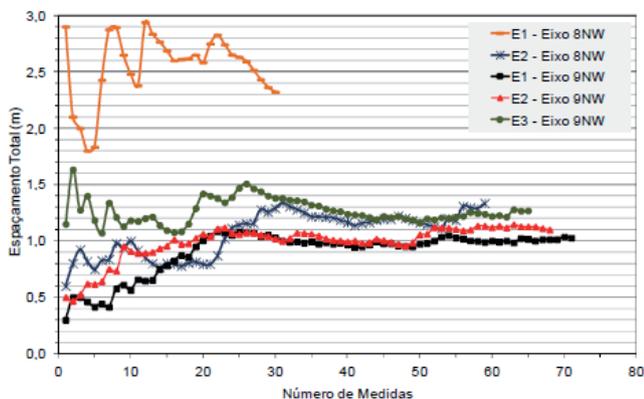


Figura 12 – Variação da média móvel do espaçamento total das fraturas em função do número de medidas realizadas durante os levantamentos na Zona 3 (E1, E2-Eixo 8NW) e na Zona 4 (E1, E2, E3-Eixo 9NW)

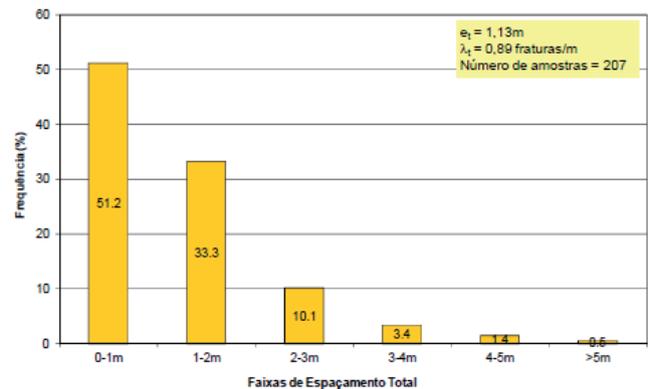


Figura 13 – Distribuição típica das faixas de espaçamento total de fraturas observada na camada de carvão Bonito na Zona 4 - Locais agrupados (E1 + E2 + E3-Eixo 9NW)

4.1.3 Persistência das fraturas

A análise dos dados de persistência das fraturas foi feita por faixa de comprimentos, de acordo com as classes estabelecidas pela ISRM (1978). Todas as descontinuidades mapeadas, nos diferentes locais, enquadram-se entre as classes de persistência muito baixa a média. Observou-se, também, que a cada classe estão associados aspectos como orientação predominante das fraturas e posição na camada de carvão, conforme segue:

- Classe 1 - persistência <1 metro: descontinuidades localizadas aleatoriamente na camada de carvão;
- Classe 2 - persistência entre 1 e 3 metros: são descontinuidades localizadas na metade

inferior ou na metade superior da camada de carvão, com ângulos de mergulho na faixa entre 40° e 60°. Quando atravessam toda a camada de carvão possuem inclinação vertical ou subvertical;

- Classe 3 - persistência >3 metros: descontinuidades que atravessam toda a camada, em

geral possuem ângulos de mergulho na faixa entre 40° e 60°.

Os dados foram tratados individualmente por local de mapeamento, em cada uma das quatro zonas de amostragem. Os resultados são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Síntese das persistências das fraturas, distribuídas por faixa de persistência, das descontinuidades mapeadas na camada de carvão Bonito na Mina Fontanella.

Zona de amostragem	Local de mapeamento	Faixa de Persistência (m)	Número de fraturas	Proporção (%)
Zona 1	P1 - Eixo 6NW P4 - Eixo 6NW	<1	144	35,4
		Entre 1 e 3		38,9
		>3		25,7
Zona 2	P1 - Eixo 7SW P2 - Eixo 7SW	<1	117	17,1
		Entre 1 e 3		41,9
		>3		41,0
Zona 3	E1 - Eixo 8NW E2 - Eixo 8NW	<1	84	54,8
		Entre 1 e 3		31,0
		>3		14,3
Zona 4	E1 - Eixo 9NW E2 - Eixo 9NW E3 - Eixo 9NW	<1	205	48,8
		Entre 1 e 3		36,6
		>3		14,6

4.1.4 Características dos contatos entre os planos das fraturas

As fraturas apresentam características de alteração, resistência, abertura, preenchimento e umidade semelhante nos diferentes locais mapeados das quatro zonas de amostragem na mina.

Em todas as áreas de estudo, as fraturas apresentam superfícies de moderadamente a levemente rugosa, podendo ser classificadas como “onduladas lisas” com JRC - Joint Roughness Coefficient estimado entre 2 e 4, conforme padrões sugeridos pela ISRM (1978). O grau de alteração varia de “sem alteração” a “levemente alterada” e por consequência, as paredes das descontinuidades possuem resistência semelhante à da rocha intacta. Via de regra, as descontinuidades estão fechadas ou possuem abertura menor que 1 mm. Normalmente não possuem preenchimento, porém, quando preenchidas, o material apresenta-se bastante oxidado. Nos locais de mapeamento na Zona 4 foram

observados preenchimentos das fraturas verticais por veios de carbonato, com espessuras de até 10 mm. Não foi observada a presença de água em nenhuma das quatro zonas de amostragem da Mina Fontanella.

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A avaliação dos dados estruturais mostra a presença sistemática de pelo menos três famílias de descontinuidades em todas as zonas amostradas da mina. A observação dos diagramas representativos das atitudes espaciais das fraturas coletadas indica a presença de mais de um conjugado de fraturas de cisalhamento (fraturas tipo R e R', segundo o modelo clássico de Riedel). Estes conjugados se caracterizam por fraturas com relações angulares da ordem de 60° e com disposição aproximadamente subvertical. O arcabouço estrutural geral da área indica a presença de falhas normais, sugerindo que estes conjugados de

fraturas de cisalhamento possam estar relacionados com falhas extensionais de direção N10-20°E (Figura 6), N80°E (Figura 7), N50°E (Figura 8) e N70°E (Figura 9). Em quase todos os casos observam-se fraturas isoladas com disposição aproximadamente ortogonais ao sistema de fraturas de cisalhamento, podendo representar fraturas de cisalhamento secundárias (fraturas tipo X e/ou P).

A análise da distribuição dos ângulos de mergulho das fraturas mostra que as Zonas 1, 2 e 3 possuem distribuições semelhantes (Figura 11), porém, diferentes da Zona 4. Observa-se que as descontinuidades inclinadas, especialmente aquelas na faixa de mergulho intermediária, entre 40° e 60°, estão presentes em todas as zonas mapeadas, em maior ou menor proporção. No entanto, na Zona 4 é notável a quase ausência de fraturas inclinadas frente ao predomínio (~70%) da família de descontinuidades com mergulho vertical ou subvertical.

No que se refere ao parâmetro persistência, chama-se a atenção para as descontinuidades classificadas como de persistência média (>3 metros), por se tratarem de fraturas inclinadas que atravessam toda a camada de carvão Bonito e tem ocasionado os maiores problemas na estabilidade na periferia dos pilares na mina. Nas Zonas 1 e 2 a presença de fraturas com persistência superior a 3 metros é considerável (entre 26% e 41%) comparado com o observado nas Zonas 3 e 4 em que as persistências maiores (>3 metros) estão presentes em proporções bem menores (cerca de 14%).

Após uma década de observações nos pilares da camada Bonito na Mina Fontanella, nota-se que fraturas mais persistentes tendem a afetar o pilar localmente, especialmente quando mergulham para dentro das galerias. Esses casos são identificados na mina em locais onde ocorreram deslizamentos de blocos das paredes ou dos vértices dos pilares (Figura 10b), produzindo como consequência a redução da área resistiva do pilar. Provavelmente, devido a baixa frequência das fraturas com persistência maior que 3 metros, as Zonas 3 e 4 praticamente não apresentam problemas dessa natureza, enquanto na Zona 1 e, especialmente, na Zona 2 esses problemas são mais evidentes. Por seu lado, as fraturas menos persistentes, mas quando presentes em frequências maiores que as fraturas mais persistentes, tendem a afetar a resistência da

camada globalmente e, por consequência, a constante da camada. Em laboratório esse comportamento foi constatado a partir da observação do baixíssimo rendimento na preparação dos corpos de prova e na própria resistência à compressão uniaxial das amostras de carvão procedentes do local P4-Eixo 6NW na Zona 1 (GONZATTI, 2007). Trata-se de um dos 4 locais nas Zonas 1 e 2 que foi objeto de estudos em laboratório com amostras de carvão, visando a determinação da resistência *in situ* da camada. Vale ressaltar o fato de que no local P4-Eixo 6NW foram observados os menores espaçamentos totais (maior frequência de fraturas por metro) e uma proporção considerável de fraturas com persistência menores que 3 m (cerca de 74%).

O parâmetro frequência total média de fraturas por metro mostra relativa diferença entre os locais mapeados nas diferentes zonas da Mina Fontanella. Os resultados da Tabela 4 indicam que os locais P1 e P4 mapeados no Eixo 6NW da Zona 1 estão entre os de maior frequência de fraturas por metro ($\lambda_t = 1$ a 1,4 fraturas/metro), enquanto as demais zonas estudadas apresentam as menores frequências ($\lambda_t = 0,4$ a 1,0 fraturas/metro). É importante destacar que na Zona 4, que registra maior frequência que as Zonas 2 e 3, as fraturas predominantes são verticais, normalmente menos danosas para a resistência dos pilares, global e localmente.

Tendo como parâmetros base a frequência total por metro e o mergulho predominante das fraturas, é possível estabelecer uma hierarquia de qualidade entre as zonas de amostragem, conforme mostrado na Tabela 6. Nesta tabela são apresentadas, também, as estimativas de resistência para a camada Bonito definidas a partir de um conjunto de ensaios de laboratório com amostras procedentes das Zonas 1 e 2 e medidas de velocidade de propagação de ondas *in situ* com o emprego de sísmica de refração. A incorporação de novas informações sobre a resistência do carvão da camada Bonito, nas zonas amostradas e em novas áreas a serem mineradas na mina, podem ser extremamente úteis para a consolidação e/ou modificação dos valores de resistência *in situ* estimados até então para a camada de carvão Bonito na Mina Fontanella.

Tabela 6 – Hierarquia de qualidade da camada de carvão Bonito nas diferentes zonas estudadas na Mina Fontanella, baseada na frequência total de fraturas por metro.

Zona de amostragem	Frequência total média, λ_i (fraturas/metro)	Qualidade estrutural da camada de carvão	Observações
Zona 1	1,12	Inferior	Resistência in situ estimada#: 4.8 MPa com base no estudo do efeito escala em laboratório. Predomínio de fraturas com mergulho entre 40° e 60°.
Zona 4	0,89	Intermediária	Predomínio de fraturas com mergulho vertical.
Zona 2	0,83	Superior	Resistência in situ estimada#: 6.5 MPa com base no estudo do efeito escala em laboratório. Predomínio de fraturas com mergulho entre 40° e 60°.
Zona 3	0,60	Superior	Predomínio de fraturas com mergulho entre 40° e 60°.

Fonte: Zorzi et al. (2006); Gonzatti (2007).

6 CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA DA CAMADA DE CARVÃO BONITO NA MINA FONTANELLA

Além da avaliação qualitativa da camada de carvão feita com base na abordagem individual das diferentes características estruturais mapeadas, os resultados obtidos possibilitaram a classificação geomecânica do maciço, considerando esses aspectos estruturais integrados. Para isso, foi utilizada a metodologia proposta por Kalamaras & Bieniawski (1995). Essa metodologia apresenta como principal característica o fato de ter sido desenvolvida especificamente para a classificação de maciços carbonosos, contemplando na sua concepção um modelo matemático para a estimativa da resistência *in situ* da camada a partir da determinação do índice RMR - Rock Mass Rating. Essa classificação se vale de cinco critérios: resistência da rocha intacta, RQD, características das descontinuidades, modo de deformabilidade dos estratos dentro da camada de carvão e a orientação das descontinuidades em relação à direção das escavações. O índice RMR corresponde ao somatório dos pesos obtidos nos cinco critérios.

O parâmetro RQD foi calculado com base na estimativa teórica, através da expressão $RQD_{teórico} = 100 * (1 - \lambda_i)$ (PRIEST e HUDSON, 1976) e válida para 1,£10 fraturas/m. Também foram utilizadas medidas de RQD de sondagens horizontais (RQD_{medido}) realizadas na camada de carvão nas Zonas 1 e 2. Nos seis furos realizados nessas duas zonas de amostragem, os resultados do RQD_{medido} são em média 31% menores que o $RQD_{teórico}$ (GONZATTI, 2007). O $RQD_{teórico}$ sempre maior decorre, provavelmente, da desconsideração,

durante o mapeamento, das fraturas com persistências menores que 0,5 m. Com isso, as frequências de fraturas por metro são menores que as observadas em sondagens, que incluem todo tipo de descontinuidades, inclusive os “cleats” presentes em todas as áreas e com características muito semelhantes. Para efeitos práticos, o RQD utilizado para a computação do índice RMR das Zonas 1 e 2 foi aquele medido nas sondagens, enquanto nas Zonas 3 e 4, onde não há sondagens horizontais, foi estimado da seguinte forma: $RQD(\%) = RQD_{teórico} - 30\%$.

A estimativa da resistência in situ (S_1) da camada de carvão foi feita com base na seguinte expressão proposta por Kalamaras & Bieniawski (1995):

$$S_1 = 0,5 * \frac{RMR_{camada} - 15}{85} * \sigma_c \quad (6)$$

onde: σ_c = resistência à compressão uniaxial de laboratório da rocha intacta (MPa);

$RMR_{camada} = \sum_{i=1}^5 P_{eso_i}$ = índice de classificação da camada de carvão.

Os pesos utilizados para cada um dos parâmetros da classificação nas quatro diferentes zonas amostradas na mina e a estimativa de resistência *in situ* para a camada de carvão Bonito, calculada de acordo com a equação 6, são apresentados na Tabela 7.

Os valores de S_1 obtidos para as Zonas 1 e 2 são coerentes com os valores 4,6 MPa e 6,5 MPa, respectivamente, obtidos a partir de ensaios de compressão uniaxial em cubos com dimensão do lado

entre 5 cm e 30 cm (ZORZI et al., 2006; GONZATTI, 2007). Para as Zonas 3 e 4 não há parâmetros de balizamento na mina, motivo pelo qual a utilização da classificação geomecânica pode se constituir numa ferramenta útil para a estimativa da resistência *in situ* durante o avanço da lavra nos eixos e painéis de produção em áreas distantes das Zonas 1 e 2.

6.1 Verificação do fator de segurança dos pilares nas diferentes zonas estudadas na Mina Fontanella

A avaliação do fator de segurança (FS) dos pilares existentes nas áreas estudadas foi feita

utilizando o método de dimensionamento de pilares da CIENTEC (ZORZI et al., 1991). A partir de 2005, o DNPM - Departamento Nacional da Produção Mineral tornou esse método oficial para o dimensionamento dos pilares nas minas de carvão do Brasil. Este método analítico utiliza como parâmetros de entrada as características geométricas e mecânicas da camada de carvão e encaixantes, além de fatores de correção da resistência do pilar em função do tempo de vida útil, método de desmonte e variação da esbelteza. O fator de segurança mínimo recomendado é de 1,3.

Tabela 7 – RMR da camada de carvão Bonito e estimativa da resistência *in situ* de acordo com a classificação geomecânica de Kalamaras e Bieniawski (1995).

Parâmetro da Classificação	Peso do Parâmetro em função da Zona de Amostragem na Mina Fontanella			
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
1- Resistência à compressão uniaxial	2	4	4	3
2- RQD	13	17	17	17
3- Condições das descontinuidades	22	22	22	22
4- Deformabilidade dos estratos	15	15	15	15
5- Ajuste em função da orientação das descontinuidades em relação à parede do pilar	-5	-5	-5	0
RMR _{camada}	47	53	53	57
Estimativa da Resistência In Situ da Camada Bonito				
σ_c (MPa)	22,69 [#]	28,87 [#]	28,87 ^{##}	24,81 ^{###}
S_1 (MPa)	4,27	6,45	6,45	6,13

[#] Resistência à compressão uniaxial média de cubos com lado entre 5 cm e 10 cm (ZORZI et al., 2006).

^{##} Equivalente aos resultados da zona mais próxima (Zona 2).

^{###} Resistência à compressão uniaxial média de seis corpos de prova cúbicos de 7 cm de lado.

Com base nos valores estimados para a resistência *in situ* da camada (S_1 na Tabela 7) e dos parâmetros geométricos dos pilares, mecânicos das encaixantes e operacionais de lavra para a conformação dos pilares, foram calculados os fatores de segurança. Com o intuito de avaliar a segurança para as condições mais críticas nessas diferentes áreas de estudo, utilizaram-se os parâmetros geométricos da camada de carvão mais desfavoráveis, ou seja, profundidades e alturas máximas observadas nas áreas analisadas. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 8.

A observação dos FS calculados para vida útil dos pilares no longo prazo ($F_t = 0,8$) mostra, como regra, valores acima do recomendado de 1,3. Esses valores são coerentes com as condições reais observadas nos diferentes locais estudados, ou seja, de plena estabilidade. A exceção verificada em um dos casos observados na Zona 1 ($FS = 1,23$) sugere que a estimativa da resistência *in situ* da camada esteja subestimada (a favor da segurança), já que os pilares naquele local continuam estáveis, mesmo após mais de 13 anos da sua execução.

Tabela 8 – Fatores de segurança calculados para os pilares executados na camada de carvão Bonito, utilizando a resistência in situ estimada para cada zona estudada na Mina Fontanella.

Zona de amostragem	H (m)	h (m)	W ₁ x W ₂ (m)	Fator de segurança		Observações
				Ft= 0.8	Ft= 1	
Zona 1 S ₁ = 4,27 MPa	83	3,40	15 x 29	1,76	2,20	Pilares com idades entre 13 e 16 anos, sem sinais aparentes de sobrecarga. Condições de segurança normais.
	120	3,40	20 x 20	1,23	1,53	
Zona 2 S ₁ = 6,45 MPa	127	3,10	18 x 22 [#]	1,64	2,05	Pilares com idade de 13 anos, sem sinais aparentes de sobrecarga. Condições de segurança normais.
	159	3,00	18 x 18	1,33	1,66	
Zona 3 S ₁ = 6,45 MPa	120	3,30	20 x 20	1,89	2,36	Pilares com idade de 4 anos, sem sinais aparentes de sobrecarga. Condições de segurança normais.
	170	3,30	24 x 24	1,66	2,07	
Zona 4 S ₁ = 6,13 MPa	300	3,30	41 x 41	1,76	2,20	Pilares com idade de 6 anos, sem sinais aparentes de sobrecarga. Condições de segurança
	350	3,30	41 x 41	1,51	1,89	

Notas:

- 1) H= profundidade da camada minerada; h= altura da camada minerada; W₁ e W₂= dimensões de projeto do lado menor e do lado maior do pilar, respectivamente;
- 2) [#] Pilar com formato de paralelogramo, onde o menor ângulo interno entre W₁ e W₂ é igual a 60°;
- 3) Nos casos de pilares retangulares, o pilar quadrado equivalente foi calculado de acordo com a função:

$$W_{eq} = \frac{2 * W_1 * W_2 * \text{sen}\theta}{W_1 + W_2}$$

onde, W₁ e W₂ são os lados menor e maior do pilar,

W₁ + W₂ respectivamente, e q o menor ângulo interno entre W₁ e W₂,

- 4) Demais condições de dimensionamento: largura da galeria= 6 m; desmonte por explosivos com fogo no duro; vida útil dos pilares: Ft= 0,8 (longo prazo) e Ft= 1 (curto prazo), esbeltez do pilar não variável ao longo do tempo; encaixantes mais resistentes que a camada de carvão; sem recuperação de pilares.

7 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos a partir do mapeamento criterioso e sistemático das descontinuidades na camada de carvão Bonito, em quatro diferentes áreas da Mina Fontanella, mostram a variação de aspectos estruturais importantes ao longo da jazida. São variações qualitativas e quantitativas nas principais características das descontinuidades presentes na camada de carvão e que interferem sensivelmente na resistência dos pilares, local e globalmente. Merecem atenção a direção dos planos das fraturas e o mergulho, bem como a frequência de fraturas por metro e a persistência das mesmas.

Os levantamentos nas diferentes zonas amostradas da mina mostram a recorrência de pelo menos três famílias principais de descontinuidades, sendo que duas delas (famílias Fm2 e Fm3) formam um par conjugado com planos dispostos por uma relação angular de cerca de 60° e rumos do mergulho relativamente constantes dentro da mina, para os quadrantes NW e SE. Estas duas famílias provavelmente representam conjugados de fraturas de cisalhamento associadas aos sistemas

de falhas normais de direção nordeste. Uma terceira família de fraturas (Fm1) está normalmente disposta ortogonalmente em relação à direção do sistema de fraturas conjugadas, com mergulho elevado. Esta família de fratura pode ser uma das direções de fraturas de cisalhamento secundárias. Já nos exemplos das Figuras 6 e 9, as fraturas de cisalhamento das Zonas 1 e 4 são cortadas por um terceira família, representada pelas fraturas denominadas Fm1. Esta situação sugere que estas fraturas representam fraturas de extensão, aproximadamente paralelas às falhas normais de direção N10-15°E.

O reconhecimento das duas famílias de fraturas de cisalhamento fornece um elemento importante para o planejamento da orientação das escavações, sendo desejável, na medida do possível, que o eixo das galerias e travessões seja orientado na direção oblíqua (aproximadamente 45°) em relação ao rumo do mergulho dessas famílias de descontinuidades.

Parâmetros estruturais como a origem e a disposição das orientações espaciais das descontinuidades, associadas com o mergulho das fraturas

e com a frequência de fraturas, fornecem elementos importantes para a avaliação qualitativa da resistência do pilar. À medida que os eixos são desenvolvidos e o comportamento do maciço no médio e longo prazos pode ser monitorado, mais informações podem ser incorporadas ao rol de elementos necessários para a tomada de decisão sobre o valor da resistência da camada a ser utilizado no dimensionamento dos pilares em determinada área.

Do ponto de vista quantitativo, a adoção de procedimentos criteriosos para o mapeamento estrutural da camada Bonito na Mina Fontanella, torna possível a classificação geomecânica da camada de carvão, definindo-se um índice RMR para cada zona da mina. Embora os resultados das classificações sejam muito limitados, devido à forte sensibilidade do índice RMR em função das variações e da relativa subjetividade na determinação de alguns dos parâmetros, ainda assim parecem justificáveis os esforços para a realização das atividades de mapeamento estrutural durante a lavra. Essas informações podem fornecer indicações úteis para o dimensionamento dos pilares, seja no sentido de ratificar os procedimentos adotados nas áreas mineradas durante o desenvolvimento parcial dos eixos principais da mina, seja para fornecer subsídios ao dimensionamento dos pilares nos painéis que serão minerados nas adjacências das áreas estudadas ou no desenvolvimento de novos eixos.

Considerando as práticas adotadas nas minas subterrâneas de carvão, sugere-se o seguinte procedimento para acompanhar as variações estruturais nos pilares da camada Bonito:

- a. avaliar regionalmente os principais lineamentos presentes na área de interesse;
- b. fazer levantamentos sistemáticos com no mínimo 40 medidas de orientação e persistência das fraturas ao longo das linhas de levantamento;
- c. utilizar mais de uma linha de levantamento, preferencialmente em direções perpendiculares entre si;
- d. determinar as principais famílias de fraturas utilizando os procedimentos adotados neste trabalho;
- e. avaliar a distribuição dos ângulos de mergulho das fraturas;
- f. determinar a frequência total de fraturas por metro utilizando a expressão 4;

- g. classificar geomecanicamente o maciço para auxiliar na estimativa da resistência *in situ* da camada de carvão, balizando os resultados com aqueles obtidos em áreas já mineradas da mina e outras técnicas empregadas para a estimativa da resistência *in situ* (ensaios de laboratório, análise de casos de sucesso e retroanálises de casos de ruptura, por exemplo).

REFERÊNCIAS

- BARTON, N.; Lien, R.; Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, v. 6, n. 4, p. 189-236. Springer-Verlag Wien, New York.
- BIENIAWSKI, Z. T. (1976). Rock mass classifications in rock engineering. In: Symposium on Exploration for Rock Engineering. *Proceedings*. Johannesburg, África do Sul, v. 1, p. 97-105.
- BIENIAWSKI, Z. T. & Bauer, J. (1982). Discussão (do artigo de HOEK, E. & BROWN, E. T. (1980). Empirical strength criterion for rock masses. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. ASCE, September (GT9), p. 1013-1035). *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. ASCE, April (GT4), p. 670-671.
- COSTA, J. F. C. L. (2000). *Avaliação de reservas de carvão - Projeto Fontanella - Carbonífera Metropolitana S.A.*. Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Volume 1.
- DEERE, D. U. (1963). Technical description of rock cores for engineering purposes. *Rock Mechanics Engineering Geology*, v. 1, p. 16-22.
- ESTERHUIZEN, G. S. (1995). Rock engineering evaluation of jointing in South African coal seams and its potential effect on coal pillar strength. In: International Conference on the Mechanics of Jointed and Faulted Rock, 2nd. *Proceedings*. Viena, Áustria, p. 807-812. Balkema, Rotterdam.
- ESTERHUIZEN, G. S. (2000). Jointing effects on pillar strength. In: International Conference on Ground Control in Mining, 19st. *Proceedings*. Morgantown, WV, USA, p. 286-290.

- GONZATTI, C. (2007). *Proposta para a estimativa da resistência in situ de camadas de carvão com a utilização de geofísica*. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (Tese de Doutorado). 274p.
- HOEK, E. (1983). Strength of jointed rock masses. *Geotechnique*, v. 33, n. 3, p. 187-223 (The Rankine Lecture).
- HOEK, E. (1994). Strength of rock and rock masses. *ISRM News Journal*, v. 2, n. 2, p. 4-16.
- HOEK, E. (1999). Putting numbers to geology - an engineer's viewpoint. *The Quarterly Journal of Engineering Geology*, v. 32, n. 1, p. 1-19.
- HOEK, E. & Brown, E. T. (1980). *Underground excavation in rock*. Inst. Min. and Metall. London.
- HOEK, E. & Brown, E. T. (1997). Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v. 34, n. 8, p. 1165-1186.
- HOEK, E.; Caranza-Torres, C.; Corkum, B. (2002). Hoek-Brown failure criterion - 2002 edition. In: North American Rock Mechanics Symposium, 5th. *Proceedings*. Toronto, Canadá, p. 267-273.
- ISRM (1978). Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v. 15, p. 319-368. Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests, Barton, N. (coord.).
- JADE, S. & Sitharam, T. G. (2003). Characterization of strength and deformation of jointed rock mass based on statistical analysis. *International Journal of Geomechanics*. ASCE, September, v. 3, n. 1, p. 43-54.
- KALAMARAS, G. S. (1993). *The in situ strength of coal*. Pennsylvania State University, Department of Mineral Engineering, PA, USA. Dissertação de Mestrado, 161p.
- KALAMARAS, G. S. & Bieniawski, Z. T. (1995). A rock mass concept for coal seams incorporating the effect of time. In: International Congress on Rock Mechanics, 8th. *Proceedings*. Tokyo, Japão, v. 1, p. 295-302.
- LAUBSCHER, D. H. (1984). Design aspects and effectiveness of support systems in different mining conditions. *Transactions of Institution of Mining and Metallurgy*, section A, v. 93, p. A70-A81.
- MILANI, E. J. (1997). *Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana sul-ocidental*. Curso de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Tese de Doutorado). 255p.
- MILANI, E. J.; Faccini, U.F.; Scherer, C. M.; Araújo, L. M.; Cupertino, J. A. (1998). *Sequences and stratigraphic hierarchy of the Paraná Basin (Ordovician to Cretaceous), Southern Brazil*. *Boletim IG-USP, Ser. Cient.* 29, p. 125-173.
- MILANI, E. J; Thomas Filho, A. (2000). Sedimentary Basins of South America. In: Cordani, U. G.; Milani, E. J.; Thomas Filho, A.; Campos, D. A. *Tectonic evolution of South America*, Infólio Produção Editorial, p. 389-449.
- PALMSTROM, A. (1985). Application of the volumetric joint count as a measure of rock mass jointing. In: International Symposium on Fundamentals of Rock Joints. *Proceedings*. Björkliden, Suécia, p. 103-110.
- PALMSTROM, A. (1995). *RMi - a rock mass characterization system for engineering purposes*. Universidade de Oslo, Noruega (Tese de Doutorado). 400p.
- PRIEST, S. D (1993). *Discontinuity analysis for rock engineering*. Chapman & Hall, 473p.
- PRIEST, S. D. & Hudson, J. A. (1976). Discontinuity spacing in rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v. 13, p. 135-148.
- PRIEST, S. D. & Hudson, J. A. (1981). Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline survey. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v. 18, n. 3, p. 183-197.
- PROTODIAKONOV, M. M. (1965). Methods of evaluating the cracked state and strength of rocks in situ. In: International Conference on Strata Control and Rock Mechanics, 4th. *Proceedings*. New York, NY, USA, 1964, 30p. (DR FMP 65/11-MRL).

- RAMAMURTHY, T. & Arora, V. K. (1994). Strength predictions for jointed rocks in confined and unconfined states. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v. 31, n. 1, p. 9-22.
- RAMAMURTHY, T. (1986). Stability of rock mass. *Indian Geotechnical Journal*, v. 16, n° 1, p. 1-74.
- RAMAMURTHY, T. (1993). Strength and modulus responses of anisotropic rocks. In: HUDSON, J. A. et al. (eds.). *Comprehensive Rock Engineering - Principles, Practice & Projects*, v. 1, p. 313-329. Pergamon Press, New York.
- RAMAMURTHY, T.; Rao, G. V.; Singh, J. A. (1988). A strength criterion for anisotropic rocks. In: Australia-New Zeland Conference on Geomechanics, 5th. *Proceedings*. Sydney, Austrália, v. 1, p. 253-257.
- SHEOREY, P. R.; Das, M. N.; Barat, D.; Prasad, R. K; Singh, B. (1987). Coal pillar strength estimation from failed and stable cases. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v. 24, n. 6, p. 347-355.
- TRUEMAN, R.; Thin, I. G. T.; Tyler, D. B. (1992). Rock mass classification as an aid to estimating the strength of coal pillars. In: International Conference on Ground Control in Mining, 11th. *Proceedings*. Wollongong, NSW, Austrália, p. 22-29.
- VARGA, A. (1993). Scale factor in rock masses as affected by geological conditions. In: International Workshop on Scale Effects in Rock Masses, 2nd. *Proceedings*. Lisboa, Portugal, p. 183-189. Balkema, Rotterdam.
- WILSON, A. H. (1983). The stability of underground workings in the soft rocks of the coal measures. *International Journal of Mining Engineering*, v. 1, n. 2, p. 91-187. London, Chapman and Hall.
- ZHONGJIE, H. (1993). Analysis and calculation of strength of a jointed rock mass in consideration of tensile failure. In: International Symposium on Assessment and Prevention of Failure Phenomena in Rock Engineering. *Proceedings*. Istanbul, Turkey, p. 167-173. Balkema, Rotterdam.
- ZORZI, L.; Agostini, I. M.; Gonzatti, C. (2006). *Determinação/definição da(s) resistência(s) característica(s) da camada Bonito*. Relatório Técnico N. 1285/65526. Projeto Bonito - Mina Fontanella. CIENTEC - Fundação de Ciência e Tecnologia/METROPOLITANA - Carbonífera Metropolitana S/A. 37p.
- ZORZI, L.; Agostini, I. M.; Gonzatti, C. (2012). *Instrumentação das estruturas subterrâneas*. Relatório Técnico N. 1285/143381. Projeto Bonito - Mina Fontanella. CIENTEC - Fundação de Ciência e Tecnologia/METROPOLITANA - Carbonífera Metropolitana S/A. 93p.
- ZORZI, L.; Agostini, I. M.; Gonzatti, C. (1991). *Metodologia para dimensionamento de pilares em minas de carvão do Sul do Brasil*. CIENTEC - FUNDAÇÃO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA, Porto Alegre, 23p. (Boletim Técnico nº 23).

