

TÓPICOS EM GEOLOGIA

volume 1

Davilson Eduardo Andrade
(Organizador)



Editora Poisson

Editora Poisson

Tópicos em Geologia Volume 1

1ª Edição

Belo Horizonte
Poisson
2019

Editor Chefe: Dr. Darly Fernando Andrade

Conselho Editorial

Dr. Antônio Artur de Souza – Universidade Federal de Minas Gerais

Msc. Davilson Eduardo Andrade

Msc. Fabiane dos Santos Toledo

Dr. José Eduardo Ferreira Lopes – Universidade Federal de Uberlândia

Dr. Otaviano Francisco Neves – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

Dr. Luiz Cláudio de Lima – Universidade FUMEC

Dr. Nelson Ferreira Filho – Faculdades Kennedy

Ms. Valdiney Alves de Oliveira – Universidade Federal de Uberlândia

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

T674

Tópicos em Geologia - Volume 1/

Organização: Davilson Eduardo Andrade

Editora Poisson - Belo Horizonte - MG:

Poisson, 2019

Formato: PDF

ISBN: 978-85-7042-112-8

DOI: 10.5935/978-85-7042-112-8

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

1. Geologia 2. Ciências da Terra. I. Andrade, Davilson Eduardo II. Título

CDD-550

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos seus respectivos autores.

www.poisson.com.br

contato@poisson.com.br

Capítulo 6

Características geotécnicas das rochas encaixantes da camada de carvão barro branco da Bacia Carbonífera Sul-Catarinense

Clovis Gonzatti

João Alberto Fiorentini

Resumo: Embora as maiores reservas de carvão do Brasil estejam situadas no Estado do Rio Grande do Sul, a bacia Carbonífera Sul-Catarinense, localizada no Estado de Santa Catarina, concentra o maior número de minas de carvão em subsolo do País. O conhecimento das características mecânicas das rochas que compõem a camada de carvão e as camadas encaixantes é de fundamental importância para o dimensionamento das estruturas de sustentação das minas (pilares) e suporte do teto das escavações. Este trabalho reporta os estudos realizados pela CIENTEC - Fundação de Ciência e Tecnologia do RS sobre rochas sedimentares presentes nas camadas encaixantes da camada de carvão Barro Branco. Os trabalhos de campo consistiram na execução de sondagens rotativas com diâmetro NX utilizando amostrador duplo-móvel. Em laboratório foram realizadas análises petrográficas microscópicas, ensaios para a determinação dos índices físicos e ensaios mecânicos para a determinação da resistência e deformabilidade dos diferentes litotipos. Os resultados permitiram a caracterização das rochas encaixantes da camada de carvão Barro Branco através da definição de padrões típicos de resistência. Esses padrões são usados para a análise da capacidade de carga das rochas encaixantes no processo de dimensionamento dos pilares de sustentação das escavações subterrâneas, quando utilizado o método de lavra por câmaras e pilares.

1. INTRODUÇÃO

Na década de 1990, a CIENTEC - Fundação de Ciência e Tecnologia do RS desenvolveu estudos pioneiros no País, relacionados à mineração de carvão, com o objetivo de estabelecer uma metodologia para o dimensionamento de pilares para minas subterrâneas de carvão do Sul do Brasil (ZORZI 1990). Uma das atividades dentro desses projetos contemplou estudos detalhados em laboratório para a caracterização geomecânica dos materiais presentes nas camadas encaixantes da camada de carvão Barro Branco, a principal camada de carvão minerada em subsolo na Bacia Carbonífera Sul-Catarinense.

O objetivo dos ensaios em laboratório foi o de definir o comportamento mecânico das rochas encaixantes do teto e piso imediatos da camada de carvão. Na mineração de carvão em subsolo no Brasil, a geometria das galerias consiste em aberturas com 5,5 a 6 m de largura e altura correspondente à espessura minerada da camada de carvão, da ordem de 1,8 a 2,3 m. Dentro desse contexto, os primeiros 5 m acima e abaixo da camada de carvão constituem a parcela do maciço rochoso que sofre a maior redistribuição das tensões em função da escavação. Conhecer as características mecânicas e a distribuição espacial dos diferentes litotipos presentes na encaixante do teto é de fundamental importância para o projeto do sistema de suporte das galerias.

De outra parte, quando tratamos do dimensionamento dos pilares de carvão, não deve ser esquecido o papel desempenhado pelas rochas encaixantes, como fundação responsável pelo suporte das cargas transmitidas pelos pilares. O método de dimensionamento de pilares de carvão recomendado pelo DNPM - Departamento Nacional da Produção Mineral, contempla, na sua concepção, a análise da capacidade de carga das rochas encaixantes (ZORZI et al. 1991). Portanto, conhecer esse atributo das rochas encaixantes é condição básica para o projeto dos pilares das minas de carvão brasileiras.

Neste trabalho, são apresentados os procedimentos adotados para a caracterização geomecânica das rochas encaixantes da camada de carvão Barro Branco, minerada na bacia Carbonífera Sul-Catarinense, no Sul do Brasil. Os procedimentos adotados in situ para a coleta de amostras, as técnicas de preparação das amostras e os procedimentos utilizados para a execução dos ensaios de caracterização física e mecânica, em laboratório, são detalhadas. Os resultados obtidos foram tratados estatisticamente e permitiram a tipificação das principais litologias presentes na Bacia Carbonífera. Essas informações servem de base para o cálculo da capacidade de carga das rochas encaixantes da camada de carvão Barro Branco.

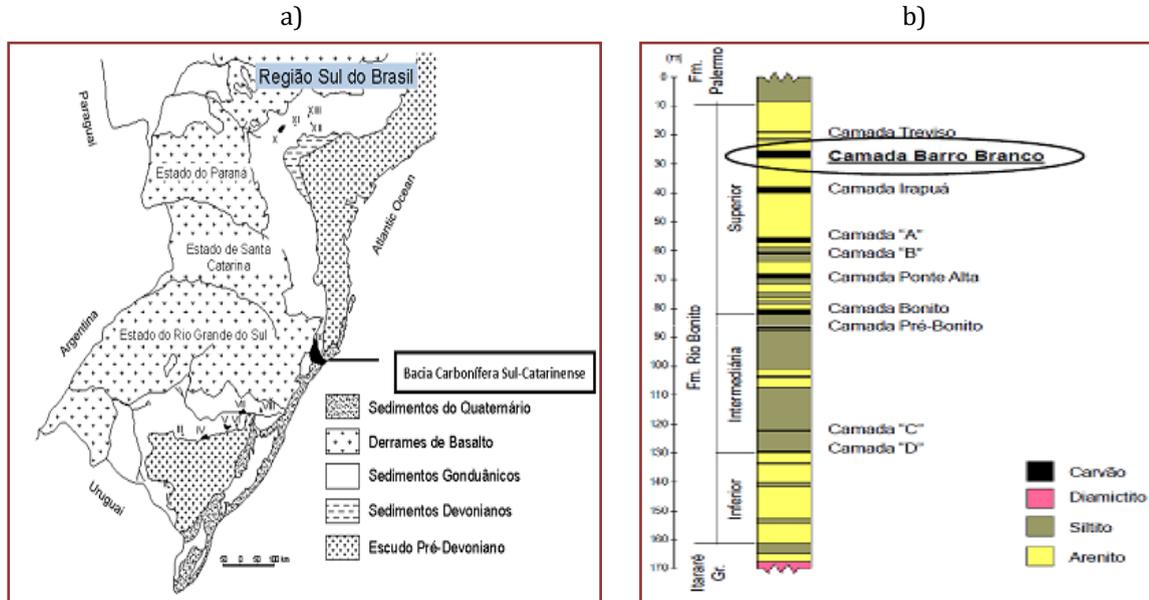
2. GEOLOGIA DA ÁREA DE ESTUDO

Geograficamente, todos os locais investigados estão localizados dentro da Bacia Carbonífera Sul-Catarinense, a qual é parte da porção Leste da bacia do Paraná, conforme Figura 1a, e se estende por vários Estados do Brasil. Os depósitos sedimentares mais antigos pertencem ao período Devoniano. A evolução da bacia possui características intracratônicas.

Dentro da sequência estratigráfica, as litologias carbonosas estão associadas ao Grupo Itararé (basal) e Guatá, com idades do Carbonífero Superior e Permiano Superior. Porém, no Grupo Guatá estão localizadas as camadas de carvão mais espessas, de melhor qualidade e em exploração. Dentre as sete principais camadas, três possuem maior expressão econômica: Barro Branco, conforme indicado na Figura 1b, Irapuá e Bonito.

O condicionamento estrutural encontrado na bacia do Paraná é representado por falhas normais, com planos subverticais. Falhas de empurrão são raras e com pequenos rejeitos. A presença de *slikensides* causados pela compactação diferencial é frequente. Sistemas de fraturas podem acompanhar as falhas, formando sistemas conjugados, preenchidos ou não por diques de diabásio.

Figura 1. a) Mapa geológico do Sul do Brasil. Números de I a XIII indicam bacias carboníferas conhecidas no Brasil. IX = Bacia Carbonífera Sul-Catarinense; b) Perfil estratigráfico típico da Formação Rio Bonito, com destaque na camada Barro Branco.



O piso imediato da camada de carvão Barro Branco é formado, na maior parte, por arenitos de granulação fina à grossa e composição quartzosa. Estes arenitos apresentam, em alguns casos, uma laminação ondulada à lenticular, dada pela presença de material siltico argiloso intercalado. Por vezes podem aparecer camadas de material siltico, às vezes físsil, intercalado ao pacote de arenito. Nas proximidades do piso da camada Barro Branco, localmente, pode ocorrer camada de siltito preto, compacto, fortemente alterável na presença de água.

Já no teto da camada Barro Branco podem aparecer somente arenitos, somente siltitos ou uma sucessão de camadas de arenitos e siltitos. O siltito, que compõe o teto imediato em alguns dos locais amostrados, apresenta variações desde siltito cinza escuro ou preto, maciço e consistente, até uma rocha físsil e mais micácea (folhelho siltico), ou então laminado, com lâminas formadas por arenito fino. As demais camadas de siltito que compõem a porção mais superior do teto imediato são normalmente arenosas, com presença de micas e com lentes de arenito fino. A presença de pirita é constante, com proporções variáveis e ocorrendo sob a forma de plaquetas paralelas à físsilidade e laminação, ou preenchendo fissuras, com ou sem carbonato associado. Os arenitos, por sua vez, são rochas de granulometria fina, às vezes grosseira, quartzosos, pouco micáceos e coerentes. Apresentam contatos nítidos ou gradacionais com os siltitos de base e topo. Nas camadas mais distantes do teto imediato ele se mostra mais micáceo e com lâminas siltico-argilosas.

3.AMOSTRAGEM

A seleção dos locais amostrados dentro da Bacia Carbonífera Sul-Catarinense levou em consideração estudos preliminares da geologia e a distribuição dos diferentes litotipos presentes na área em estudo. As sondagens foram realizadas em subsolo a partir de galerias nas frentes de lavra. No total foram realizados 20 furos verticais, amostrando-se em cada local 5 m no piso e 5 m no teto, conforme Figura 2, totalizando 100 m de testemunhos coletados. As amostras foram recuperadas utilizando barrilete duplo móvel, diâmetro NX. Previamente à seleção das amostras para ensaio em laboratório, as diferentes litologias foram descritas macroscopicamente e determinado o RQD - Rock Quality Designation. A Figura 3 apresenta uma síntese das características petrográficas macroscópicas das diferentes classes geomecânicas identificadas nas amostras estudadas.

Figura 2. Testemunhos de sondagem diâmetro NX (54 mm) obtidos nas sondagens das rochas encaixantes do teto e do piso da camada de carvão Barro Branco - Furo 1 - Local de amostragem 1.

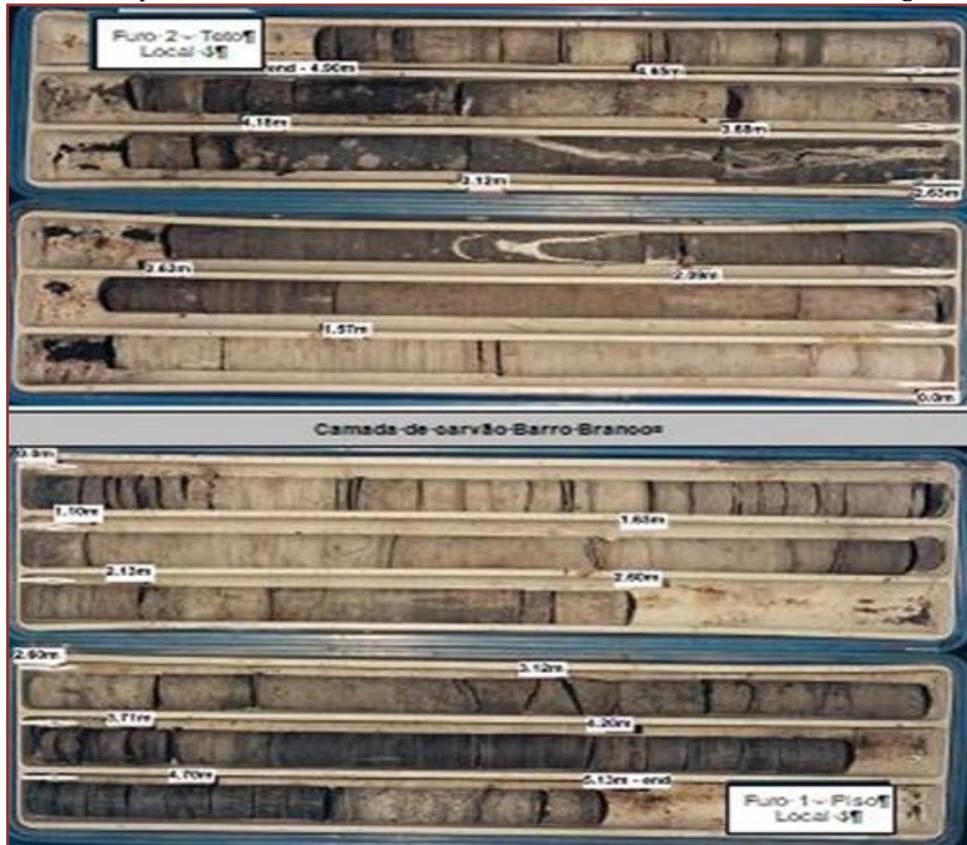


Figura 3. Características petrográficas macroscópicas típicas das diferentes classes geomecânicas.

Classe Geomecânica	Descrição Macroscópica
Arenito HS-Alta Resistência	Arenito orto-quartzítico, de granulação fina a média, cor cinza claro com cimento carbonático. Zonas com manchas claras são resultado de forte cimentação carbonática. Possui estratificação plano-paralela ou cruzada de baixo ângulo, apresenta-se compacto com frequentes intercalações de filmes de siltito, matéria orgânica, micas e concentrações de pirita. A rocha é muito coerente com RQD de bom a excelente (>75%) na zonas maciças e pobre (<25%) nas zonas com intercalações. 
Arenito MS-Média Resistência	Arenito de granulação fina a média, cor cinza claro, intercalado com finas lâminas ou leitos de siltito escuro, micáceo. Cimentação quartzítica. Fraturas frequentes de contato. RQD de excelente (>75%) a muito pobre (<25%). 
Arenito LS-Baixa Resistência	Arenito de granulação grossa, cor cinza claro com manchas escuras. Intercalações de filmes de matéria orgânica dão origem a fraturas horizontais de acamamento frequentes. A cimentação é carbonática, embora a rocha possua aspecto friável. RQD pobre (25-50%). 

(Continuação ...)

Figura 3. Características petrográficas macroscópicas típicas das diferentes classes geomecânicas.

Classe Geomecânica	Descrição Macroscópica
Siltito HS-Alta Resistência	Siltito cinza escuro, com finas lâminas de arenito intercalado. Fraturas muito frequentes nos planos de acamamento. RQD pobre (<50%). 
Siltito LS-Baixa resistência	Siltito carbonoso intercalado com arenito fino formando pequenas lentes. Apresenta estratificação plano-paralela, extremamente fraturado nos planos de acamamento. RQD muito pobre (<25%). 

4. ENSAIOS REALIZADOS

A preparação dos corpos de prova obedeceu aos procedimentos específicos sugeridos pela ISRM para cada modalidade de ensaio. Previamente aos ensaios mecânicos, foram determinados a massa específica aparente e velocidade sônica (onda P), esta última determinada utilizando um equipamento "PUNDIT" (Portable Ultrasonic Non-Destructive Digital Indicating Tester) com transdutores de 54 KHz, 1 MHz and 2 MHz. Com o intuito de determinar a envoltória de ruptura das diferentes litologias, ensaios de compressão diametral, compressão uniaxial e compressão triaxial convencional e multiestágio foram realizados. No total, 702 corpos de prova foram ensaiados, conforme quantitativos vistos na Tabela 1. Os quantitativos de massa específica e de velocidade sônica podem ser considerados também a expressão aproximada da proporção de cada classe geomecânica na jazida.

Tabela 1. Quantitativos de ensaios realizados com materiais das diferentes classes geomecânicas.

Classe Geomecânica	Massa Específica Aparente	Velocidade Sônica	Modalidade de Ensaios Compressão			Módulo de Young/Coeficiente de Poisson
			Diametral	Uniaxial	Triaxial	
Arenito HS	344	344	169	85	90	31
Arenito MS	91	91	48	22	21	5
Arenito LS	73	73	38	17	18	4
Siltito HS	134	134	75	30	29	7
Siltito LS	60	60	35	14	11	2
Total de Ensaios	702	702	365	168	169	48

Os ensaios de compressão diametral foram realizados em uma prensa Losenhausen com capacidade de carga de 100 kN. A tensão de tração indireta foi determinada na direção paralela aos planos de estratificação da rocha.

Para os ensaios de compressão uniaxial e triaxial utilizou-se um sistema de carga com capacidade de 2 MN. Nos ensaios triaxiais a tensão confinante foi aplicada com o auxílio de uma câmara triaxial de Hoek. A ruptura seguiu os procedimentos de ensaio individual e/ou multiestágio. Todas as litologias foram ensaiadas na faixa de tensões confinantes entre 10 e 30 MPa. Em ambas modalidades de ensaios, a aplicação das cargas foi feita na direção perpendicular aos planos de estratificação da rocha.

Nos ensaios de compressão uniaxial com determinação das constantes elásticas, as deformações foram medidas com extensômetros elétricos tipo *strain gages* e um sistema eletrônico Kyowa. O cálculo do módulo de Young foi feito pelo método do módulo médio, enquanto o coeficiente de Poisson baseou-se no método secante 50%.

Todos os ensaios mecânicos foram realizados baseados nos métodos sugeridos pela ISRM com as amostras na condição de umidade natural entre 0,5% e 3%.

O processo de classificação geomecânica dos diferentes tipos litológicos estudados foi feito com base na análise petrográfica macroscópica, seguida da análise estatística dos resultados da velocidade sônica, resistência à tração e resistência à compressão uniaxial. Finalmente, utilizaram-se os resultados de todas

as modalidades de ensaios mecânicos (compressão diametral, uniaxial e triaxial), individualizados por classe geomecânica, para o estabelecimento da envoltória de ruptura média.

Os resultados das diferentes propriedades físicas e mecânicas, após o tratamento estatístico dos dados, permitiu a definição de cinco classes geomecânicas (três classes de arenitos e duas de siltito). Os resultados são apresentados utilizando diagramas de caixas (*Box-Whiskers*), conforme representação na Figura 4, e podem ser vistos nas Figuras 5 e 6.

A envoltória de ruptura foi determinada com base no critério de Hoek-Brown, versão 2002 (HOEK et al. 2002). O cálculo dos parâmetros representativos da envoltória da rocha intacta foi feito utilizando o software RocLab, versão 1.032. No processo de definição da envoltória média de cada classe geomecânica, levou-se em consideração o valor médio da resistência à tração de cada amostra, assim como todos os resultados dos ensaios de compressão uniaxial e triaxial. No total foram estudadas 27 amostras. A Figura 7 mostra resultados típicos de três amostras, enquanto a Figura 8 apresenta a envoltória média de cada uma das 5 classes geomecânicas. Na Tabela 2 são apresentados os parâmetros médios das diferentes propriedades físicas e mecânicas estudadas, incluindo os parâmetros médios das envoltórias de ruptura, para cada uma das 5 classes geomecânicas.

Tabela 2. Parâmetros médios das 5 classes geomecânicas das rochas encaixantes da camada de carvão Barro Branco.

Classe Geomecânica	Parâmetros Típicos da Rocha Intacta Obtidos em Ensaios de Laboratório						Parâmetros da Envoltória de Ruptura da Rocha Intacta			
	$\rho(\text{g/cm}^3)$	$V_p(\text{km/s})$	ITS(MPa)	UCS(MPa)	$E_m(\text{GPa})$	$V_{sec} 50\%$	Hoek-Brown ($s = 1; a = 0,5$)		Mohr-Coulomb	
							$\sigma_{ci}(\text{MPa})$	m_i	$c'(\text{MPa})$	$\phi'(\text{o})$
Arenito HS	2,43 (0,07)#	4,2 (0,45)	8,2 (2,67)	93,0 (26,47)	34,0 (9,61)	0,31 (0,12)	102,6	10,2	20,6	43,2
Arenito MS	2,51 (0,09)	3,9 (0,65)	7,6 (2,97)	71,0 (14,56)	22,1 (2,84)	0,37 (0,12)	75,9	7,0	16,8	38,9
Arenito LS	2,44 (0,08)	3,1 (0,51)	5,1 (1,74)	42,3 (13,71)	10,8 (1,90)	0,34 (0,11)	56,1	7,9	12,0	40,3
Siltito HS	2,58 (0,08)	3,8 (0,56)	6,8 (1,79)	57,3 (16,64)	18,7 (3,37)	0,24 (0,05)	57,9	6,2	13,5	37,5
Siltito LS	2,50 (0,06)	2,6 (0,95)	4,3 (1,46)	38,3 (7,90)	2,9 (0,57)	0,33 (0,10)	32,7	4,1	8,4	32,5

Valores entre parênteses = desvio padrão.

Figura 4. Significado da representação de dados estatísticos em digramas de caixas (*Box-Whiskers*).

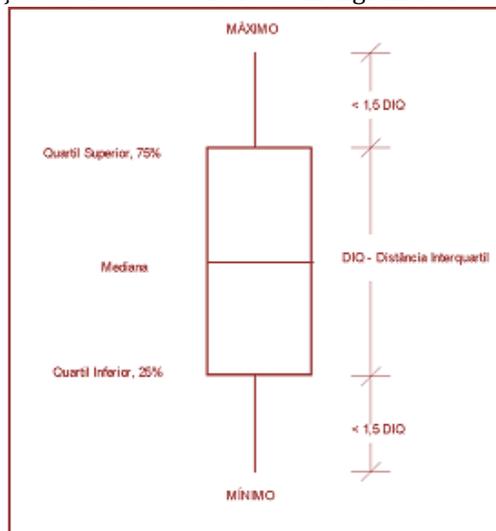


Figura 5. Propriedades físicas das diferentes classes geomecânicas das rochas encaixantes da camada de carvão Barro Branco.

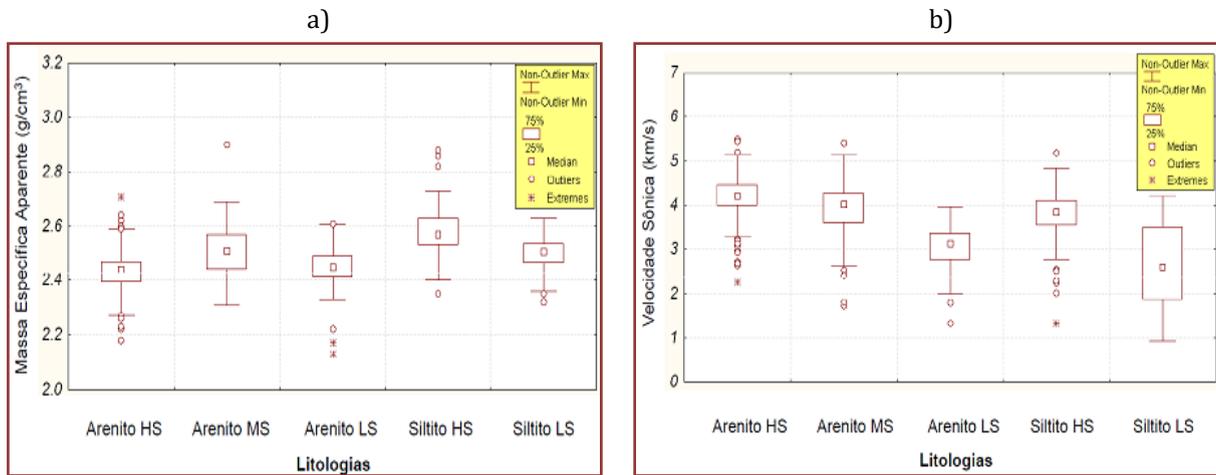
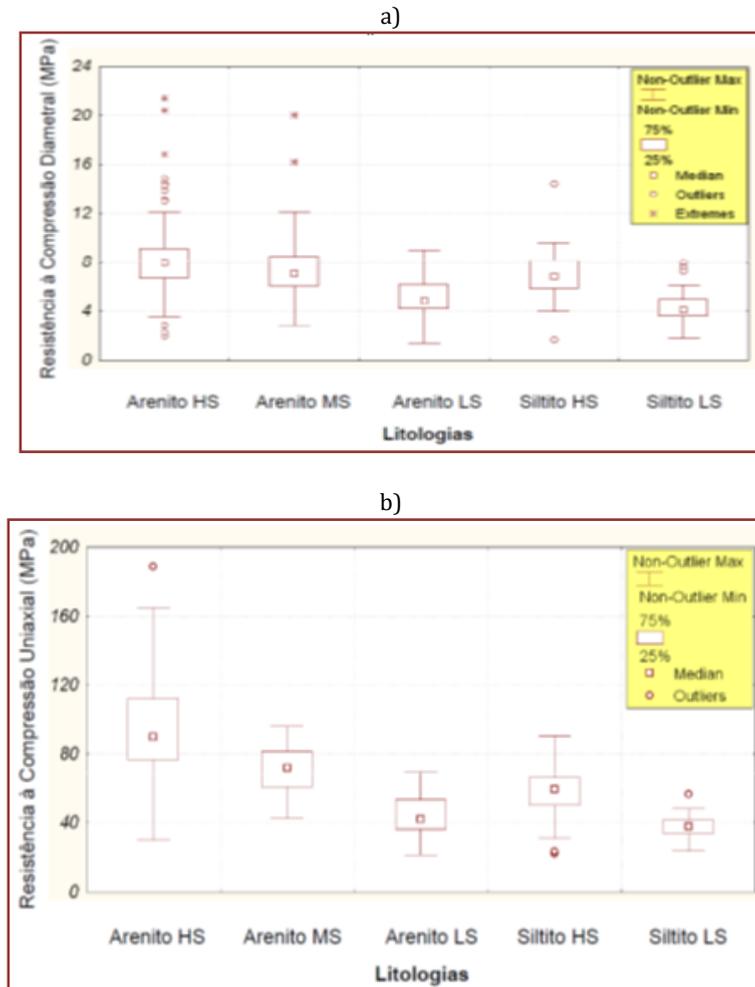


Figura 6. Propriedades mecânicas das diferentes classes geomecânicas das rochas encaixantes da camada de carvão Barro Branco.



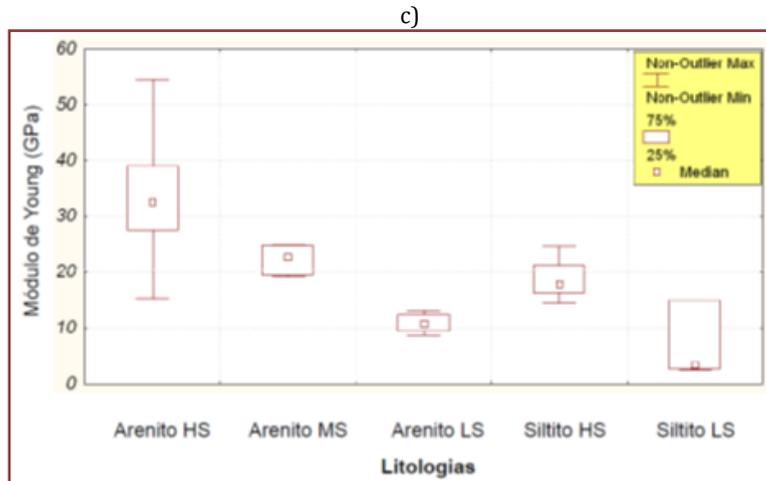


Figura 7. Envoltórias típicas de ruptura, de acordo com o critério de Hoek-Brown, de amostras das camadas encaixantes da camada de carvão Barro Branco.

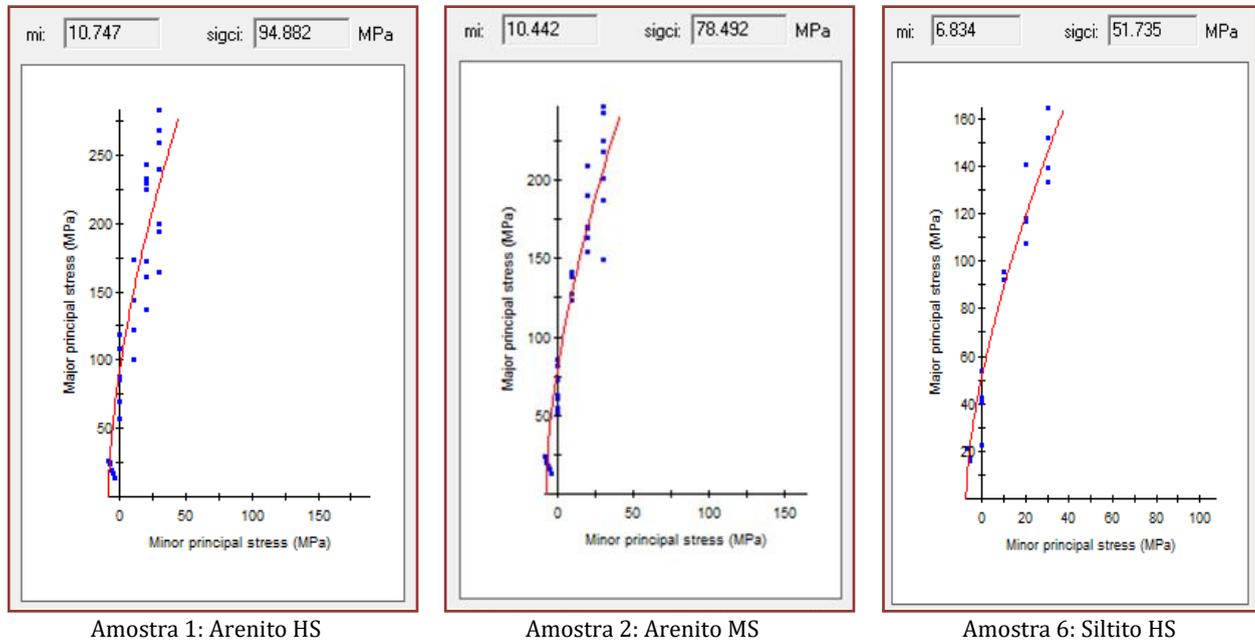
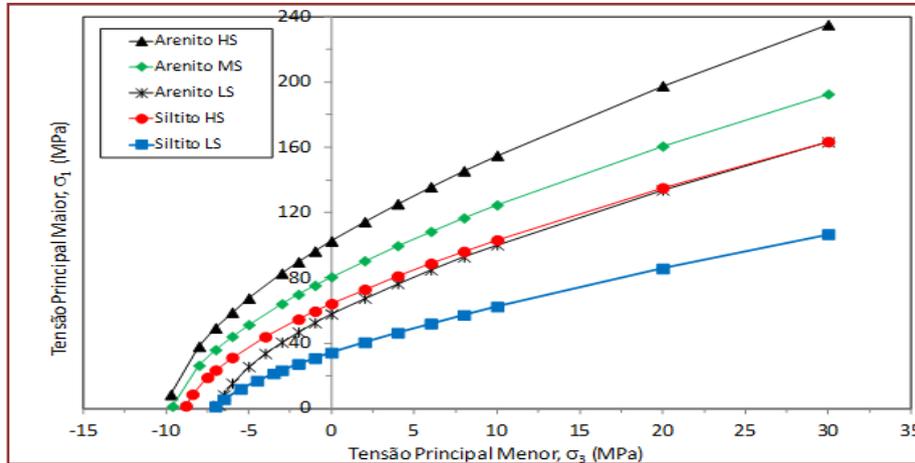


Figura 8. Envoltórias de ruptura média de acordo com o critério de ruptura de Hoek-Brown representativas das 5 diferentes classes geomecânicas das rochas encaixantes da camada de carvão Barro Branco



ρ =massa específica aparente natural; V_p =velocidade sônica; ITS=resistência à tração indireta; UCS=resistência à compressão uniaxial; E_m =módulo de Young médio; $\nu_{sec\ 50\%}$ =coeficiente de Poisson secante 50%; σ_{ci} =resistência à compressão uniaxial; m_i , s , a =constantes do critério de Hoek-Brown; c' =coesão; ϕ' =ângulo de atrito.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os materiais rochosos presentes nas encaixantes da camada de carvão Barro Branco, na Bacia Carbonífera Sul-Catarinense, mostram claramente duas litologias distintas: arenitos e siltitos. Tendo como base as características petrográficas macroscópicas, físicas e as propriedades mecânicas das rochas estudadas, foram definidas 5 classes geomecânicas, conforme visto na Tabela 2.

Geomecanicamente, os arenitos podem ser divididos em três classes: Arenito HS, de grão fino, o mais resistente; Arenito LS, de grão médio a grosso, o menos resistente; Arenito MS, de grão médio a fino, praticamente impossível de ser separado apenas pela descrição macroscópica. Os siltitos, por seu lado, são divididos em duas classes: Siltito HS e o Siltito LS. Macroscopicamente esses siltitos se distinguem apenas pelo grau de fissilidade, uma vez que pela textura e cor são muito semelhantes.

Os materiais pertencentes às classes geomecânicas Arenito HS e Siltito HS representam aproximadamente 50% e 20%, respectivamente, das litologias amostradas. Cada uma das três outras classes representa cerca de 10%.

As propriedades físicas permitem a distinção das 5 classes apenas pela velocidade sônica, conforme Figura 5b. É notável a diferença da velocidade (mediana) entre as três classes de arenitos, assim como entre as duas classes de siltitos. Da mesma forma, mecanicamente, tanto a resistência à tração como a de compressão evidenciam claramente a presença de 5 classes de resistência, embora as classes geomecânicas Arenito LS e Siltito LS sejam semelhantes, como visto nas Figuras 6a e 6b.

Do ponto de vista da resistência ao cisalhamento, a envoltória de ruptura das diferentes classes geomecânicas sugere a existência de apenas 4 classes geomecânicas com características distintas, sendo duas de arenitos e duas de siltitos. Embora na região de tração as classes geomecânicas Arenito LS e Siltito LS sejam semelhantes mecanicamente, na condição confinada é a classe geomecânica Arenito LS que se assemelha ao Siltito HS, conforme Figura 7 e os resultados na Tabela 2. A explicação para esse comportamento pode estar associada à textura do Arenito LS (grãos maiores e mais rugosos), quando comparado com as classes de siltitos. Esses aspectos texturais do Arenito LS, associados ao confinamento, produzem um aumento na dilatância durante a ruptura, com o consequente aumento da resistência ao cisalhamento.

6. CONCLUSÕES

Os estudos realizados permitiram a caracterização geomecânica das principais litologias presentes nas encaixantes da camada de carvão Barro Branco, da Bacia Carbonífera Sul-Catarinense. Pelo menos 5 classes geomecânicas foram definidas em função das diferentes propriedades físicas e mecânicas determinadas em laboratório.

As classes geomecânicas Arenito HS, Arenito MS e Siltito HS representam aproximadamente 80% das rochas presentes nas encaixantes do teto e piso da camada de carvão Barro Branco. Essas classes também se constituem nas rochas de melhor qualidade mecânica. De outra parte, as classes Arenito LS e Siltito LS representam cerca de 20% das rochas encaixantes. De acordo com procedimentos sugeridos por ZORZI et al. (1991) para o dimensionamento dos pilares, quando em contato com a camada de carvão, as rochas encaixantes devem ser analisadas quanto à capacidade de carga.

REFERÊNCIAS

- [1] Isrm - International Society for Rock Mechanics (1978). Suggested methods for determining sound velocity. Int. Journal of Rock Mech. and Min. Scienc. & Geomech. Abstr.. Vol. 15, nº 2, p. 53-58.
- [2] Isrm - International Society for Rock Mechanics (1978). Suggested methods for determining tensile strength of rock material. Int. Journal of Rock Mech. and Min. Scienc. & Geomech. Abstr.. Vol. 15, nº 3, p. 99-103.
- [3] Isrm - International Society for Rock Mechanics (1979). Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake-durability index properties. Int. Journal of Rock Mech. and Min. Scienc. & Geomech. Abstr.. Vol. 16, nº 2, p. 141-156.
- [4] Isrm - International Society for Rock Mechanics (1979). Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials. Int. Journal of Rock Mech. and Min. Scienc. & Geomech. Abstr.. Vol. 16, nº 2, p. 135-140.
- [5] Isrm - International Society for Rock Mechanics (1983). Suggested methods for determining the strength of rock materials in triaxial compression: revised version . Int. Journal of Rock Mech. and Min. Scienc. & Geomech. Abstr.. Vol. 20, nº 6, p. 283-290.
- [6] Zorzi, L. (coord.) (1990). Projeto: Dimensionamento de Pilares em Minas de Carvão. Cientec - Fundação De Ciência E Tecnologia. Porto Alegre, 2v.
- [7] 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).
- [8] Hoek, E.; Carranza-Torres, C.; Corkum, B. (2002). Hoek-Brown failure criterion - 2002 edition. In.: North American Rock Mechanics Symposium, 5th. Proceedings. Toronto, Canadá, v. 1, p. 267-273.