



Luciana Andrade Peixoto Silva

**Caracterização do Comportamento Mecânico
do Carvão da Formação Rio Bonito, Camada
Barro Branco - SC**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Jr.
Co – Orientador: Dr. Erick Slis Raggio Santos

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2011



Luciana Andrade Peixoto Silva

**Caracterização do Comportamento Mecânico
do Carvão da Formação Rio Bonito, Camada
Barro Branco – SC**

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada
pela Comissão Examinadora abaixo assinada

Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Jr.

Orientador
Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Dr. Erick Slis Raggio Santos

Co-orientador
CENPES/Petrobras

Dr. Antônio Claudio Soares

CENPES/Petrobras

Dra. Raquel Quadros Velloso

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 04 de Fevereiro de 2011

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

Luciana Andrade Peixoto Silva

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade Federal Fluminense em 2004. Ingressou no mestrado na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio em 2008, desenvolvendo dissertação na linha de pesquisa de Mecânica das Rochas.

Ficha Catalográfica

Silva, Luciana Andrade Peixoto

Caracterização do Comportamento Mecânico do Carvão da Formação Rio Bonito, camada Barro branco, SC/ Luciana Andrade Peixoto Silva; orientador: Eurípedes do Amaral Vargas Jr.; co-orientador: Erick Slis Raggio Santos. – 2011.

128 f: il. (color); 30,0 cm.

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2011.

Inclui referências bibliográficas.

Engenharia Civil – Teses. 2. Carvão 3. Caracterização Mecânica 4. Armazenamento Geológico de CO2 5. CCS I. Vargas Jr, Eurípedes do Amaral. II. Santos, Erick Slis Raggio. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. IV. Departamento de Engenharia Civil. V. Título.

CDD 624

A meu filho Felipe e minha sobrinha Lara:
são eles os responsáveis pela minha
constante renovação.

Agradecimentos

A Deus, causa primária de todas as coisas.

Aos meus pais Rachel e Renato e meu segundo pai João, pessoas essenciais em minha formação moral e intelectual.

Ao meu filho Felipe, seus olhinhos me motivaram a seguir sempre em frente. Tudo que faço é por você. Te amo!

A toda minha família, em especial a minha querida irmã Fabiana, minha sobrinha Lara e meus enteados Bernardo, Gabriel e Luca, pelo apoio nesse período de muitas renúncias.

Ao meu amado marido Pedro, pelo companheirismo e apoio, por ter me levantado nos momentos difíceis e por ter vibrado comigo nos momentos de conquistas. Sem dúvida não seria possível realizar esse sonho sem ele.

Ao admirável professor Franklin Antunes; nunca irei esquecer os ensinamentos transmitidos por ele, tanto humanos quanto técnicos. Registro minha profunda admiração pessoal e profissional por ele.

Ao meu orientador, professor Eurípedes do Amaral Vargas Jr., pela seriedade e competência no exercício de sua profissão. Foram suas aulas de Mecânica das Rochas as responsáveis pelo meu direcionamento na linha de pesquisa escolhida.

Ao meu co-orientador, Erick Slis Raggio Santos, pelos conhecimentos transmitidos e pela confiança em meu trabalho; além de co-orientador, foi um grande amigo.

Ao Antônio Cláudio, pessoa importantíssima na minha caminhada no CENPES: seus conselhos e conhecimentos contribuíram muito nesse trabalho.

Aos meus amigos do Laboratório de Mecânica das Rochas do CENPES, Marcos Dantas, Marcus Soares, Rafael e Rodrigo, pela ajuda nos ensaios e por acharem um jeito de levantar meu ânimo nos momentos de desespero. Aprendi muito com eles.

Ao Julio, pela difícil preparação das amostras de carvão; se não fosse sua competência profissional, não haveria corpos de prova.

Aos meus amigos da PUC, em especial a Cristiane, Carla, Luis, David, Victor, Silvestre e Danilo, pelo convívio e pelo aprendizado a mim proporcionado.

À professora e amiga Michele Casagrande, pela colaboração indispensável, pelo exemplo e pelo incentivo.

A todos do laboratório de Estruturas e de Geotecnia da PUC, em especial ao meu amigo Euclides.

A Patrícia Osterreicher, pelas conversas, desabafos, além do aprendizado a mim proporcionado.

A Rita, pela paciência dispensada a todos os alunos, até mamadeira ela me ajudou a fazer quando tive que levar o Felipe em dia de aula.

A Raquel Velloso que sempre esteve pronta para esclarecer minhas dúvidas a contribuir no que fosse necessário.

A Débora Pilotto, sua contribuição e seu conhecimento em geologia foram muito importantes na reta final do meu trabalho.

A professora Deane Roehl pela sua importante ajuda no momento que mais precisei.

A todos do SIECESC, em especial a Cleber Gomes e Luciane Garavaglia pelo acolhimento em Santa Catarina e por me proporcionarem o contato com a Carbonífera Criciúma.

À Carbonífera Criciúma, que gentilmente cedeu amostras de carvão para o desenvolvimento da pesquisa. Um agradecimento especial à geóloga Lisiane, pelos esclarecimentos prestados sobre o carvão.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio.

Ao CENPES pelas excelentes instalações cujo uso me foi permitido.

À CAPES e à PUC-Rio, pelo apoio financeiro.

A Helena Drummond, pela colaboração indispensável na apresentação do meu trabalho.

Às minhas amigas de longa data que indiretamente me ajudaram muito nessa jornada. São elas: Bruna, Alda, Débora, Nanda, Ana Helena e Flávia. A certeza de não estar só nos fortalece!

Enfim, a todos que de certa forma contribuíram para que eu conseguisse alcançar este grande objetivo que escolhi.

Resumo

Silva, Luciana Andrade Peixoto; Vargas, Eurípedes do Amaral; Santos, Erick Slis Raggio. **Caracterização do Comportamento Mecânico do Carvão da Formação Rio Bonito, Camada Barro Branco - SC.** Rio de Janeiro, 2011. 128p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Os mecanismos envolvidos na produção de metano e no seqüestro de CO₂ no carvão são complexos, tendo em vista grande quantidades de fatores envolvidos no processo. O entendimento do comportamento mecânico do carvão assim como a caracterização de sistema poroso é de fundamental importância para o êxito de um projeto de exploração. Esse trabalho visou à caracterização de amostras de carvão oriundas da camada Barro Branco. A fim de caracterizar o sistema poroso do material, uma campanha de análises foi programada como: microtomógrafo, microscopia eletrônica de varredura (MEV), micropermiametria e porosimetria por injeção a mercúrio. Ensaios mecânicos foram realizados visando à caracterização mecânica do material e a validação de um modelo constitutivo. O carvão apresentou comportamentos mecânicos de resistência e deformabilidade consistentes e com pouca variabilidade, o que permitiu um ajuste confiável da envoltória de resistência de Mohr-Coulomb bem como o do modelo constitutivo elastoplástico de Lade-Kim.

Palavras-chave

Carvão; Caracterização Mecânica; Armazenamento Geológico de CO₂; CBM, ECBM.

Abstract

Silva, Luciana Andrade Peixoto; Vargas, Eurípedes do Amaral (advisor); Santos, Erick Slis Raggio (co-advisor). **Characterization of the Mechanical Behavior of Coal Belonging to Rio Bonito Formation, SC.** Rio de Janeiro, 2011. 128p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Mechanisms involved in geological storage of CO₂ and eventual production of methane are complex due to a number of different factors involved. One of the important factors to be taken into account is the geomechanical behaviour of coal, key to the success of the exploration as well as the characterization of the pore structure of the material. Coal can be regarded as a sedimentary rock possessing two perpendicular families of microfissures called cleats. This work presents results of an experimental program aiming at the characterization of the mechanical properties of coal from the Barro Branco formation. A constitutive model (Lade-Kim's model) was tested in order to check its validity in the representation of the stress-strain-strength behaviour of the coal. Lade-Kim's model is well accepted for the representation of the mechanical behaviour of soft rocks. Furthermore, in order to characterize the porous structure of the material, a number of tests were performed such as: X Ray Micro CT scan, scanning electron microscopy, minipermeameter determination of permeability and mercury injection porosimetry.

Keywords

Coal; Mechanical Characterization; Geological CO₂ sequestration; CBM; ECBM.

Sumário

1. Problema e Relevância da Pesquisa	16
1.1. Relevância da Pesquisa e Objetivos	18
1.2. Organização do Trabalho	18
2. Geologia	20
2.1. Carvão	20
2.2. Bacia do Paraná	22
2.2.1. Formação Rio Bonito	23
2.2.1.1. Camada Barro Branco	25
3. Carvão Mineral como Rocha Reservatório	26
3.1. Processos de Recuperação CBM/ECBM	26
3.2. Porosidade e Permeabilidade	28
3.3. Comportamento Mecânico	34
3.3.1. Carvão Mineral	39
4. Materiais e Métodos	44
4.1. Considerações Iniciais	44
4.2. Origem do Carvão Ensaiado	44
4.3. Caracterização Mineralógica	48
4.4. Estrutura Porosa do Carvão	49
4.4.1. Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)	49
4.4.1.1. Lâmina Delgada	50
4.4.1.2. Amostra Retangular de Seção Polida	50
4.4.2. Microtomógrafo	50
4.4.3. Porosimetria por Injeção a Mercúrio	50
4.4.4. Micropermeametria	52
4.5. Caracterização Mecânica	54
4.5.1. Preparação dos Corpos de prova	55
4.5.2. Tomografia	57

4.5.3. Equipamento	58
4.5.4. Ensaio Triaxiais	60
4.5.5. Ensaio Hidrostáticos	60
4.5.6. Ensaio de Compressão Uniaxial	62
4.5.7. Ensaio Brasileiro	62
5. Ensaio e Análises	63
5.1. Composição Mineralógica	63
5.2. Sistema de Fraturas	64
5.3. Tomografia e Microtomografia	69
5.4. Micropermeametri	71
5.5. Porosimetria por Injeção a Mercúrio	73
5.6. Ensaio de Compressão Triaxial	74
5.6.1. Ciclos de Carregamento e Descarregamento	79
5.6.2. Influência da Tensão Confinante	81
5.7. Ensaio Hidrostáticos	84
5.7.1. Ensaio Hidrostático <i>Bulk</i>	84
5.7.2. Ensaio Hidrostático com Ciclos de Descarga/Recarga	86
5.8. Critério de Ruptura de Mohr-Coulomb	92
5.9. Modelo Constitutivo Elasto-plástico de Lade-Kim	94
6. Conclusões	99
6.1. Sugestões para Futuros Trabalhos	101
7. Referências bibliográficas	103
Anexos	108
Apêndice A - Fotos dos Corpos de Prova	109
Apêndice B - Tomografia dos Corpos de Prova	114
Apêndice C - Resultados dos Ensaio Mecânicos	120

Lista de figuras

Figura 1 - Esquema ilustrando a formação do carvão, com mudanças nos parâmetros principais usados na determinação do rank	21
Figura 2 - Localização da Bacia do Paraná na América do Sul, distribuição das jazidas de carvão no Rio Grande do Sul e Santa Catarina e Litoestratigrafia mostrando a formação Rio Bonito, de idade Permiana.	23
Figura 3 - Perfil estratigráfico típico da formação Rio Bonito	24
Figura 4 - Croqui esquemático da camada de carvão Barro Branco	25
Figura 5 - Poço de produção de metano em projetos de CBM	27
Figura 6 - Processo de recuperação avançada de Metano	28
Figura 7 - Modelo do fluxo de metano mostrando a dessorção, difusão e fluxo de Darcy	29
Figura 8 - Gás nos poros e fraturas, com as forças de van der Waals	30
Figura 9 - Dupla porosidade no carvão	32
Figura 10 - Permeabilidade versus tensão efetiva	34
Figura 11 - Modos de falha típicos de um material friccional	35
Figura 12 - Comportamento típico de um ensaio de compressão volumétrica em materiais friccionais	37
Figura 13 - Comportamento tensão vs. deformação típico para carregamento desviatório	38
Figura 14 - Influência do tamanho dos corpos de prova em resultados dos ensaios uniaxiais	39
Figura 15 - Resultados de compressão uniaxial com materiais da camada de carvão Barro Branco	40
Figura 16 - Envoltória de resistência do carvão da camada Bonito presente na Mina Fontanella em Santa Catarina segundo o critério de Hoek-Brown	41
Figura 17 - Presença de silicatos	41
Figura 18 - Variação do volume da matriz com o decréscimo da pressão de gás	42
Figura 19 - Visita à Mina de Verdinho localizada no município de mesmo nome da Carbonífera Criciúma	45
Figura 20 - Camada Barro Branco	46
Figura 21 - Mapa de localização das amostras de Mineira II – Verdinho, Eixo SWI – CMT2	46
Figura 22 - Croqui referente à amostra 1	47
Figura 23 - Croqui referente à amostra 2	47
Figura 24 - Croqui referente à amostra 3	48

Figura 25 - Croqui referente à amostra 4	48
Figura 26 - Fotos das amostras oriundas do bloco 1	51
Figura 27 - Micropermeâmetro modelo Mineperm-100	53
Figura 28 - Micropermeâmetro	53
Figura 29 - Amostra utilizada para análise de permeabilidade nas seis arestas	54
Figura 30 - Amostra referente ao bloco 3 de carvão	55
Figura 31 - Fita adesiva para evitar a propagação de fissuras na amostra	56
Figura 32 - Faceamento do corpo de prova	56
Figura 33 - Esquema da célula triaxial utilizada	58
Figura 34 - Foto do sistema de teste geomecânico MTS 815	59
Figura 35 - Preparação dos extensômetros axial e lateral em corpo de prova	59
Figura 36 - Protocolo de ensaio proposto para ensaio hidrostático cíclico com ensaio triaxial final	61
Figura 37 - Protocolo de ensaio proposto para o ensaio hidrostático	62
Figura 38 - Difratoograma da amostra analisada do carvão	63
Figura 39 - Em 1 caulinita; em 2 pirita	64
Figura 40 - Fratura no CP 7 onde o corpo de prova quebrou	65
Figura 41 - Calcita preenchendo a fratura do CP 7	66
Figura 42 - MEV da seção polida da amostra de carvão.	67
Figura 43 - MEV da seção polida.	67
Figura 44 - MEV da seção polida	68
Figura 45 - Fraturamento regular no carvão, geometria ortogonal dos <i>cleats</i>	68
Figura 46 - Imagem obtida no MEV mostrando preenchimento dos <i>cleats</i>	69
Figura 47 - Imagem tomográfica das amostras CP 5 em (a) e CP 7 em (b)	70
Figura 48 - Imagem obtida através do microtomógrafo com amostra irregular do carvão	71
Figura 49 - (a) Localização dos pontos A e E sobre o nódulo de pirita; (b) Pontos onde foram realizadas as leituras	71
Figura 50 - Envoltórias de tensões plotadas no gráfico $p \times q$	75
Figura 51 - Distribuição do coeficiente de <i>Poisson</i> contra módulo de elasticidade	76
Figura 52 - Curvas tensão-deformação do ensaio triaxial realizado no CP 4	77
Figura 53 - Nódulos de pirita no CP 4	77
Figura 54 - Tomografia realizada nos corpos de prova antes do ensaio	78
Figura 55 - Ensaio triaxial realizado no CP 2 com tensão confinante de 1 MPa	79

Figura 56 - Ensaio realizado no CP 4 com tensão confinante de 2,5 MPa	80
Figura 57 - Ensaio realizado no CP 1 com tensão confinante de 14 MPa	80
Figura 58 - Comportamento deformação volumétrica-deformação axial com ciclo de carga-descarga e recarga	81
Figura 59 - (a) Curvas tensão-deformação axial; (b) curvas deformação volumétrica-deformação axial para o carvão	82
Figura 60 - Superfície de ruptura do CP 3 com tensão confinante de 3 MPa	83
Figura 61 - Superfície de ruptura do CP1 com tensão confinante de 14 MPa	84
Figura 62 - Carta de ensaio hidrostático	85
Figura 63 - Curvas de compressibilidade <i>Bulk</i> do carvão – amostra CP 12	85
Figura 64 - Carta de ensaio hidrostático cíclico realizado - amostra CP 13	87
Figura 65 - Curvas de compressibilidade <i>Bulk</i> do carvão – amostra CP 13	88
Figura 66 - Trajetória de tensões passando pela curva de fechamento	89
Figura 67 - Ensaio triaxiais com tensão confinante de 14 MPa, sendo um com efeito da compactação.	90
Figura 68 - Método de Casagrande para obtenção da tensão de pré-adensamento	91
Figura 69 - Curvas tensão-deformação dos ensaios com 14 MPa de tensão confinante	92
Figura 70 - Envoltória de ruptura de acordo com o critério de Mohr-Coulomb	93
Figura 71 - a) Plano de ruptura do CP 3 com tensão confinante de 5 MPa. (b) Plano de ruptura do CP 1 com tensão confinante de 14 MPa.	94
Figura 72 - Curvas tensão-deformação – Tensão confinante de 5 MPa	95
Figura 73 - Curvas tensão-deformação – Tensão confinante de 14 MPa	96
Figura 74 - Curvas tensão-deformação – Tensão confinante de 20 MPa	96
Figura 75 - Curvas tensão-deformação - Ensaio hidrostático cíclico	97
Figura 76 - Superfícies de ruptura referentes aos modelos de Mohr-Coulom e Lade-Kim com superfície de fechamento em um ensaio hidrostático de 20 MPa	97
Figura 77 - Representação gráfica da trajetória desviadora com $\sigma_3 = 14$ MPa junto às envoltórias de Lade-Kim	98

Lista de tabelas

Tabela 1 - Ensaio realizados nos corpos de prova	54
Tabela 2 - Características dos corpos de prova preparados	57
Tabela 3 - Resultados do ensaio de micropermeamtria	72
Tabela 4 - Resultado do ensaio de micropermeamtria sobre a amostra retangular	72
Tabela 5 - Resultados obtidos no porosímetro de mercúrio	73
Tabela 6 - Parâmetros elásticos e de deformabilidade obtidos nos ensaios triaxiais	74
Tabela 7 - Resultados das deformações plásticas da amostra CP13	86
Tabela 8 - Parâmetros do modelo de Lade-Kim	94