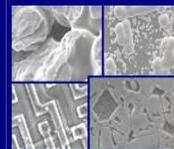




PUCRS

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E  
TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

Faculdade de Engenharia  
Faculdade de Física  
Faculdade de Química



PGETEMA

**APLICAÇÃO DE TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE RAIOS-X  
PARA ESTUDO DO SISTEMA DE *CLEATS* DE CARVÃO DA JAZIDA  
DE LEÃO-BUTIÁ, NA MINA DO LEÃO II, RS**

**ADRIANO NUNES DOS SANTOS**

ENGENHEIRO AMBIENTAL

**DISSERTAÇÃO PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM  
ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

**Porto Alegre**

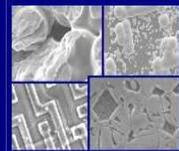
**Dezembro, 2011**



PUCRS

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E  
TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

Faculdade de Engenharia  
Faculdade de Física  
Faculdade de Química



PGETEMA

**APLICAÇÃO DE TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE RAIOS-X  
PARA ESTUDO DO SISTEMA DE *CLEATS* DE CARVÃO DA JAZIDA DE  
LEÃO-BUTIÁ, NA MINA DO LEÃO II, RS**

**ADRIANO NUNES DOS SANTOS**

Engenheiro Ambiental

ORIENTADOR: PROF. DR. JOÃO MARCELO DE MEDINA KETZER

Dissertação de Mestrado realizada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais (PGETEMA) da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Tecnologia de Materiais.

**Porto Alegre  
Dezembro, 2011**

**Título:**

APLICAÇÃO DE TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE RAIOS-X  
PARA ESTUDO DO SISTEMA DE *CLEATS* DE CARVÃO DA JAZIDA  
DE LEÃO-BUTIÁ, NA MINA DO LEÃO II, RS.

**Programa:**

Rede Temática - Tecnologias Para Mitigação das Mudanças Climáticas

**Instituição Credenciada Executora:**

Centro de Excelência em Pesquisa e Inovação Sobre Petróleo,  
Recursos Minerais e Armazenamento de Carbono (CEPAC) e Instituto  
do Meio Ambiente (IMA)

**Coordenador (a):** Professor Dr. João Marcelo de Medina Ketzer

O sucesso tem sido  
“sempre” um grande  
mentiroso.

(Friedrich Nietzsche)

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho a Miguel Nunes e Maria Auxiliadora, meus admiráveis pais, que sempre muito justos e corretos, serviram de modelo e ensinaram aos seus filhos o valor das coisas e das pessoas.

## **AGRADECIMENTO**

Agradeço aos familiares pelo apoio incondicional em todos os momentos e, também, aos meus sempre presentes e queridos amigos, que reservaram tempo em suas vidas para me ajudar, motivar nas horas difíceis e comemoraram comigo cada pequena conquista, uma verdadeira doação.

Agradeço a todos os professores que me auxiliaram neste caminho pela busca do conhecimento e ao professor e orientador Dr. João Marcelo de Medina Ketzer que contribuiu enormemente para o sucesso deste trabalho.

Finalmente agradeço a Deus por me guiar nesse caminho e ter me proporcionado a capacidade de enxergar os melhores anjos desse mundo, os que vivem me lembrando que a felicidade não precisa de motivo.

## SUMÁRIO

<b>DEDICATÓRIA .....</b>	<b>5</b>
<b>AGRADECIMENTO .....</b>	<b>6</b>
<b>SUMÁRIO .....</b>	<b>7</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>8</b>
<b>LISTA DE QUADROS .....</b>	<b>11</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS .....</b>	<b>12</b>
<b>LISTA DE ACRÔNIMOS .....</b>	<b>13</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>14</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>15</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>16</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>23</b>
2.1. Objetivos Específicos.....	23
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>24</b>
3.1. Aquíferos Salinos .....	24
3.2. Campos de Petróleo .....	25
3.3. Camadas de Carvão.....	26
3.3.1. Jazida do Leão-Butiá .....	33
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>36</b>
4.1. Materiais .....	36
4.2. Métodos .....	37
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>39</b>
5.1. Orientação .....	40
5.2. Espaçamentos.....	40
5.3. Quantidade, Comprimento e Permeabilidade.....	42
5.4. Volume de <i>Cleats</i> por Área .....	53
5.5. Erros.....	53
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>55</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>57</b>

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1: Evolução da temperatura média da superfície no século passado e projeções conforme cenários de estratégias globais de redução das emissões. A curva laranja corresponde a uma situação hipotética, mantendo-se a concentração dos GEE constantes. A curva vermelha corresponde à extrapolação da trajetória de emissões que vem sendo seguida pelo mundo hoje. A curva azul corresponde à proposta da União Européia de um consenso mundial. A curva verde corresponde a um cenário intermediário. (Quarto Relatório de Avaliação do IPCC, Grupo I, 2007). ..... 17
- Figura 1.2: Cunhas de estabilização das emissões dos gases de efeito estufa. (Modificado de Pacala e Socolow, 2004) ..... 19
- Figura 1.3: Opções de reservatórios geológicos para armazenamento de CO<sub>2</sub>. (Modificado do IPCC, 2005) ..... 21
- Figura 3.1: Diagrama mostrando a injeção de CO<sub>2</sub> em aquífero salino em que a capacidade de armazenamento é determinada pela pressão, temperatura, porosidade e volume da estrutura, caracterizado pela distância vertical entre o topo e a base da estrutura dômica. (Goraieb et al, 2005) ..... 25
- Figura 3.2: Diagrama mostrando que a recuperação avançada de óleo (EOR) tem início quando o CO<sub>2</sub> injetado se mistura com o petróleo, aumentando o volume, diminuindo a viscosidade e deslocando o óleo para o poço produtor, acarretando a produção do óleo adicional. (Modificado do IPCC, 2005)..... 26
- Figura 3.3: Diagrama mostrando os *cleats*. Visão dos *cleats* (a) em um plano da camada de carvão, e (b) perpendicularmente a camada de carvão. (Modificado de Laubach et al, 1998) ..... 29
- Figura 3.4: Diagrama mostrando a estrutura de poros do carvão com sistema de *cleats* e blocos de matriz. (Modificado de Shi e Durucan, 2005)..... 30
- Figura 3.5: Gráfico mostrando a relação entre a pressão e a permeabilidade absoluta do carvão. (Modificado de Shi e Durucan, 2005) ..... 30
- Figura 3.6: Imagem gerada pela tomografia computadorizada de raios-X (à esquerda) e logo após o seu processamento com a exclusão de suas imperfeições (à direita) revelando apenas os *cleats*. (Modificado de Mazumder et al, 2006) ..... 32

Figura 3.7: Exemplo de aplicação técnica de tomografia de raios-X para estudos de <i>cleats</i> de carvão. Apresentação dos dados de espaçamento entre os <i>face</i> (gráficos a e b) e <i>butt cleats</i> (gráficos c e d) em diferentes direções do plano. (Modificado de Mazumder et al, 2006) .....	32
Figura 3.8: Mapa da localização da Bacia do Paraná na América do Sul e depósitos de carvão no Rio Grande do Sul e Santa Catarina. O carvão estudado localiza-se na jazida de Leão-Butiá. (Modificado de Kalkreuth <i>et al.</i> , 2008) .....	34
Figura 4.1: Amostras de carvão procedentes da jazida de Leão-Butiá, utilizadas para os estudos de sistema de <i>cleats</i> . .....	36
Figura 4.2: Figura mostrando a metodologia do trabalho com imagens de tomografia de raios-X. ....	38
Figura 5.1: Exemplo de tomografia computadorizada de raios-X gerada para os estudos do sistema de <i>cleats</i> do carvão, nas quais é possível visualizar as diferenças nas representações da mesma amostra de carvão. ....	40
Figura 5.2: Gráfico representando o espaçamento entre os <i>face cleats</i> . ....	41
Figura 5.3: Gráfico representando o espaçamento entre os <i>butt cleats</i> . ....	41
Figura 5.4: Tomografia 1 e seu respectivo gráfico da quantidade de <i>cleats</i> versus a quantidade de pixels dos mesmos. ....	43
Figura 5.5: Tomografia 2 e seu respectivo gráfico da quantidade de <i>cleats</i> versus a quantidade de pixels dos mesmos. ....	43
Figura 5.6: Tomografia 3 e seu respectivo gráfico da quantidade de <i>cleats</i> versus a quantidade de pixels dos mesmos. ....	44
Figura 5.7: Tomografia 4 e seu respectivo gráfico da quantidade de <i>cleats</i> versus a quantidade de pixels dos mesmos. ....	44
Figura 5.8: Tomografia 5 e seu respectivo gráfico da quantidade de <i>cleats</i> versus a quantidade de pixels dos mesmos. ....	45
Figura 5.9: Tomografia 6 e seu respectivo gráfico da quantidade de <i>cleats</i> versus a quantidade de pixels dos mesmos. ....	45
Figura 5.10: Tomografia 7 e seu respectivo gráfico da quantidade de <i>cleats</i> versus a quantidade de pixels dos mesmos. ....	46

Figura 5.11: Tomografia 8 e seu respectivo gráfico da quantidade de <i>cleats</i> versus a quantidade de pixels dos mesmos. ....	46
Figura 5.12: Tomografia 9 e seu respectivo gráfico da quantidade de <i>cleats</i> versus a quantidade de pixels dos mesmos. ....	47
Figura 5.13: Tomografia 10 e seu respectivo gráfico da quantidade de <i>cleats</i> versus a quantidade de pixels dos mesmos. ....	47
Figura 5.14: Tomografia 11 e seu respectivo gráfico da quantidade de <i>cleats</i> versus a quantidade de pixels dos mesmos. ....	48
Figura 5.15: Tomografia 12 e seu respectivo gráfico da quantidade de <i>cleats</i> versus a quantidade de pixels dos mesmos. ....	48
Figura 5.16: Tomografia 13 e seu respectivo gráfico da quantidade de <i>cleats</i> versus a quantidade de pixels dos mesmos. ....	49
Figura 5.17: Tomografia 14 e seu respectivo gráfico da quantidade de <i>cleats</i> versus a quantidade de pixels dos mesmos. ....	49
Figura 5.18: Tomografia 15 e seu respectivo gráfico da quantidade de <i>cleats</i> versus a quantidade de pixels dos mesmos. ....	50
Figura 5.19: Tomografia 16 e seu respectivo gráfico da quantidade de <i>cleats</i> versus a quantidade de pixels dos mesmos. ....	50
Figura 5.20: Tomografia 17 e seu respectivo gráfico da quantidade de <i>cleats</i> versus a quantidade de pixels dos mesmos. ....	51
Figura 5.21: Tomografia 18 e seu respectivo gráfico da quantidade de <i>cleats</i> versus a quantidade de pixels dos mesmos. ....	51
Figura 5.22: Tomografia 19 e seu respectivo gráfico da quantidade de <i>cleats</i> versus a quantidade de pixels dos mesmos. ....	52

## LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1: Quadro comparativo dos principais recursos energéticos mundiais. (Modificado de Borba, 2001) .....	27
Quadro 5.1: Distribuição das imagens e dos <i>cleats</i> estudados. ....	39

## LISTA DE SÍMBOLOS

### UNIDADES

ppm	Concentração	parte por milhão
mD	Permeabilidade	mili Darcy
kV	Voltagem	quilo voltz
mA	Amplitude	miliampere
Gt	Massa	giga toneladas
MPa	Pressão	mega Pascal
°C	Temperatura	grau Celsius
px	Comprimento	pixel
cm	Comprimento	centímetro
mm	Comprimento	milímetro
µm	Comprimento	micrômetro
Å	Comprimento	ângstrom

### COMPOSTOS QUÍMICOS

CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
CH <sub>4</sub>	Metano
PFC	Perfluorocarbonos
HFC	Hidrofluorocarbonos
SF <sub>6</sub>	Hexafluoreto de Enxofre
CaCO <sub>3</sub>	Carbonato de Cálcio

## **LISTA DE ACRÔNIMOS**

GEE – Gases de efeito estufa

CEE-NU – Comissão Econômica para a Europa, das Nações Unidas.

## RESUMO

SANTOS, Adriano Nunes dos. **Aplicação de tomografia computadorizada para estudo do sistema de *cleats* de carvão da jazida de Leão-Butiá, na Mina do Leão II, RS.** Porto Alegre. 2011. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL.

O aquecimento global, decorrente do acúmulo de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, vem produzindo um aumento na temperatura média global e por meio de grandes projetos de engenharia pretende-se reduzir e estabilizar a concentração dos GEE na atmosfera, principalmente o CO<sub>2</sub>. Dentre as sete principais tecnologias para redução das emissões de GEE está a Captura e Armazenamento de Carbono (CCS), que consiste na captura, transporte e armazenamento de CO<sub>2</sub> em meios geológicos como, por exemplo, os aquíferos salinos, campos de óleo e gás e camadas de carvão não mineráveis. Este último por ser objeto de estudo deste trabalho foi detalhado e os procedimentos adotados para sua análise em camadas de carvão consistem em escanear duas amostras do Brasil por meio da tomografia computadorizada de raios-X, para obter imagens bidimensionais do sistema de *cleats* e melhor entender o fluxo de gases nas camadas. Esta ferramenta está sendo testada pela primeira vez em carvões do Brasil e seu entendimento é fundamental para o desenvolvimento de projetos de Coalbed Methane (CBM) e Enhanced Coalbed Methane (ECBM) no país que ainda é um potencial desconhecido, podendo aumentar a demanda de gás natural na matriz energética regional. A partir deste trabalho concluiu-se que os *cleats* das amostras de carvão estudadas são facilmente identificados e que é possível extrair dados relevantes sobre a orientação, espaçamento, comprimento e volume de *cleats* por área. Os *cleats* dos carvões estudados além de serem muito pequenos, se comparados com dados da literatura estrangeira, também estão preenchidos por carbonatos de cálcio, que dificulta o fluxo do CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> camada de carvão e reduz a permeabilidade do meio inviabilizando a implantação de projetos de armazenamento geológico de CO<sub>2</sub> na camada de carvão em estudo.

Palavras-Chaves: Carvão, armazenamento geológico, tomografia computadorizada de raios-X, *cleats*, CO<sub>2</sub>, Metano (CH<sub>4</sub>), CBM/ECBM, Leão-Butiá.

## ABSTRACT

SANTOS, Adriano Nunes dos. **Application of x-ray computed tomography to study the cleats system of coal deposit from Leão-Butiá, in Mina do Leão II, RS.** Porto Alegre. 2011. Master. Graduation Program in Materials Engineering and Technology, PONTIFICAL CATHOLIC UNIVERSITY OF RIO GRANDE DO SUL.

The global warming, due to the accumulation of greenhouse gases (GHG) emissions in the atmosphere, has been producing an increase in global mean temperature and by the large engineering projects, intended to reduce and stabilize the concentration of GHG in the atmosphere, especially CO<sub>2</sub>. Among the seven key technologies for reducing GHG emissions is the carbon capture and storage (CCS), which consists in capture, transport and storage CO<sub>2</sub> in geological media, for example, saline aquifers, oil and gas fields and non-mineable coal seams. The latter to be the object of the present study was detailed and the procedures adopted for the analysis in coal seams consist of scanning two samples of Brazilian coal by means of X-ray computed tomography images to obtain two-dimensional system containing the cleats and better understand the gas flow in the layers. This tool is being tested for the first time in coals of Brazil and it's fundamental to understanding the development of projects of Coalbed Methane (CBM) and Enhanced Coalbed Methane (ECBM) in the county, that is still an unknow potencial, wich could increase the demand for natural gas in the regional energy supply. From this work it was concluded that the cleats of coal samples studied are easily identified and it is possible to extract relevant data about orientation, spacing, length and volume of cleats per area. The cleats of the coals studied, however, are very small compared with data from foreign literature, are also filled with calcium carbonate, which hinders the CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> flow in the coal seam and reduces the permeability unfeasible to implement projects of geological storage of CO<sub>2</sub> in the coal seam from this study.

Key-words: Coal, geological storage, X-rays computed tomography, cleats, CO<sub>2</sub>, methane (CH<sub>4</sub>), CBM/ECBM, Leão-Butiá deposit.

## 1. INTRODUÇÃO

Mudanças climáticas que antes ocorriam em escala de milhares ou milhões de anos, hoje podem ser vistas em poucas décadas. Fenômenos anteriormente considerados essencialmente naturais tiveram sua ocorrência, e principalmente sua intensidade aumentadas num período em que a humanidade teve uma grande evolução tecnológica. Em sua busca por conforto, a humanidade tem afetado diretamente seu bem mais precioso: sua casa, a Terra (Cunha e Santarosa, 2006).

Estudos realizados pelo Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC, do inglês *Intergovernmental Panel on Climate Change*) indicam que o aquecimento global, decorrente do acúmulo de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, provocado por padrões não-sustentáveis de produção e consumo das atividades humanas, vem produzindo um aumento na temperatura média global do planeta de 0,8°C nos últimos 150 anos e o resultado são alterações no clima e suas conseqüências, como elevação do nível médio dos mares, disseminação de doenças tropicais, entre outros (MCT, 2007).

Estudos recentes resultaram numa série de projeções para as próximas centenas de anos e de acordo com a Figura 1.1, nota-se que o aumento da temperatura média global do planeta será ainda maior no futuro, podendo chegar a 4°C até o final deste século (IPCC, 2007).

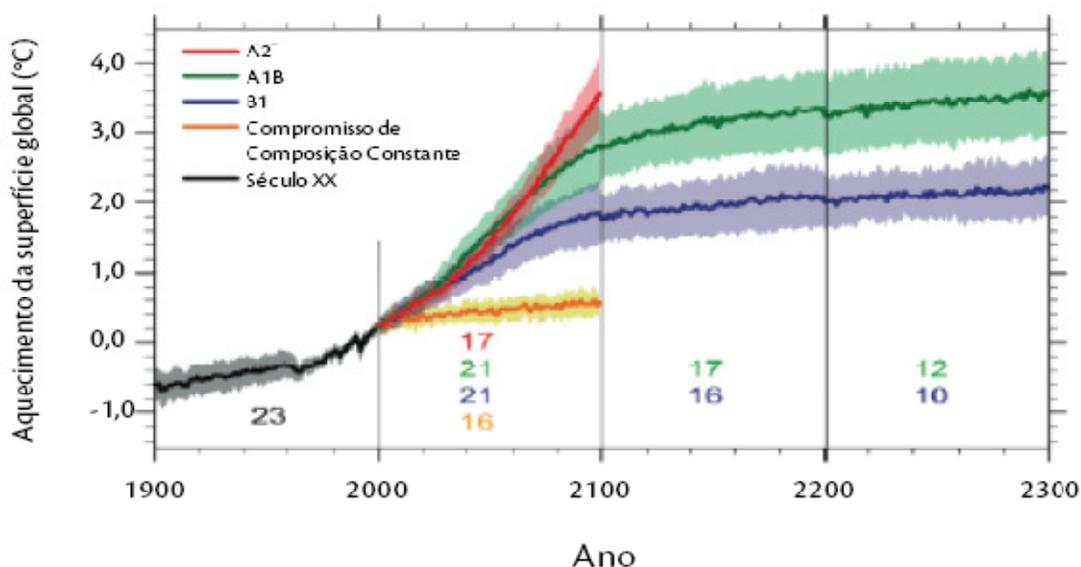


Figura 1.1: Evolução da temperatura média da superfície no século passado e projeções conforme cenários de estratégias globais de redução das emissões. A curva laranja corresponde a uma situação hipotética, mantendo-se a concentração dos GEE constantes. A curva vermelha corresponde à extrapolação da trajetória de emissões que vem sendo seguida pelo mundo hoje. A curva azul corresponde à proposta da União Européia de um consenso mundial. A curva verde corresponde a um cenário intermediário. (Quarto Relatório de Avaliação do IPCC, Grupo I, 2007).

Cada um dos quatro cenários apresentados na Figura 1.1 é acompanhado da incerteza associada, representada pelo sombreado da linha mais sólida. Os diferentes cenários correspondem ao resultado do arbítrio humano em termos de escolha das emissões no futuro (CGEE, 2008).

O cenário representado pela cor laranja corresponde a uma situação hipotética, em que a concentração atmosférica dos GEE será mantida constante no futuro e está estabilizada desde 2007. Percebe-se que a temperatura continuaria subindo, embora lentamente, porque os GEE já emitidos na atmosfera ainda continuarão lá por séculos (CGEE, 2008).

Os outros cenários correspondem a previsões de emissões futuras, desenvolvidos pelo IPCC. A curva representada pela cor vermelha corresponde à simples extrapolação da trajetória de emissões que vem sendo seguida pelo mundo hoje, na ausência de medidas para conter tais emissões. A curva representada pela cor azul corresponde à proposta da União Européia a todos os países, de limitar o

aumento da temperatura média global em 2°C em meados do século XXI. A curva representada pela cor verde corresponde a um cenário intermediário (CGEE, 2008).

As principais atividades industriais emissoras de GEE são: geração de energia pela queima de combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás natural), desmatamento, produção de cimento, refino e siderurgia, que produzem emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>); decomposição anaeróbica de matéria orgânica, com emissões de metano (CH<sub>4</sub>) em aterros sanitários e na pecuária; uso de fertilizantes nitrogenados, que produz emissões de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O); e outros processos industriais que emitem perfluorocarbonos (PFC), hidrofluorocarbonos (HFC) e hexafluoreto de enxofre (SF<sub>6</sub>), entre outros (CGEE, 2008).

De acordo com o IPCC (2007), a concentração atmosférica global de dióxido de carbono aumentou de um valor pré-industrial de cerca de 280 ppm para 379 ppm em 2005. A taxa de aumento da concentração anual de dióxido de carbono foi mais elevada durante os últimos 10 anos, (média de 1995 a 2005: 1,9 ppm por ano) do que desde o início das medições atmosféricas diretas contínuas (média de 1960 a 2005: 1,4 ppm por ano) e o forçamento radiativo do dióxido de carbono aumentou em 20% de 1995 a 2005, a maior mudança em uma década nos últimos 200 anos (IPCC, 2007; CGEE, 2008).

Mundialmente a queima de combustíveis fósseis é responsável por 66% das emissões dos GEE para a atmosfera. (IEA, 2007). Muitas alternativas vêm sendo propostas para reduzir e estabilizar a concentração dos GEE na atmosfera, principalmente o CO<sub>2</sub>, por ser o gás de efeito estufa antrópico de maior importância em termos de volume de emissões. Parte da solução pode estar no emprego do sequestro de carbono, tanto por meio do (1) armazenamento de carbono na biomassa por reflorestamento e/ou aflorestamento (na fase de crescimento, as árvores demandam uma quantidade muito grande de carbono para se desenvolver e acabam tirando esse elemento do ar) como por meio do (2) armazenamento oceânico ou geológico de milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> produzidos por processos industriais (Cunha e Santarosa, 2006).

Dentre as sete principais tecnologias para redução das emissões de GEE (Figura 1.2) representadas por cunhas de estabilização, propostas por Pacala e Socolow (2004), estão:

- Eficiência energética;
- Uso de energias renováveis;
- Descarbonização dos combustíveis fósseis;
- Uso do hidrogênio;
- Energia nuclear;
- Reflorestamento;
- Captura e armazenamento de carbono (CCS, do inglês *Carbon Capture and Storage*), que consiste na captura, transporte e armazenamento de CO<sub>2</sub> em reservatórios geológicos como, por exemplo, os aquíferos salinos, campos de óleo e gás e camadas de carvão não mineráveis (Figura 1.3).

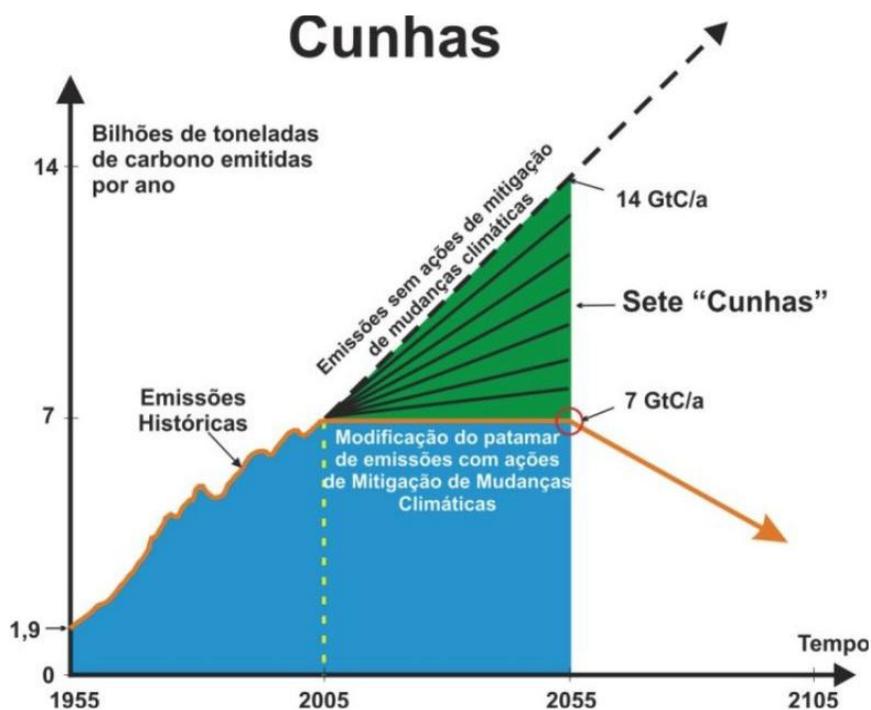


Figura 1.2: Cunhas de estabilização das emissões dos gases de efeito estufa.  
(Modificado de Pacala e Socolow, 2004)

Existem muitos mecanismos de aprisionamento de CO<sub>2</sub> em reservatórios geológicos. Bachu *et al.* (2007) apud Ketzer *et al.* (2009) destaca que o

armazenamento se dá principalmente por aprisionamento: (1) estratigráfico e preenchimento estrutural, (2) hidrodinâmico, (3) residual, (4) iônico ou por dissolução e (5) mineral.

Os aquíferos salinos têm grande potencial para o armazenamento de CO<sub>2</sub> devido à estabilidade durante longo tempo, profundidade adequada, água de formação com alta salinidade, ampla distribuição geográfica e grande capacidade de armazenamento (aproximadamente 10.000 Gt de CO<sub>2</sub> de capacidade global) (Bachu e Adams, 2003).

O armazenamento de CO<sub>2</sub> em reservatórios de petróleo por sua vez, promove uma recuperação adicional de 10-15% de óleo quando o CO<sub>2</sub> é injetado nesses campos. Esse processo é denominado Recuperação Avançada de Petróleo (EOR, do inglês *Enhanced Oil Recovery*) e se inicia quando o CO<sub>2</sub> injetado se mistura com o petróleo, provocando o “inchamento” do óleo e diminuindo a viscosidade, facilitando assim o fluxo para os poços produtores (NETL, 2009).

E por fim, as camadas de carvão não mineráveis, são assim denominadas por serem muito profundas e/ou muito finas para serem economicamente mineradas. A falta de incentivos governamentais, procedentes de graves problemas orçamentários da União no final dos anos oitenta, fez com que as autoridades se desinteressassem pelo carvão, ocasionando a desregulamentação do setor carbonífero, fixação dos preços pelo mercado e a retirada dos subsídios ao transporte de carvão (seu grande fator de competitividade frente ao óleo combustível) ocasionando a estabilização da produção brasileira de carvão no patamar de consumo do parque termelétrico já instalado (Borba, 2001). Alternativas não convencionais de uso do carvão como CBM (do inglês, *Coalbed Methane recovery*) e ECBM (do inglês, *Enhanced Coalbed Methane recovery*), por exemplo, podem viabilizar o uso desse recurso no país. Esta última técnica consiste na obtenção do gás metano (CH<sub>4</sub>) concomitante com o armazenamento permanente do CO<sub>2</sub> injetado numa camada de carvão. O armazenamento de CO<sub>2</sub> em camadas de carvão, objeto deste estudo, será detalhado no item 3.3.

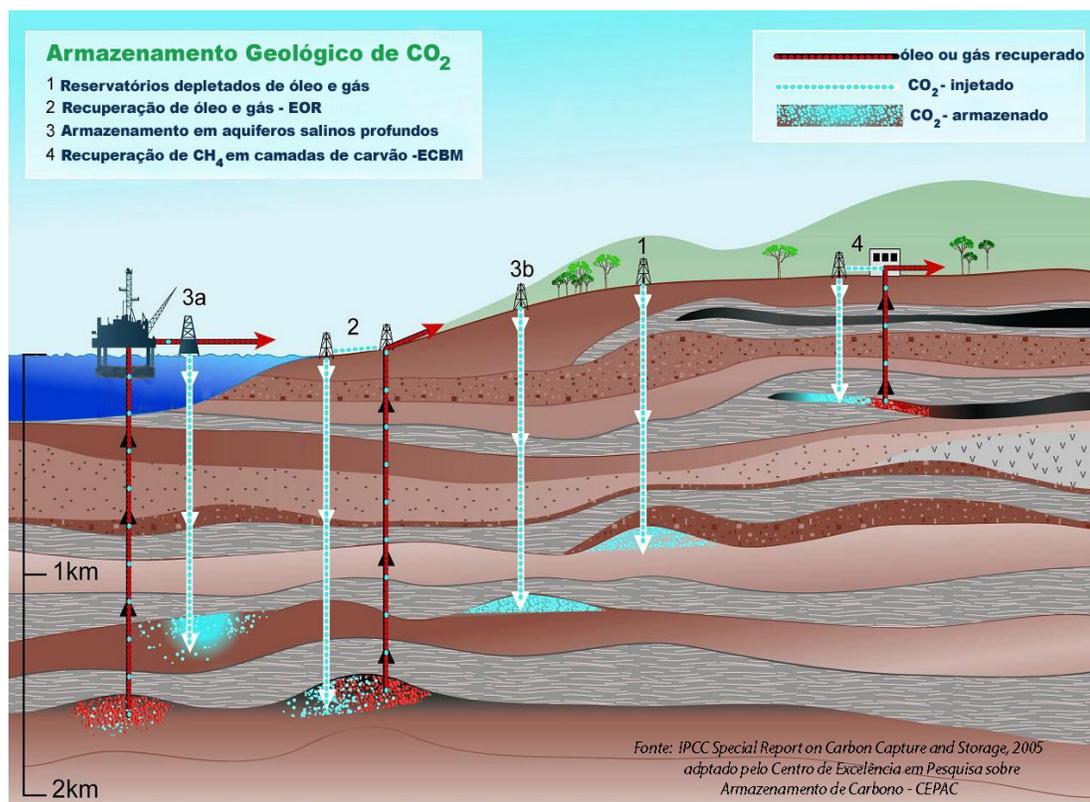


Figura 1.3: Opções de reservatórios geológicos para armazenamento de CO<sub>2</sub>. (Modificado do IPCC, 2005)

O estudo dos *cleats* é fundamental, pois permite conhecer o fluxo de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> na camada de carvão para o poço produtor (em projetos de CBM e ECBM) e injetor (em projetos de ECBM) respectivamente. Além de uma quantificação da proporção de gases armazenados nas fraturas com relação à quantidade armazenada na matriz do metano. O uso da técnica de tomografia pode proporcionar um estudo mais detalhado dos *cleats* do carvão, pois permite visualizar *cleats* e sua continuidade, que não são possíveis de identificar em determinadas amostras. Existem poucos estudos sobre tomografia de carvão no mundo. Estudos similares foram realizados na Europa e EUA, mas este será o primeiro trabalho realizado com 2 amostras de carvão do Brasil.

Neste contexto, o presente trabalho propõe o estudo detalhado dos *cleats* do carvão por meio de imagens obtidas com a tomografia computadorizada para, com isso, determinar a macroporosidade do carvão associada aos *cleats*, sua distribuição espacial, tamanho, conectividade, grau de preenchimento mineral e padrões de

orientação preferencial para um melhor entendimento do armazenamento e fluxo de gases nas camadas de carvão do Brasil. Este entendimento é fundamental para o desenvolvimento de projetos de CBM e ECBM no país.

## 2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é estudar 2 amostras de carvão da jazida de Leão-Butiá por meio de imagens obtidas com a tomografia computadorizada para, com isso, determinar o padrão de fraturas (*cleats*) incluindo as dimensões (comprimento e largura), volume de *cleats* por área e espaçamento, o gás potencial acumulado, seu potencial para armazenamento e melhor entender o fluxo de gases em uma camada de carvão num projeto de CBM e ECBM.

### 2.1. Objetivos Específicos

- Testar a ferramenta de tomografia de raios-X para identificação e quantificação dos *cleats* em carvão (avaliação de uma nova metodologia no Brasil).
- Avaliar a contribuição dos *cleats* no volume potencial de gás associado às camadas de carvão da jazida de Leão-Butiá para projetos de CBM e ECBM.
- Comparar com outros estudos de carvão que utilizaram a mesma técnica de tomografia de raios-X.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Reservatórios geológicos são altamente eficazes para aprisionar fluidos em profundidade e, portanto, o armazenamento geológico de CO<sub>2</sub> consiste em devolver o CO<sub>2</sub> proveniente de fontes antropogênicas para a litosfera, reduzindo emissões de gases de efeito estufa (Gozalpour et al, 2005).

A tecnologia de CCS consiste em separar os gases de exaustão produzidos pelas indústrias através de um sistema de captura que separam o CO<sub>2</sub> dos demais gases, em seguida é comprimido, transportado e depois injetado em um reservatório geológico apropriado, estes podem ser aquíferos salinos, campos de petróleo, ou camadas de carvão não mineráveis (Ketzer et al, 2011; Ketzer, 2006; Van Bergen et al, 2005).

#### 3.1. Aquíferos Salinos

Aquíferos salinos são rochas porosas saturadas de água com salinidade próxima a água do mar isso é, ca. 35.000 mg/L. Elas são muito mais extensas que os reservatórios de carvão ou campos de petróleo e têm grande potencial para o armazenamento de CO<sub>2</sub> devido à estabilidade durante longo tempo, profundidade adequada, ampla distribuição geográfica e grande capacidade de armazenamento (entre 1000 e 10.000 Gt de CO<sub>2</sub> de capacidade global) (Bachu e Adams, 2003; IPCC, 2005; NETL, 2009). A Figura 3.1 exibe uma representação do armazenamento geológico de CO<sub>2</sub> em aquífero salino.

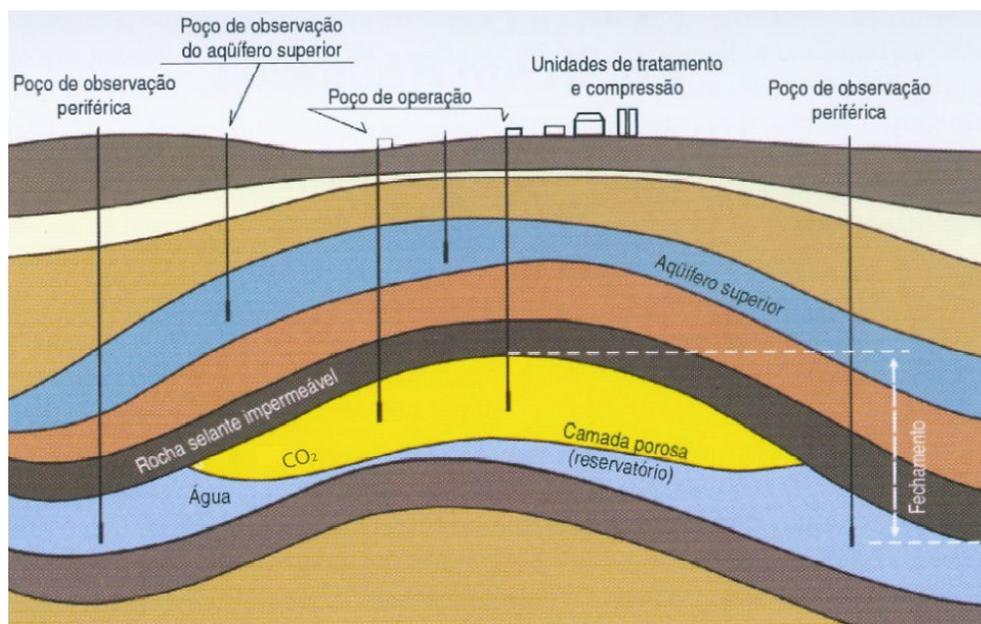


Figura 3.1: Diagrama mostrando a injeção de  $\text{CO}_2$  em aquífero salino em que a capacidade de armazenamento é determinada pela pressão, temperatura, porosidade e volume da estrutura, caracterizado pela distância vertical entre o topo e a base da estrutura dômica. (Goraieb et al, 2005)

### 3.2. Campos de Petróleo

Os campos de petróleo podem armazenar  $\text{CO}_2$  da mesma forma que gás e óleo. Esses possuem uma camada de rocha permeável logo abaixo de outra não permeável (selo), configuradas de tal forma que a camada não permeável forma uma armadilha que retém o óleo e o gás no local. Essas condições de aprisionamento também são favoráveis ao armazenamento de  $\text{CO}_2$  (Gozalpour et al, 2005).

Como é ressaltado na Figura 3.2, o  $\text{CO}_2$  injetado nesses campos pode produzir óleo adicional. Esse processo de recuperação avançada de petróleo (EOR, do inglês *Enhanced Oil Recovery*) se inicia quando o  $\text{CO}_2$  injetado se mistura com o petróleo, aumentando o volume e diminuindo a viscosidade, facilitando assim o fluxo para poços produtores. Essa injeção de  $\text{CO}_2$  permite uma recuperação adicional de 10-15% de óleo residual (Blunt et al, 1993; NETL, 2009).

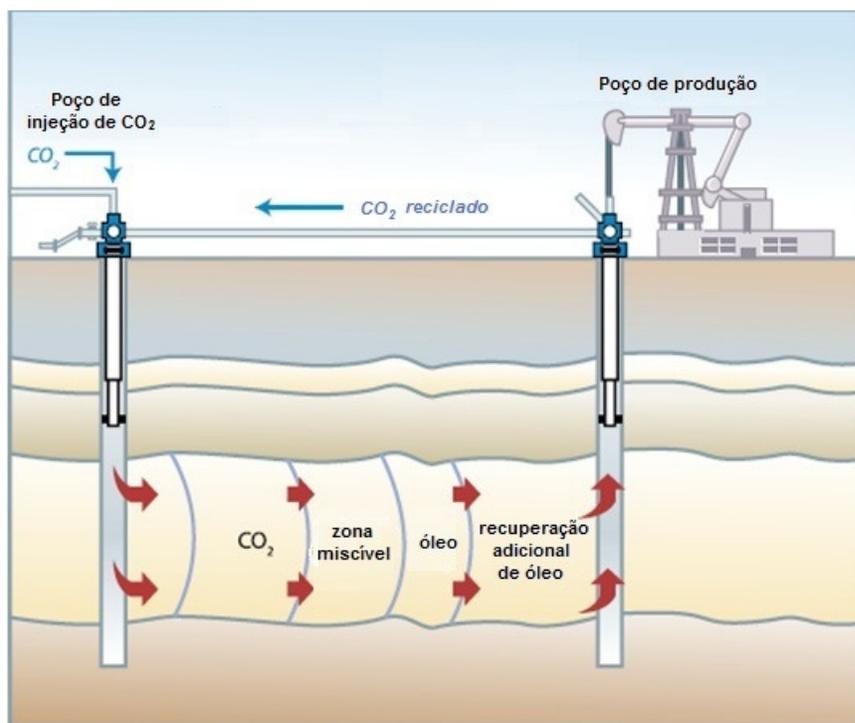


Figura 3.2: Diagrama mostrando que a recuperação avançada de óleo (EOR) tem início quando o  $\text{CO}_2$  injetado se mistura com o petróleo, aumentando o volume, diminuindo a viscosidade e deslocando o óleo para o poço produtor, acarretando a produção do óleo adicional. (Modificado do IPCC, 2005)

### 3.3. Camadas de Carvão

O carvão mineral, ou simplesmente carvão, é uma rocha orgânica sedimentar e combustível, derivada de vegetais superiores que se acumularam em ambientes redutores, como os pântanos (áreas alagadas). Com o tempo, os vegetais depositados foram cobertos por sedimentos, ocasionando soterramento, aumento de temperatura e pressão. Em um ambiente anóxico, os restos vegetais ao longo do tempo geológico se transformam, perdem material volátil e se enriquecem em carbono, num processo denominado carbonificação (Stach et al, 1982).

Dos diversos combustíveis convencionais produzidos e conservados pela natureza sob a forma fossilizada, o carvão é o mais abundante e com maior perspectiva de vida útil, sendo a longo prazo, a mais importante reserva energética mundial, conforme compara o Quadro 3.1 (Borba, 2001).

Quadro 3.1: Quadro comparativo dos principais recursos energéticos mundiais. (Modificado de Borba, 2001)

Recurso	Reservas mundiais (Mtce)	Vida útil estimada (anos)
<i>Carvão</i>	726.000	219
<i>Petróleo</i>	202.000	41
<i>Gás natural</i>	186.000	65

*Mtce = milhões de toneladas em carvão equivalente*

Por ser objeto de estudo deste trabalho, o carvão será detalhado a seguir.

Os carvões possuem diversos estágios de carbonificação, cuja proporção de carbono fixo aumenta à medida que o carvão se forma. Do menor para o maior *rank*<sup>1</sup>, destacam-se: turfa → linhito → (carvão) sub-betuminoso → (carvão) betuminoso → antracito. Quanto mais intensas a pressão e a temperatura e quanto mais tempo durar o processo de carbonificação, mais alto será o conteúdo de carbono fixo atingido, ou *rank* (Stach et al, 1982). O linhito pode incendiar-se espontaneamente e tem baixo poder calorífico; carvão sub-betuminoso é utilizado principalmente em estações geradoras (termelétricas); carvão betuminoso é o tipo mais comum e que, transformado freqüentemente em coque, tem amplo emprego industrial; antracito é um carvão lustroso, de combustão lenta (Stach et al, 1982).

Todo carvão tem quantidades variáveis de metano adsorvido à superfície de seus microporos, gerado durante o processo de formação do carvão (carbonificação) que pode ser de origem biogênica e/ou termogênica (Stach et al, 1982). Este metano pode ser produzido através da perfuração de poços na camada de carvão, ocasionadas pela descompressão da camada, que pode ser realizada por bombeamento de água de formação. O armazenamento de CO<sub>2</sub> pode ser economicamente rentável na mesma janela de profundidade da zona de produção

---

<sup>1</sup> Rank: É o grau de maturação do carvão nas séries naturais, de turfa a antracito. Medido através de parâmetros, os principais são a matéria volátil, poder calorífico e refletância da vitrinita. No Brasil, o alto teor de cinzas induz distorções nos resultados destes parâmetros, o que dificulta a comparação com carvões de outros países. (BIZZI et al, 2003; STACH et al, 1982).

do gás metano, entre 300 e 1500 m, e em carvões com permeabilidade moderada (1 a 5 mD), afirma Gale e Freund (2001). Logo após a despressurização e saída de água, tem início a produção de metano, fenômeno conhecido como recuperação de metano (CBM, do inglês *Coalbed Methane recovery*). Dependendo do tipo de carvão, é possível obter uma quantidade significativa de metano através da recuperação avançada de metano (ECBM, do inglês *Enhanced Coalbed Methane recovery*), que consiste na injeção de CO<sub>2</sub> na camada de carvão, analogamente ao EOR. A camada de carvão sofre variação dimensional e incha em contato com o CO<sub>2</sub>, modificando a abertura dos *cleats* e como consequência, reduzindo a permeabilidade do meio (Reeves et al, 2001; Day et al, 2010).

A adsorção é o principal mecanismo de fixação do metano (CH<sub>4</sub>) em uma camada de carvão à alta pressão e o processo de injeção de CO<sub>2</sub> nesta camada acelera a difusão do metano na matriz, dando início a um processo de sorção por substituição do metano (que ocorre naturalmente na camada) pelo CO<sub>2</sub> injetado devido à condição de adsorção preferencial, ocasionando a produção do gás livre (CH<sub>4</sub>). Os *cleats* estão diretamente relacionados com a circulação de fluidos no carvão e com a permeabilidade destes, no entanto, os *cleats* podem estar preenchidos, reduzindo consideravelmente a permeabilidade do carvão.

O CO<sub>2</sub> armazenado no carvão pela adsorção em sua matriz corresponde aproximadamente a 95-98% do total de gás no reservatório, o restante provém do aprisionamento físico em seus *cleats* (Laubach et al, 1998; Shi e Durucan, 2005).

Nas Figuras 3.3 e 3.4, observa-se que o carvão pode ser caracterizado por dois sistemas de porosidade distintos: (1) uma rede de fraturas naturais bem definidas e uniformes, também conhecida como *cleats*, que consistem em aberturas variando da ordem de milímetros (mm) a centímetros (cm) que permitem a circulação de fluidos e (2) blocos de matrizes contendo uma estrutura porosa altamente heterogênea entre os *cleats*, com aberturas da ordem de alguns ângstrons (Å) a micrometros (µm). Os *cleats* ainda podem ser subdivididos em *face cleat* (contínuos no reservatório) e *butt cleat* (descontínuos, terminando na interseção com o *face cleat*) (Shi e Durucan, 2005).

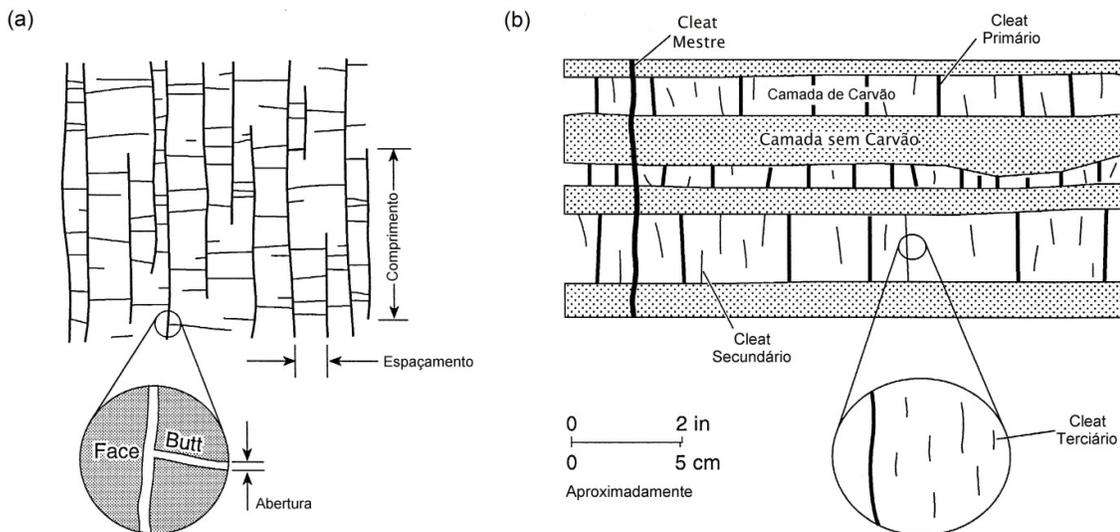


Figura 3.3: Diagrama mostrando os *cleats*. Visão dos *cleats* (a) em um plano da camada de carvão, e (b) perpendicularmente a camada de carvão. (Modificado de Laubach et al, 1998)

O comprimento dos *cleats* é medido paralelamente à superfície e a camada. A altura dos *cleats* é medida paralelamente a superfície e perpendicularmente a camada. A abertura dos *cleats* é medida perpendicularmente à superfície da fratura. O espaçamento é medido entre dois *cleats* de mesmo grupo. Os *cleats* subdividem-se em *face cleat* (contínuos no reservatório) e *butt cleat* (descontínuos, terminando na interseção com o *face cleat*).

O carvão possui uma característica peculiar no tocante a adsorção de gases e suas propriedades mecânicas, em que é possível perceber o encolhimento da matriz com a desorção do metano, causando redução da pressão e aumento da permeabilidade. Geralmente, o contrário é observado com a injeção de  $\text{CO}_2$  que causa inchamento, reduzindo o volume dos *cleats* e, conseqüentemente, reduzindo a permeabilidade do meio.

A Figura 3.5 ilustra o aumento da permeabilidade absoluta até o fator 7 numa camada de carvão com a redução da pressão de 5,5 para 0,07MPa (Shi e Durucan, 2005).

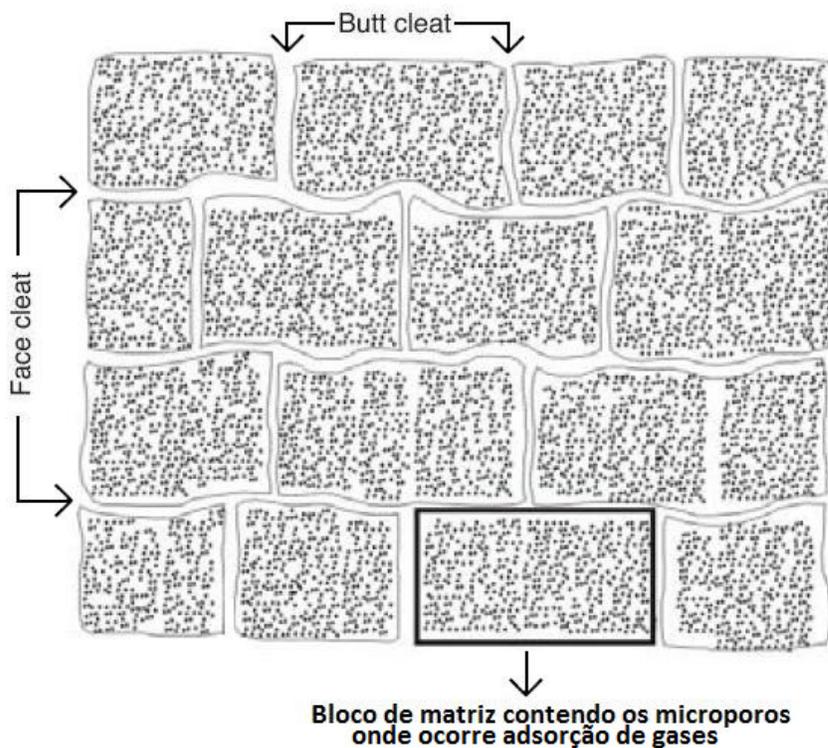


Figura 3.4: Diagrama mostrando a estrutura de poros do carvão com sistema de *cleats* e blocos de matriz. (Modificado de Shi e Durucan, 2005)

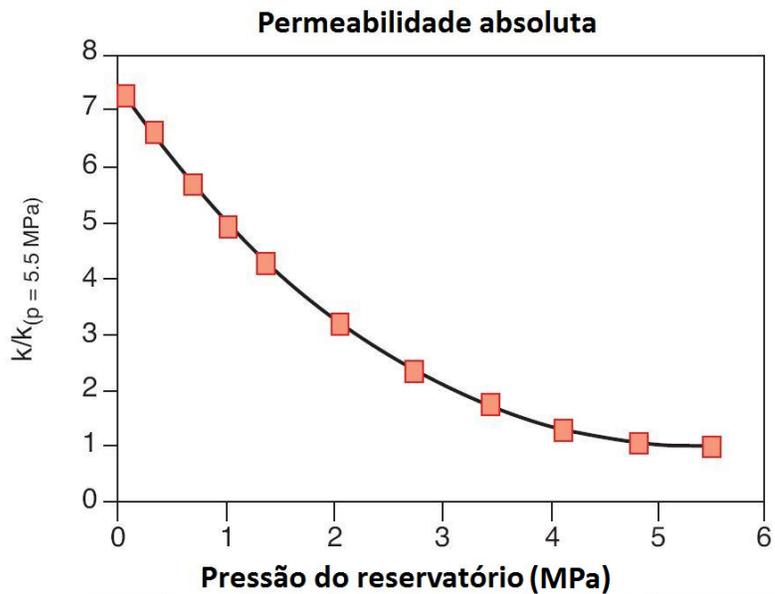


Figura 3.5: Gráfico mostrando a relação entre a pressão e a permeabilidade absoluta do carvão. (Modificado de Shi e Durucan, 2005)

Laubach *et al.* (1998) e Mazumder *et al.* (2006) reuniram trabalhos que destacam a existência da variação no espaçamento entre os *cleats* do carvão de acordo com o *rank*, decrescendo do linhito para o antracito, chegando a aproximadamente 22 cm no linhito e 0,2 cm no antracito. Também influenciam no espaçamento entre os *cleats* o tipo de carvão e o conteúdo de cinzas. Em síntese, o fluxo de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> na camada de carvão, será maior em carvões com menor espaçamento entre os *cleats* se estes não estiverem preenchidos por carbonatos de cálcio, pois possuirão maior circulação/permeabilidade.

Os *cleats* desempenham um papel importante na produção de metano em projetos de CBM/ECBM, pois são os grandes responsáveis pela circulação dos fluidos (CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>) na camada de carvão e são controlados pela permeabilidade. Baseado nesta premissa, estudos realizados por Mazumder *et al.* (2006) definiram uma nova técnica para a medição de *cleats* e estudo da distribuição do seu espaçamento na matriz do carvão por meio da tomografia computadorizada de raios-X. Através das imagens de tomografias é possível identificar os *cleats* e fazer sua contagem. A precisão desta técnica está relacionada com o tamanho do pixel e, conseqüentemente a imagem precisa estar em boa qualidade para se obter bons resultados.

A técnica consiste na obtenção de um grupo de imagens bidimensionais, obtidas com o auxílio de um tomógrafo de raios-X que escaneia a amostra de carvão para obter uma imagem de 512x512 pixels, com variação de cores do branco ao preto, passando por 256 tonalidades de cinzas, no formato RAW e JPEG em que cada pixel representa uma área de 0,7x0,7 mm e que, por meio de um software (QWIN<sup>TM</sup>) identifica e mede os espaçamentos entre os *cleats*. Devido à presença de imperfeições (linhas e manchas, por exemplo) as imagens podem ser processadas, por exemplo, com o software (Amira<sup>TM</sup>), a fim de suprimir detalhes irrelevantes ao estudo e ressaltar o contraste entre a matriz do carvão, seus *cleats* e a matéria mineral, para que a partir daí sejam realizadas as medições (Mazumder et al, 2006), como mostra a Figura 3.6.

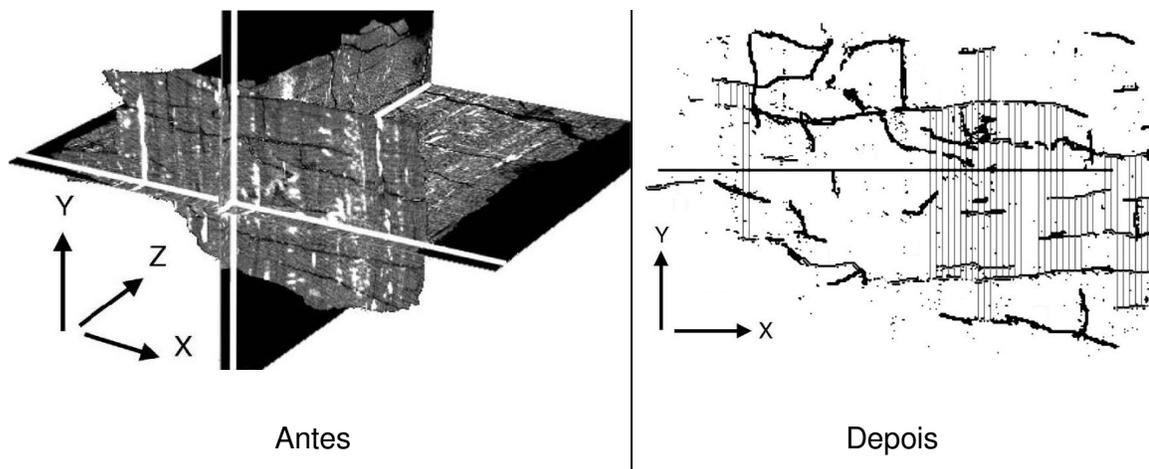


Figura 3.6: Imagem gerada pela tomografia computadorizada de raios-X (à esquerda) e logo após o seu processamento com a exclusão de suas imperfeições (à direita) revelando apenas os *cleats*.

(Modificado de Mazumder et al, 2006)

A partir das imagens de tomografia de raios-X, Mazumder *et al.* (2006) demonstram a possibilidade de estudo do *cleat* de carvão e utilizam um tratamento estatístico para a quantificação, estudo da orientação, espaçamento e dimensão das mesmas (Figura 3.7).

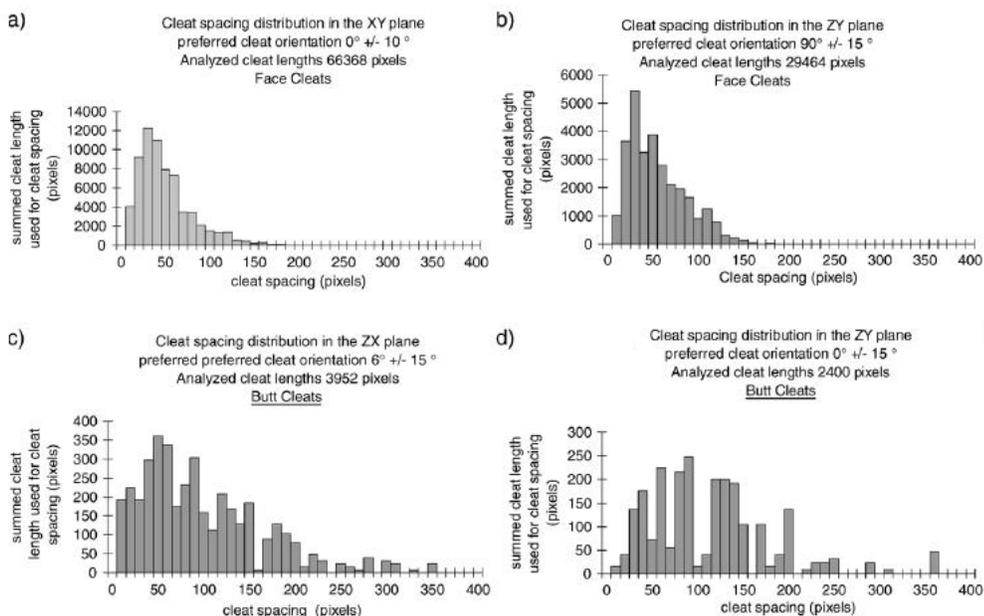


Figura 3.7: Exemplo de aplicação técnica de tomografia de raios-X para estudos de *cleats* de carvão. Apresentação dos dados de espaçamento entre os *face* (gráficos a e b) e *butt cleats* (gráficos c e d) em diferentes direções do plano. (Modificado de Mazumder et al, 2006)

### 3.3.1. Jazida do Leão-Butiá

A jazida de carvão de Leão-Butiá está localizada entre as cidades de Rio Pardo, Pântano Grande e Butiá, na região centro-leste do estado do Rio Grande do Sul, com uma superfície aproximada de 1.070 km<sup>2</sup>, nas folhas São Jerônimo, Butiá, Minas do Leão e Santa Cruz do Sul (Figura 3.8). Tendo sido uma jazida bastante lavrada há muitas décadas, existem muitas denominações locais, entre elas Recreio e Butiá Leste. Na verdade são partes claramente identificáveis do mesmo jazimento. Seus limites Sul, Oeste e Leste são bem definidos, enquanto que o limite Norte ainda apresenta indefinições, principalmente no setor Nordeste.

Na jazida de Leão-Butiá ocorrem sete camadas de carvão com grande continuidade lateral, denominadas S1, S2 e S3 (Superiores) e I1, I2, I3 e I4 (Inferiores), das quais a mais importante é a I, com 709 x 10<sup>6</sup>t, de um total de 2.442 x 10<sup>6</sup>t no depósito. A camada I apresenta espessuras médias ao redor de 1,80m, e tem um dos melhores *grade* entre as camadas brasileiras, com mais de 50% de rendimento para carvão com 35% de cinzas e 0,6% de enxofre. Na área da Mina de Recreio, as denominações das camadas não seguem esse critério, adotado pela CRM e CPRM, o conjunto das camadas S2 e S3 é chamado de camada superior (S) e a camada I é chamada de camada média (M).

Seu mergulho regional é para norte - noroeste, estando as áreas com menos de 50m de cobertura restritas ao setor sudeste da jazida e não significativas em termos globais, pois a jazida tem seu maior desenvolvimento sob coberturas entre 50m e 300m na região central e, ao norte e noroeste, superiores a 300m. Falhamentos e inversões de mergulho são geralmente de pequeno porte.

Nahuy (1973) e Correa da Silva *et al.* (1999) estudaram a composição do carvão das camadas superior e inferior, na Mina do Leão, bem como dados do poder refletor médio das vitrinitas.

Silva (1999) estudou cinco camadas e quatro leitos de carvão da sondagem D-193 realizada pela CRM na Jazida do Leão sob a ótica da petrografia de carvão. A

autora enfocou aspectos da composição petrográfica em termos de litotipos, macerais e microlitotipos, realizou análises químicas imediatas e elementares bem como medidas do poder refletor das vitrinitas para determinação do grau de carbonificação e definiu modelos de deposição dos carvões baseados nos índices petrográficos de gelificação e de preservação dos tecidos. Estes dados foram publicados em Silva & Kalkreuth (2005) e Silva, Kalkreuth e Holz (2008) que caracterizaram os carvões como tendo sido formados em ambientes límnicos e limnotelmáticos, em pântanos de águas abertas, com altos teores de macerais detríticos e argilo-minerais.

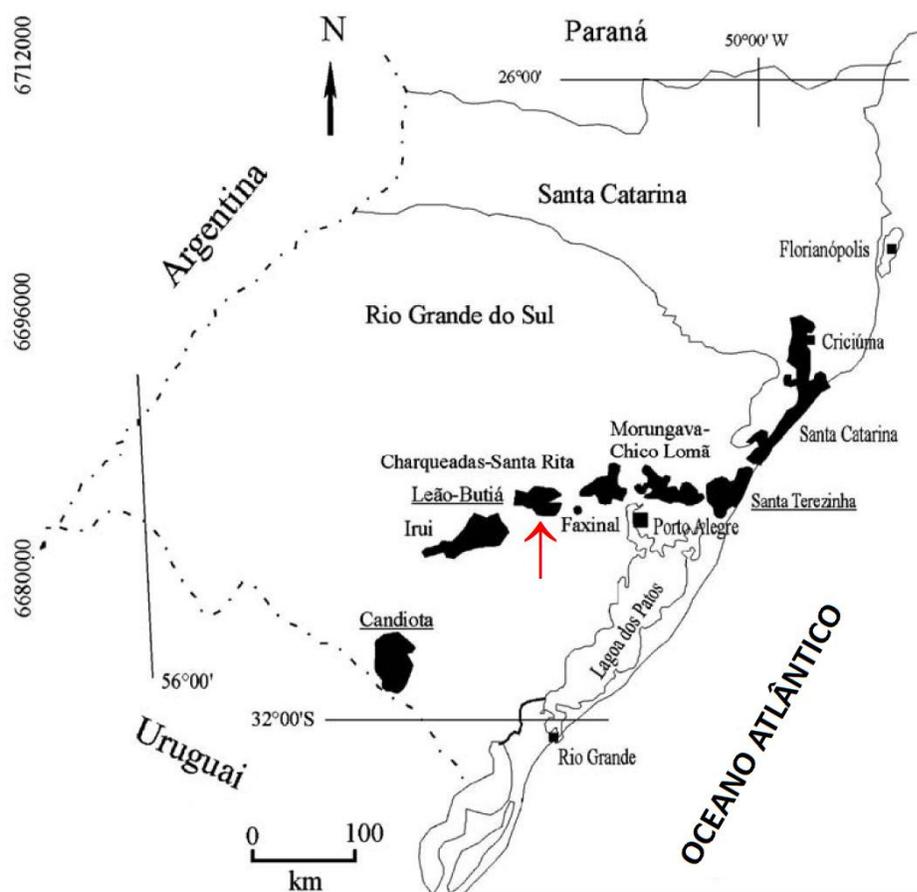


Figura 3.8: Mapa da localização da Bacia do Paraná na América do Sul e depósitos de carvão no Rio Grande do Sul e Santa Catarina. O carvão estudado localiza-se na jazida de Leão-Butiá. (Modificado de Kalkreuth *et al.*, 2008)

Com valores de poder refletor entre 0,40 e 0,51 % a camada inferior da Mina do Leão foi classificada por Correa da Silva *et al.* (2002) como Para-Betuminoso na classificação Internacional da CEE-NU.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. Materiais

Neste trabalho foram estudados os *cleats* de 2 amostras de carvão, procedentes da jazida de Leão-Butiá, na Mina do Leão II, camada S (superior) (Figura 4.1).



Figura 4.1: Amostras de carvão procedentes da jazida de Leão-Butiá, utilizadas para os estudos de sistema de *cleats*.

O tomógrafo utilizado nesse estudo é o *Multislice Lightspeed Ultra*, fabricado pela *General Electric Company* (GE). O sistema de imagens utiliza o software *eFilm Lite™* para reconstruir a amostra escaneada e as salva no formato JPEG. A faixa de

operação do tomógrafo é de 120kV e 180mA; a velocidade de varredura é de 6,25mm/s; a matriz de reconstrução é composta de 512x512 pixels e cada pixel no plano corresponde a uma área de aproximadamente 0,5x0,5 mm.

A contagem dos *cleats* e exame das imagens foram executados com a ajuda do software *Image Tool*, versão 3.0.

## 4.2. Métodos

Os métodos para atingir os objetivos propostos consistem em determinar a orientação e espaçamento dos *cleats* através de imagens sucessivas “em tomos” ou fatias da amostra, nas quais é possível visualizar os *cleats* presentes na amostra de carvão da jazida de Leão Butiá. Num primeiro momento foi realizada uma inspeção visual na amostra para identificação e estudo da orientação e preenchimento dos *cleats* com a matéria mineral. Em seguida as duas amostras de carvão foram escaneadas pelo tomógrafo de raios-X, obtendo-se imagens bidimensionais. Estas imagens não passaram por nenhum tipo de tratamento, desigual aos trabalhos similares já citados na revisão bibliográfica que utilizaram o software Amira™ para o processamento das imagens, uma vez que este recurso não estava disponível para os estudos.

Em cada imagem, o carvão, a matéria mineral [carbonatos, argilosminerais, sulfetos (piritas)] e os *cleats* são separados por distintos tons de cinzas devido as suas diferentes densidades. Na sua grande maioria, os pixels brancos correspondem aos *cleats* preenchidos com carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>), salvo algumas distorções causadas pela presença de pirita nas amostras de carvão, que refletem os raios-X, impedindo a obtenção de uma imagem clara e bem definida.

Logo após a obtenção das imagens utilizou-se o software *Image Tool* a fim de realizar a contagem dos *cleats*. A medição é feita com a ampliação da imagem até a visualização do pixel, a partir daí, faz-se a contagem dos *cleats* visíveis (apenas os pixels brancos), que são contabilizados de acordo com sua continuidade num mesmo *cleat*, ou seja, um mesmo *cleat* pode estar parcialmente preenchido e

apresentar descontinuidade ao longo do seu comprimento e por isso os *cleats* vazios se alternam com a matriz do carvão, mas fazem parte da mesma estrutura e, conseqüentemente, foram contabilizados como parte do mesmo *cleat* recebendo a denominação de “*cleats* somados” (Figura 4.2).

Além do comprimento e orientação dos *cleats*, o volume dos mesmos foi também estudado. Para o cálculo do volume de *cleats* por área, foram escolhidas 5 imagens representativas em uma mesma área de 50x50 pixels e medidos os *cleats* presentes na amostra de carvão, o que corresponde a aproximadamente 10% do total da imagem. A relação entre a área ocupada pelos *cleats*, com relação à área ocupada pela matriz do carvão nas imagens, foi utilizada para uma estimativa do volume ocupado pelos *cleats*.

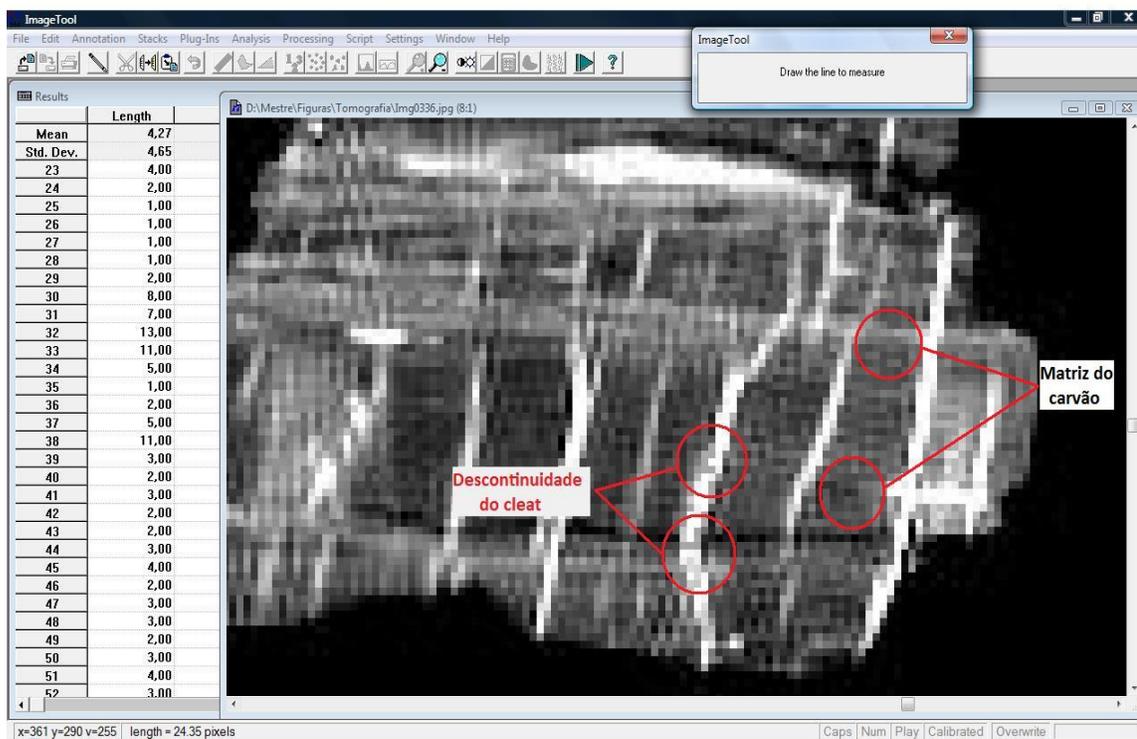


Figura 4.2: Figura mostrando a metodologia do trabalho com imagens de tomografia de raios-X.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram geradas 266 imagens a partir das duas amostras de carvão. Entretanto, apenas uma das amostras gerou imagens bem visíveis, o que correspondia a 106 imagens com qualidades aceitáveis. Em seguida foram escolhidas 19 imagens representativas, de acordo com a nitidez de cada uma, para servir como base de dados na realização dos estudos propostos (Quadro 5.1).

Quadro 5.1: Distribuição das imagens e dos *cleats* estudados.

Amostras	Número de imagens disponíveis	Número de imagens medidas	Número total de segmentos de <i>cleats</i>	Comprimento dos <i>face e butt cleats</i> somados (px)
1	106	19	27	335
2	160	x	x	x
Total	266			

As amostras de carvão foram escaneadas em uma direção do plano XY e todos os *cleats* relevantes dos diversos “tomos”, expressos em pixels. No entanto, vale lembrar que pixels não são domínios físicos e as medições dentro deste domínio podem ser inexatas, logo nenhuma medida pode ser verdadeira no nível do sub-pixel, incluindo o método descrito nesse trabalho e por isso serão apresentadas na unidade de pixel. Apesar da má qualidade das imagens adquiridas (Figura 5.1), ainda apresentavam maior resolução de pixels (0,5x0,5 mm) que às utilizadas nos estudos de Mazumder *et al.* (2006), 0,7x0,7 mm.

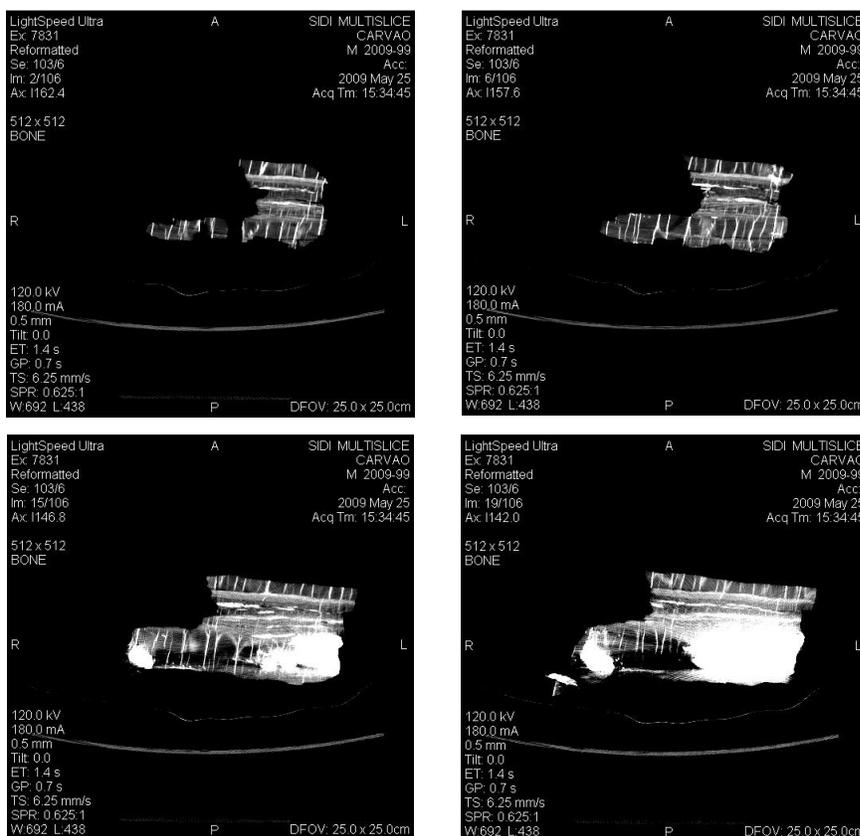


Figura 5.1: Exemplo de tomografia computadorizada de raios-X gerada para os estudos do sistema de *cleats* do carvão, nas quais é possível visualizar as diferenças nas representações da mesma amostra de carvão.

## 5.1. Orientação

Após a obtenção e análise das imagens identificou-se a orientação dos *cleats*, aqueles que se encontravam na horizontal (paralelas a laminação do carvão) foram classificados como os *face cleats* (contínuos na amostra) e na vertical como sendo os *butt cleats* (descontínuos, terminando na interseção dos *face cleats*). A orientação e classificação dos *butt e face cleats* foi complementada pela inspeção visual das amostras estudadas.

## 5.2. Espaçamentos

Conhecer o espaçamento entre os *cleats* do carvão é importante para o cálculo da implantação de projetos CBM e ECBM, pois permite conhecer a

conectividade entre seus *cleats* e a matriz, e desta forma prever o comportamento do fluxo de  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$  na camada de carvão do poço injetor para o produtor, respectivamente. As Figuras 5.2 e 5.3 representam os gráficos dos espaçamentos entre os *face* e *butt cleats*, medidos em pixels.

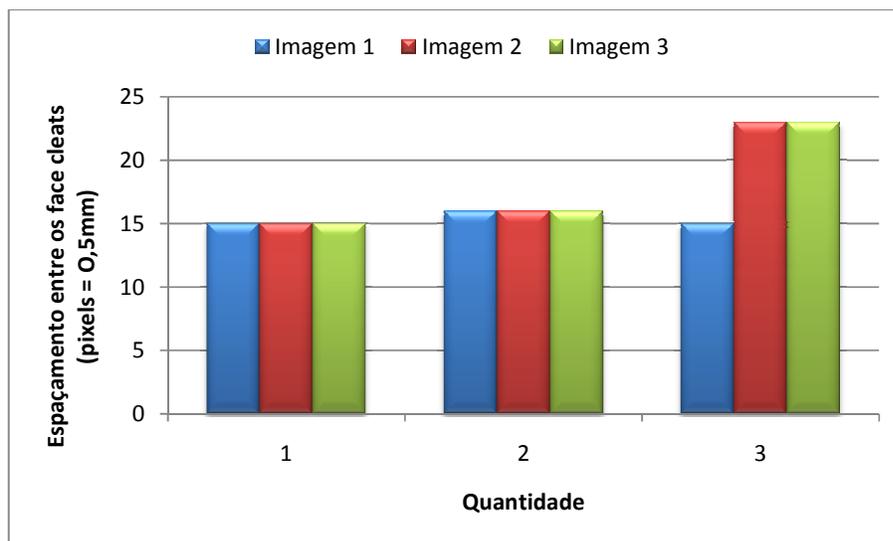


Figura 5.2: Gráfico representando o espaçamento entre os *face cleats*.

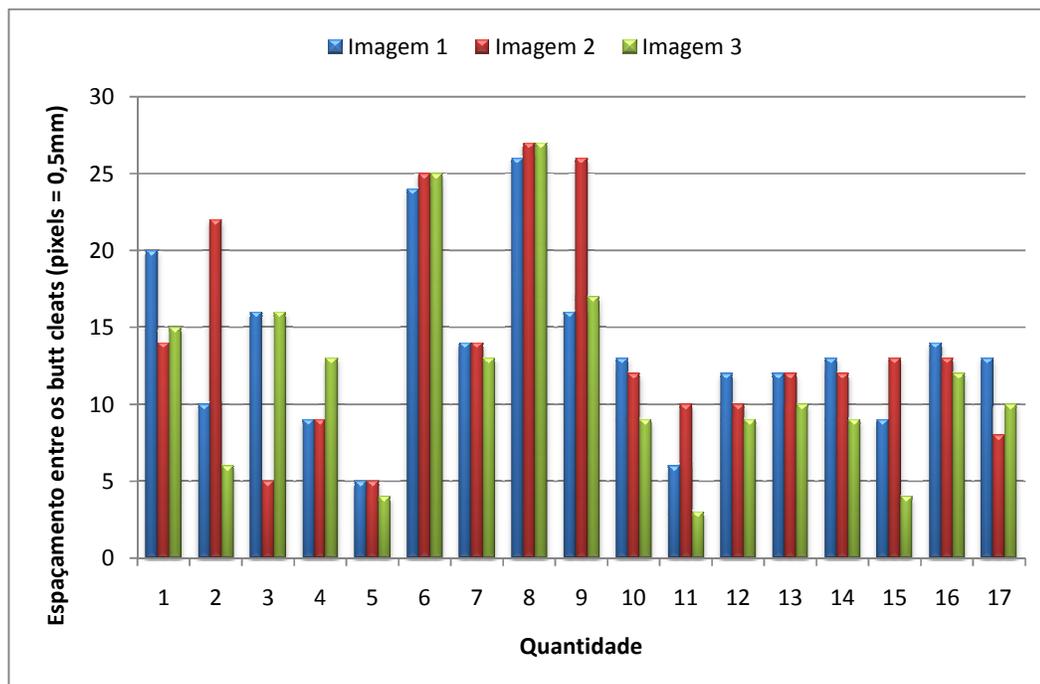


Figura 5.3: Gráfico representando o espaçamento entre os *butt cleats*.

### 5.3. Quantidade, Comprimento e Permeabilidade

Os resultados das tomografias computadorizadas de raios-X e de seus gráficos representativos, mostrando a quantidade de *cleats* encontrados na imagem e seus comprimentos estão disponíveis da Figura 5.4 até a Figura 5.22.

Comparada com carvões da França e da Polônia, descritos por Mazumder *et al.* (2006), a quantidade de *cleats* por unidade de área encontrados no carvão estudado é muito inferior, atingindo valores máximos de 27 segmentos de *cleats* (Figura 5.10) na amostra brasileira e de 8926 e 417 segmentos de *cleats* nas amostras francesa e polonesa, respectivamente. Além disso, o comprimento dos *cleats* do carvão brasileiro também é bem menor, chegando a valores máximos de 263 pixels para os *face cleats* (Figura 5.18) e de 72 pixels para os *butt cleats* (Figura 5.16), um total de 335 pixels (Quadro 5.1) contra 130.007 e 8.412 pixels nas amostras estrangeiras. Isto se deve possivelmente ao fato das amostras de carvão estudadas possuírem baixo grau de carbonificação e modelos de deposição diferentes, bem como um baixo *rank*. (Laubach *et al.*, 1998 e Mazumder *et al.*, 2006)

A quantidade e o comprimento dos *cleats* influenciam diretamente sobre a permeabilidade dos gases numa camada de carvão. Portanto, admitindo que os *cleats* estejam conectados e não estejam preenchidos, quanto maior a quantidade e o comprimento de seus *cleats* mais facilmente os gases circulam na camada.

Os *cleats* das amostras estudadas estão moderadamente conectados e é possível ver claramente tanto a olho nu, quanto nas imagens das tomografias que os *face e butt cleats* apresentam descontinuidade ao longo do seu comprimento por estarem preenchidos com carbonato de cálcio. Apesar de não terem sido feitos os testes de permeabilidade na camada de carvão estudada, sugere-se que resultariam em valores muito baixos (por exemplo, <1mD) dada a existência dos *cleats* preenchidos, implicando na possível não utilização desta camada para projetos de CBM e ECBM.

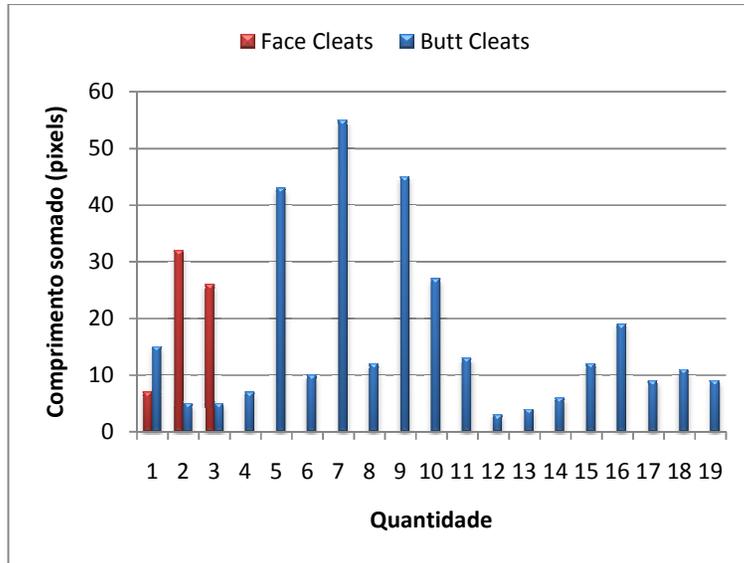
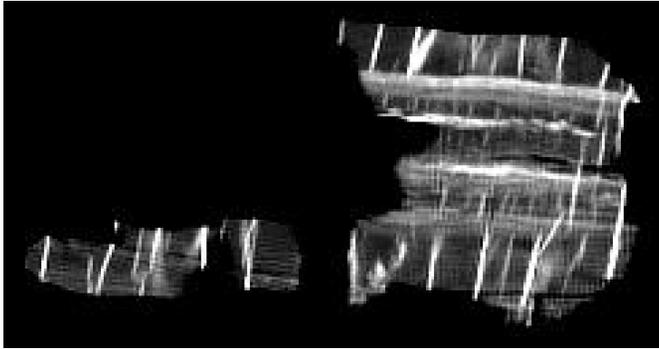


Figura 5.4: Tomografia 1 e seu respectivo gráfico da quantidade de *cleats* versus a quantidade de pixels dos mesmos.

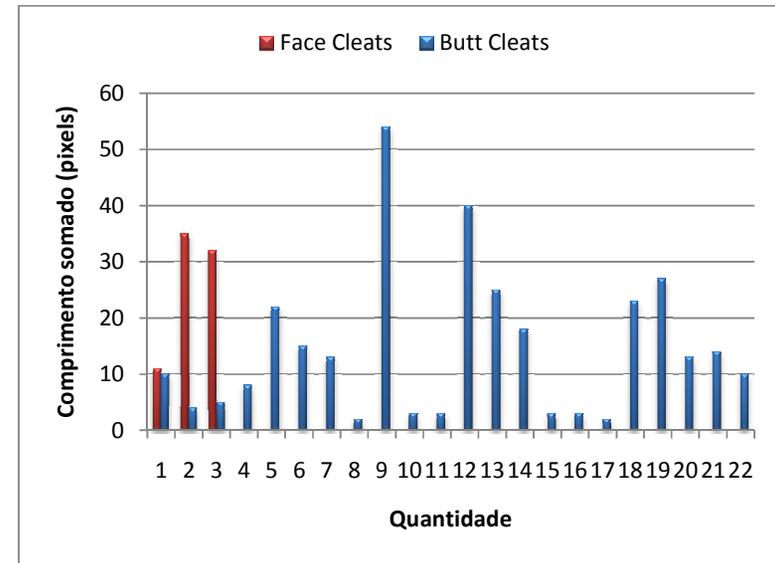
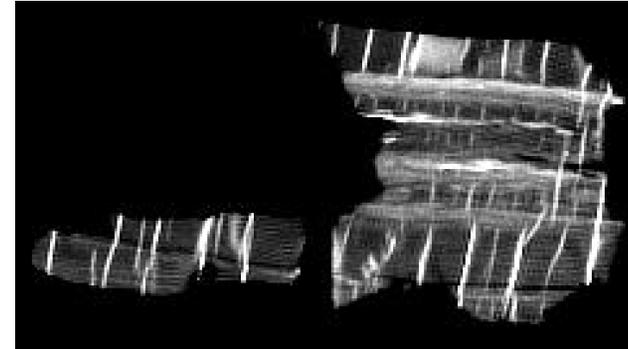


Figura 5.5: Tomografia 2 e seu respectivo gráfico da quantidade de *cleats* versus a quantidade de pixels dos mesmos.

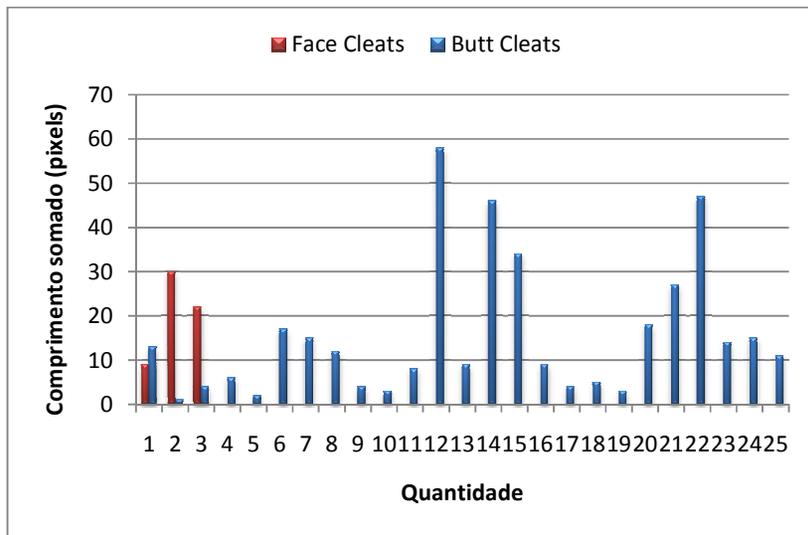
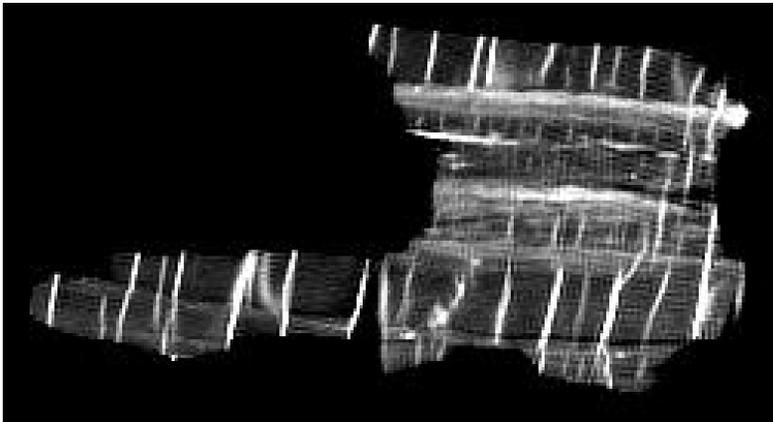


Figura 5.6: Tomografia 3 e seu respectivo gráfico da quantidade de *cleats* versus a quantidade de pixels dos mesmos.

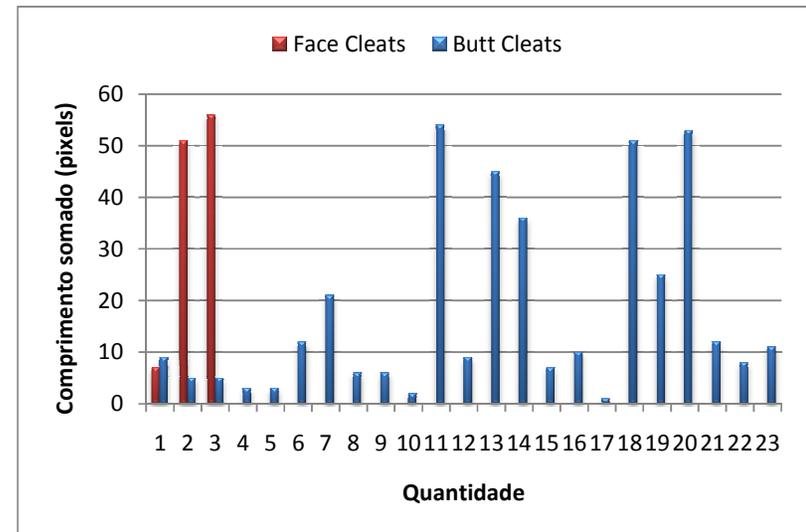
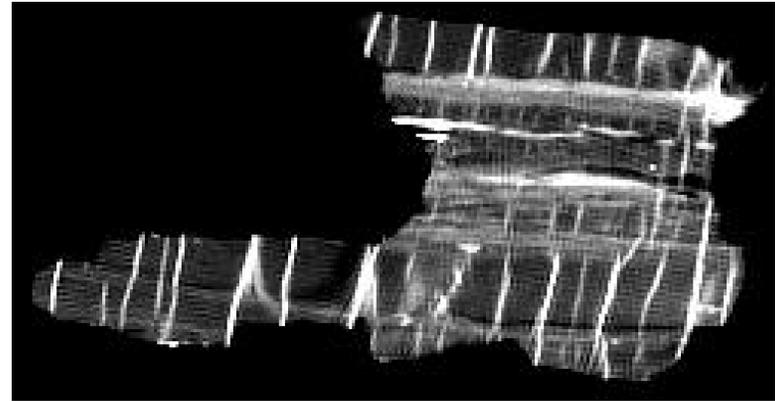


Figura 5.7: Tomografia 4 e seu respectivo gráfico da quantidade de *cleats* versus a quantidade de pixels dos mesmos.

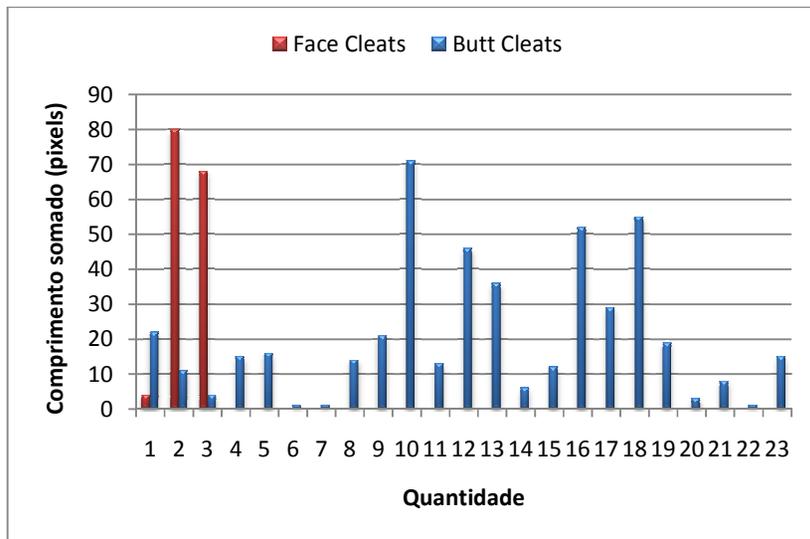
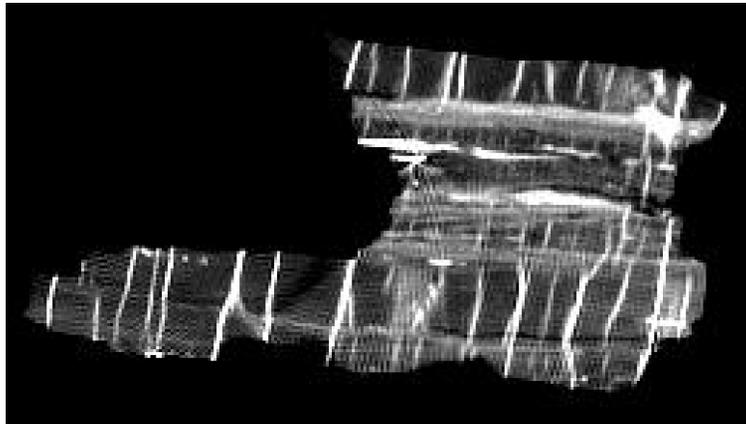


Figura 5.8: Tomografia 5 e seu respectivo gráfico da quantidade de *cleats* versus a quantidade de pixels dos mesmos.

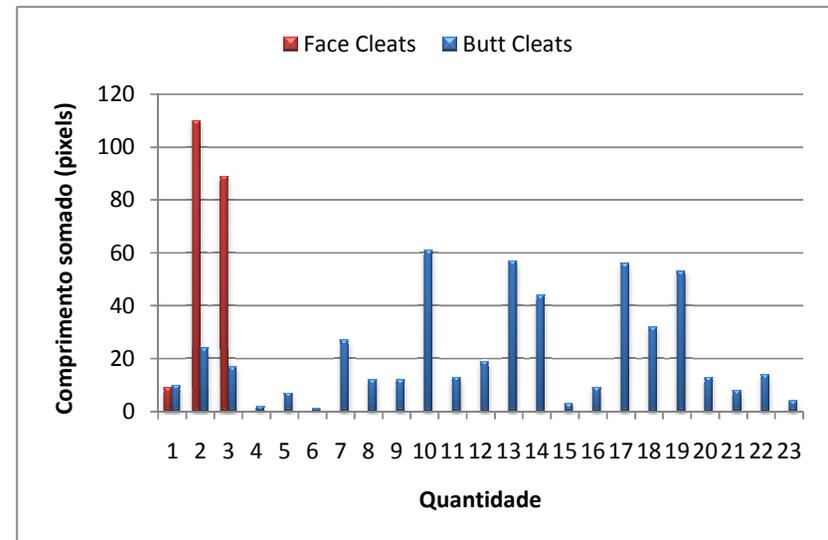
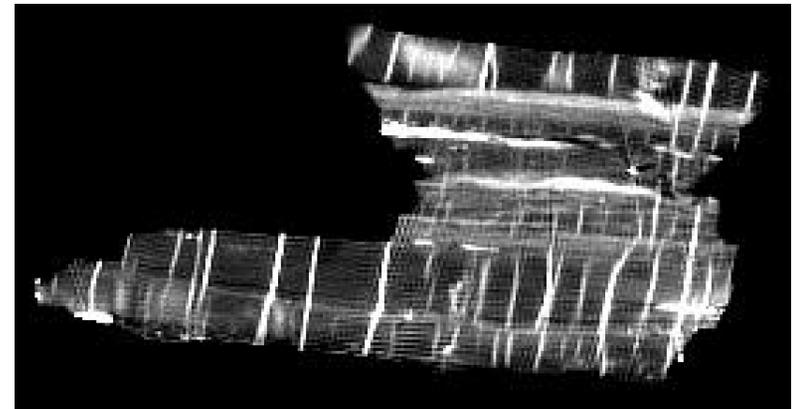


Figura 5.9: Tomografia 6 e seu respectivo gráfico da quantidade de *cleats* versus a quantidade de pixels dos mesmos.

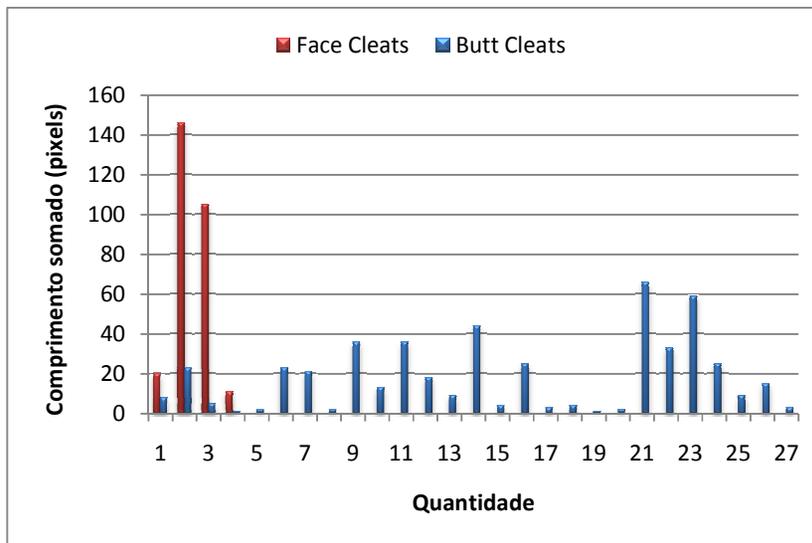
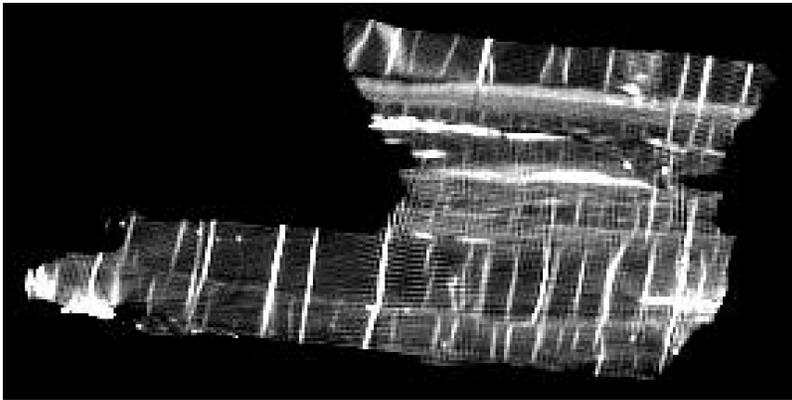


Figura 5.10: Tomografia 7 e seu respectivo gráfico da quantidade de *cleats* versus a quantidade de pixels dos mesmos.

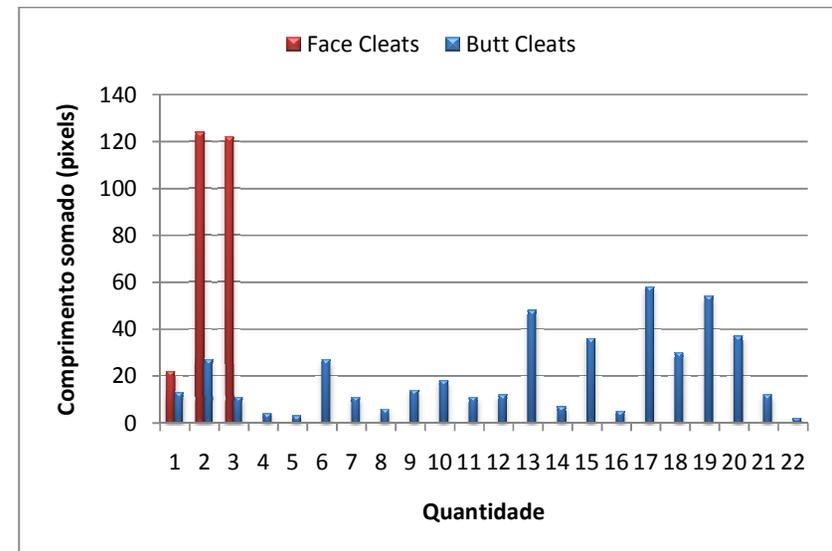
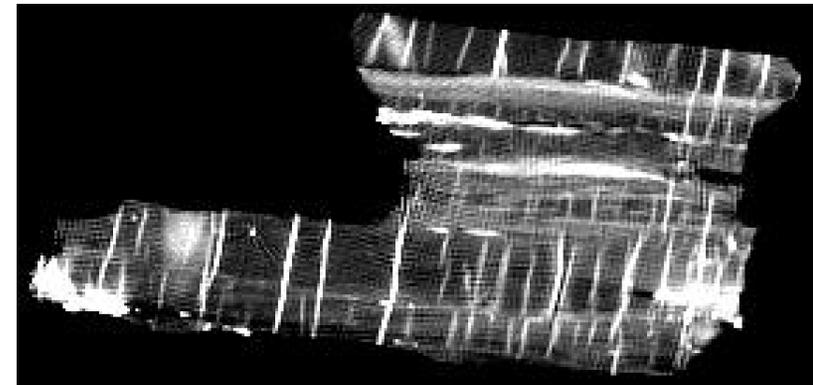


Figura 5.11: Tomografia 8 e seu respectivo gráfico da quantidade de *cleats* versus a quantidade de pixels dos mesmos.

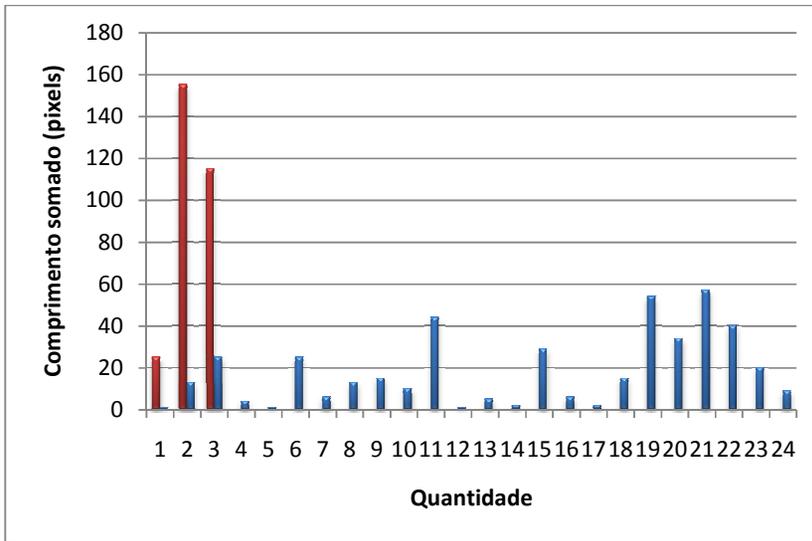
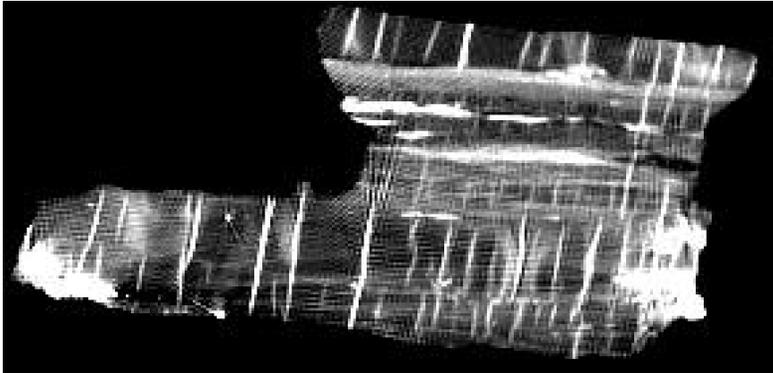


Figura 5.12: Tomografia 9 e seu respectivo gráfico da quantidade de *cleats* versus a quantidade de pixels dos mesmos.

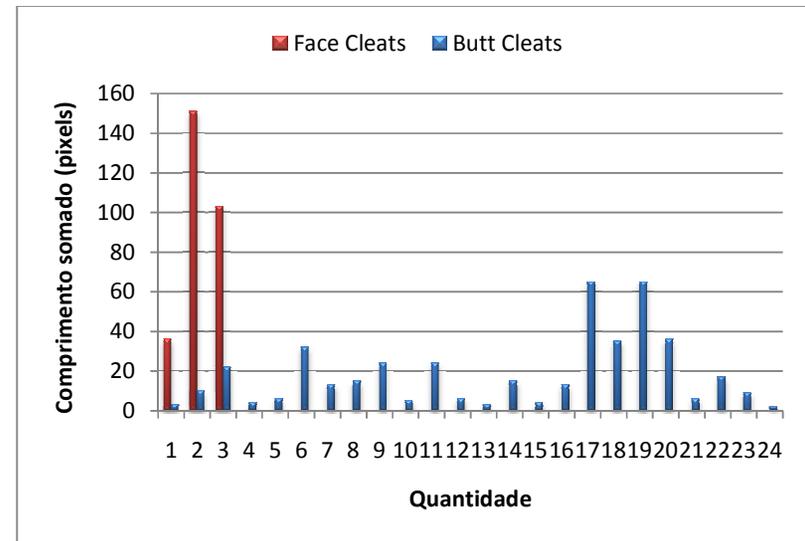
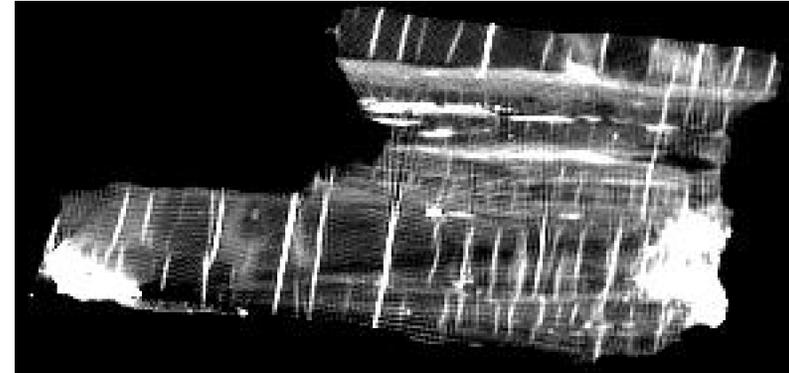


Figura 5.13: Tomografia 10 e seu respectivo gráfico da quantidade de *cleats* versus a quantidade de pixels dos mesmos.

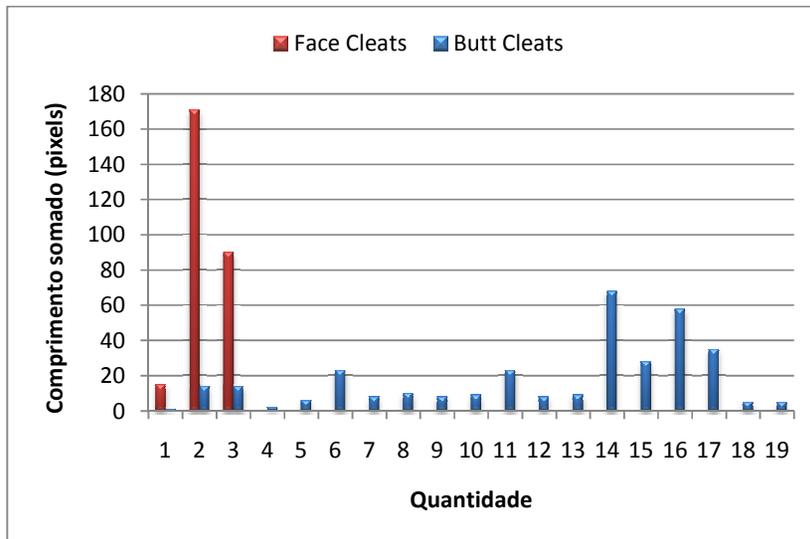
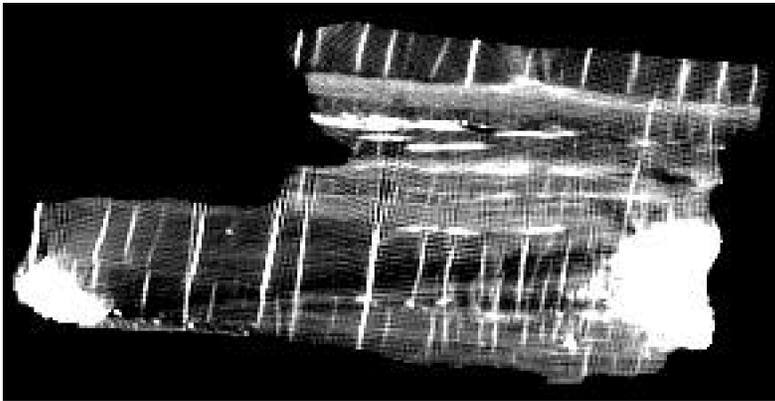


Figura 5.14: Tomografia 11 e seu respectivo gráfico da quantidade de *cleats* versus a quantidade de pixels dos mesmos.

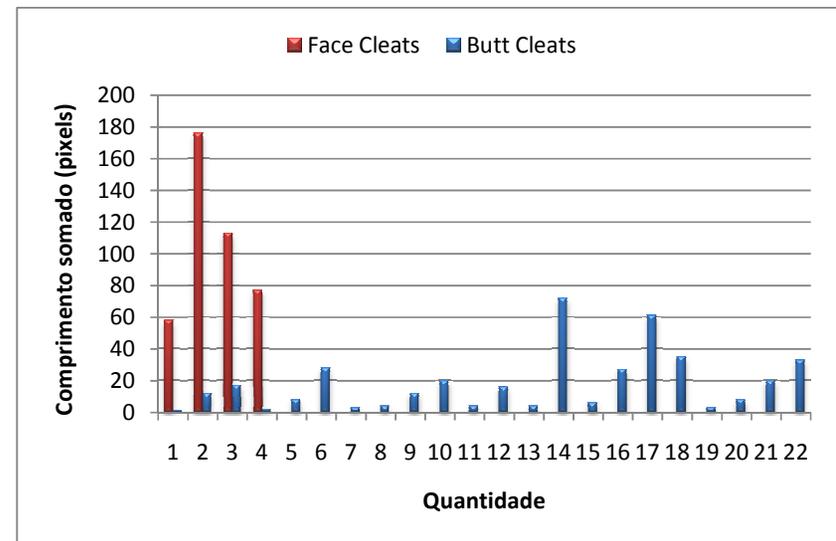
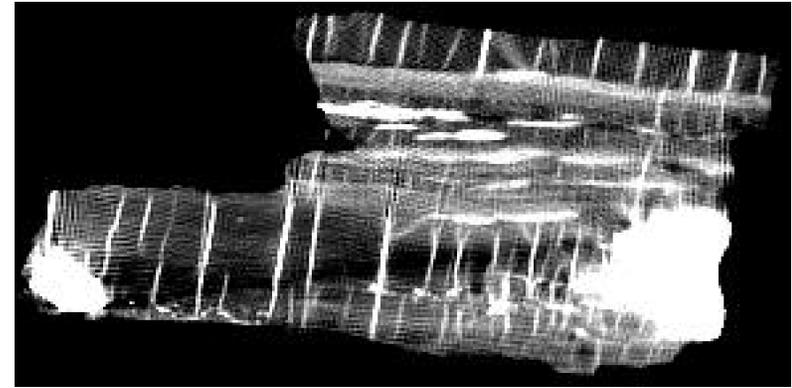


Figura 5.15: Tomografia 12 e seu respectivo gráfico da quantidade de *cleats* versus a quantidade de pixels dos mesmos.

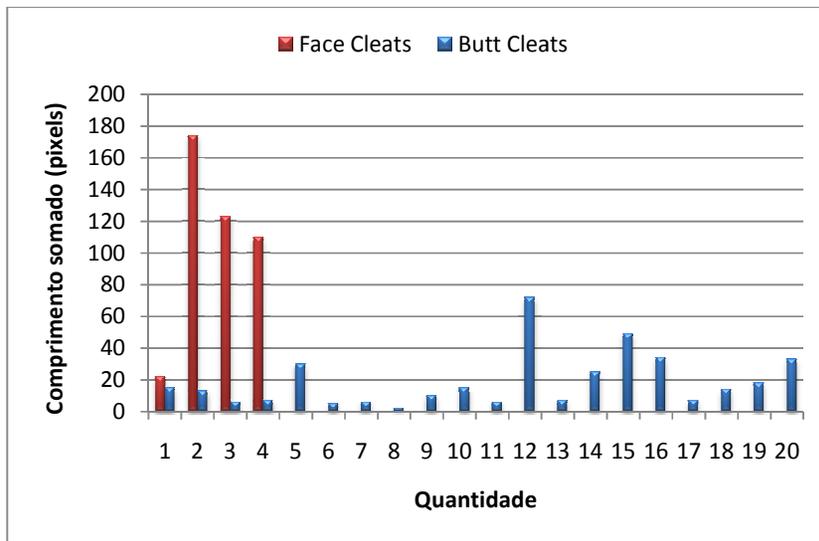
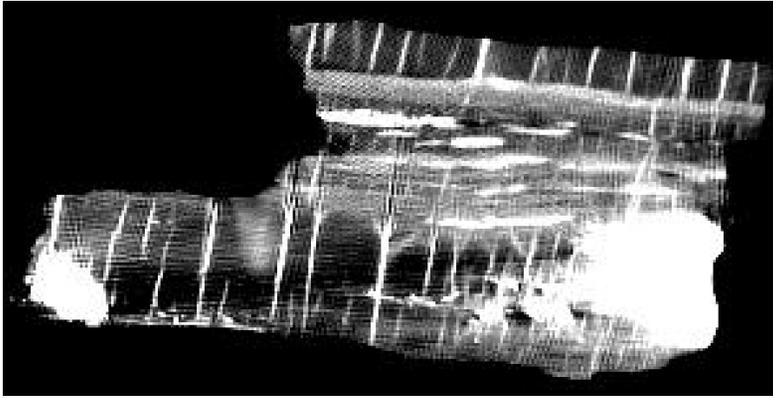


Figura 5.16: Tomografia 13 e seu respectivo gráfico da quantidade de *cleats* versus a quantidade de pixels dos mesmos.

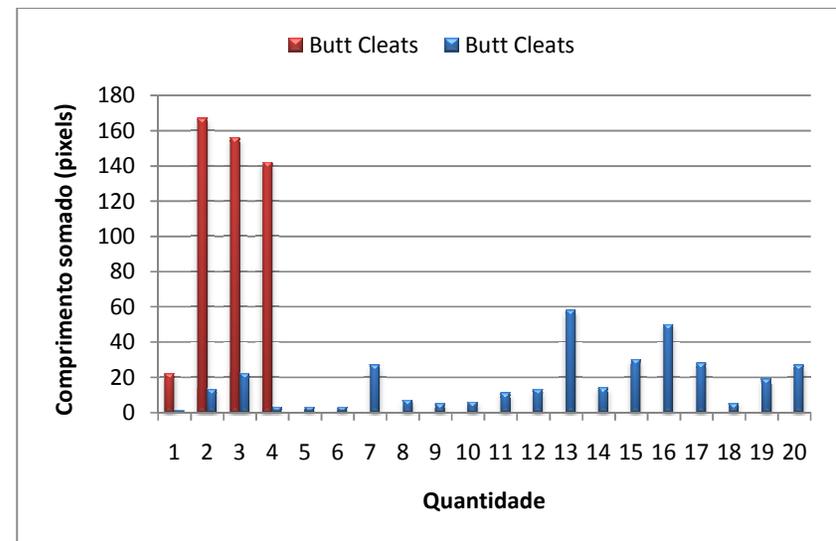
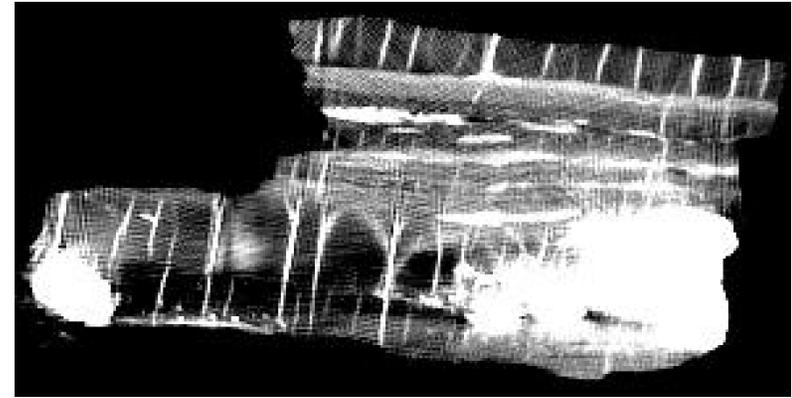


Figura 5.17: Tomografia 14 e seu respectivo gráfico da quantidade de *cleats* versus a quantidade de pixels dos mesmos.

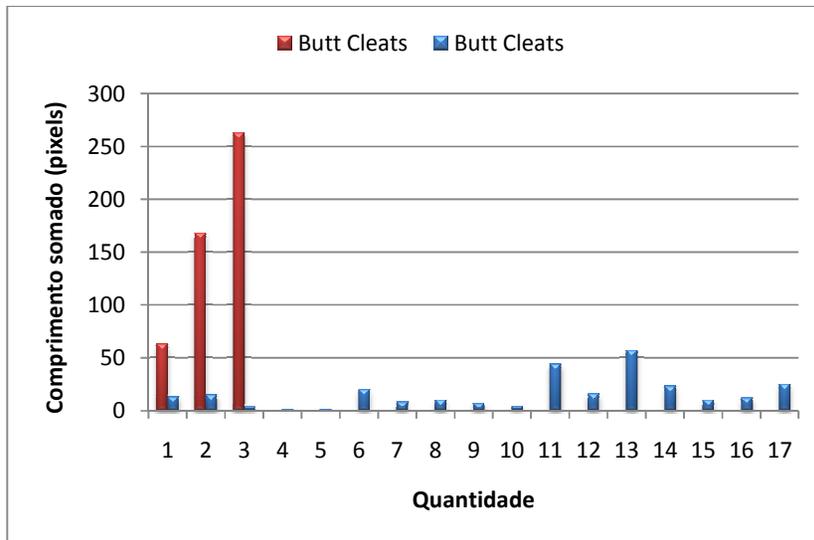
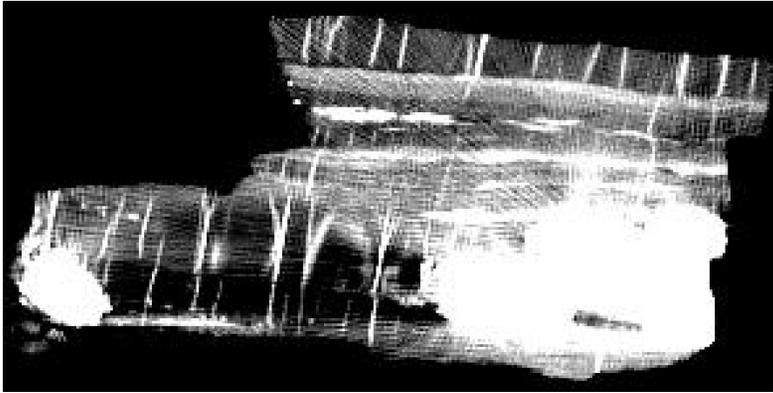


Figura 5.18: Tomografia 15 e seu respectivo gráfico da quantidade de *cleats* versus a quantidade de pixels dos mesmos.

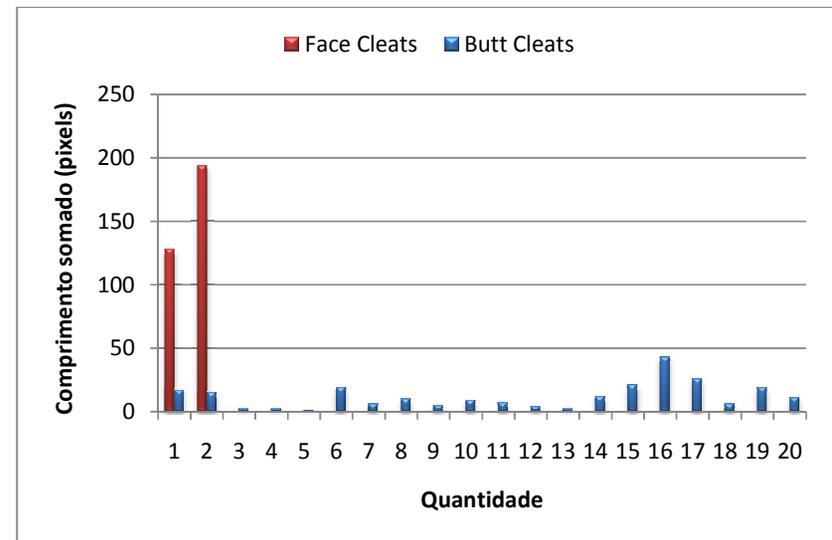
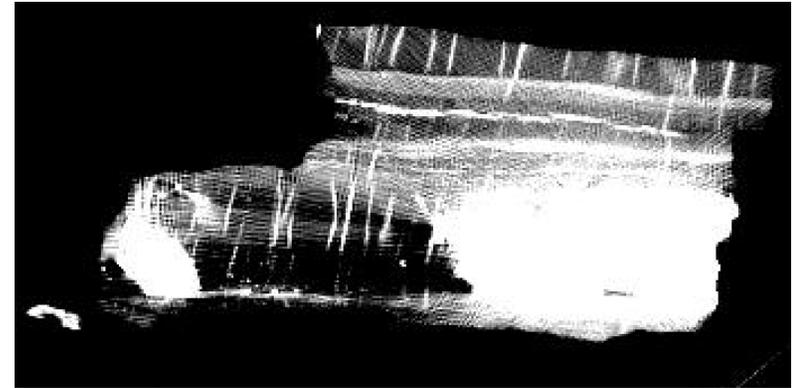


Figura 5.19: Tomografia 16 e seu respectivo gráfico da quantidade de *cleats* versus a quantidade de pixels dos mesmos.

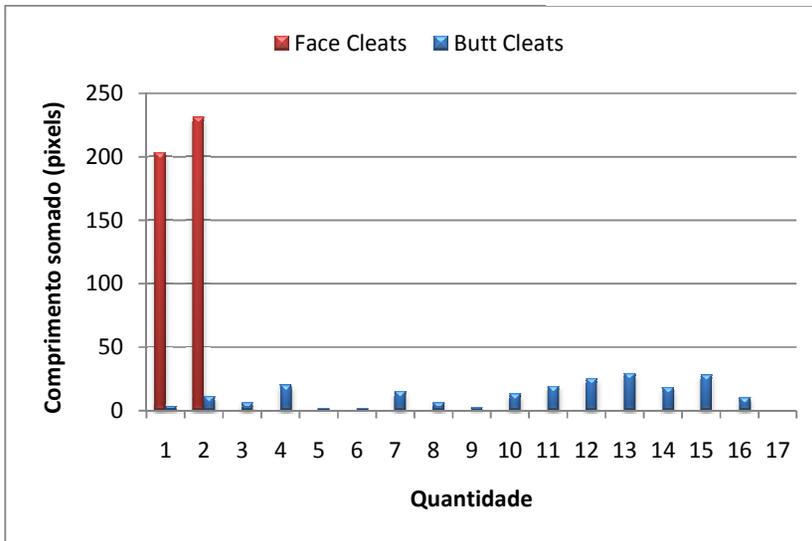


Figura 5.20: Tomografia 17 e seu respectivo gráfico da quantidade de cleats versus a quantidade de pixels dos mesmos.

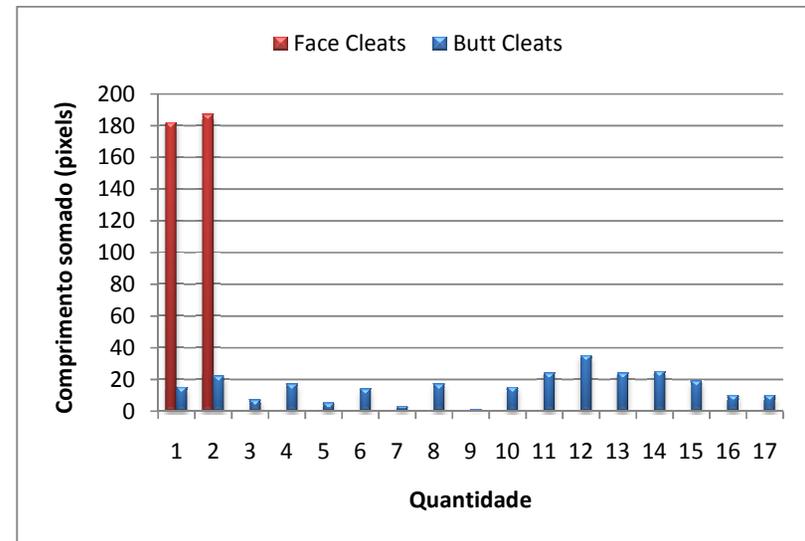
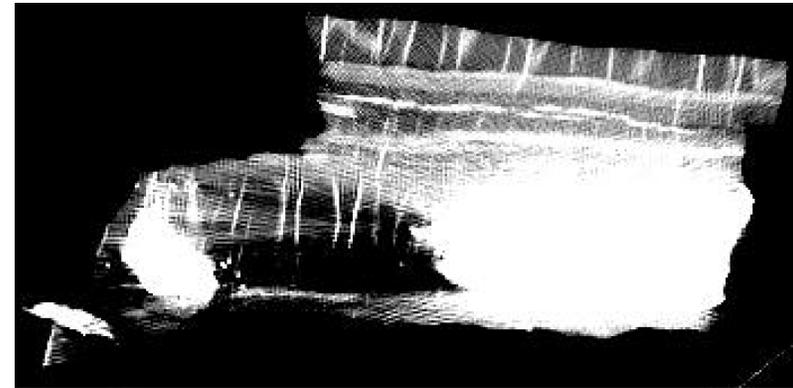


Figura 5.21: Tomografia 18 e seu respectivo gráfico da quantidade de cleats versus a quantidade de pixels dos mesmos.

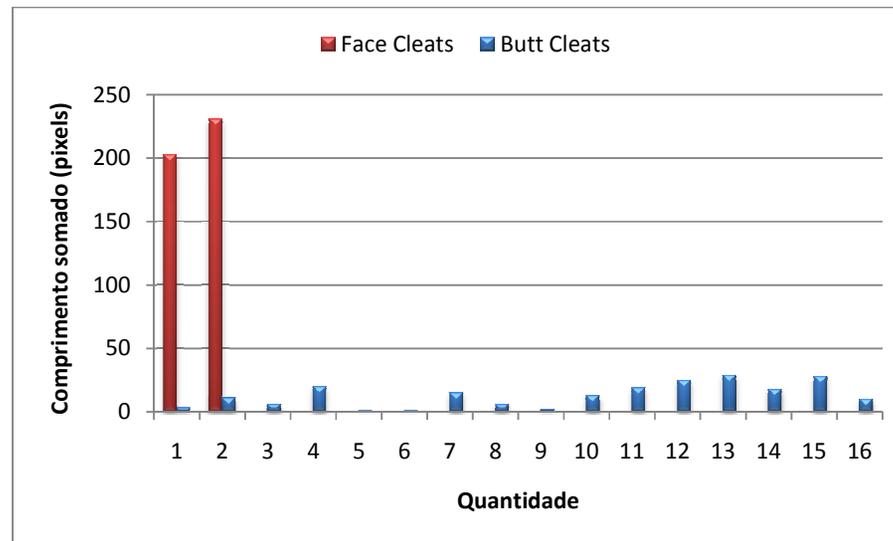
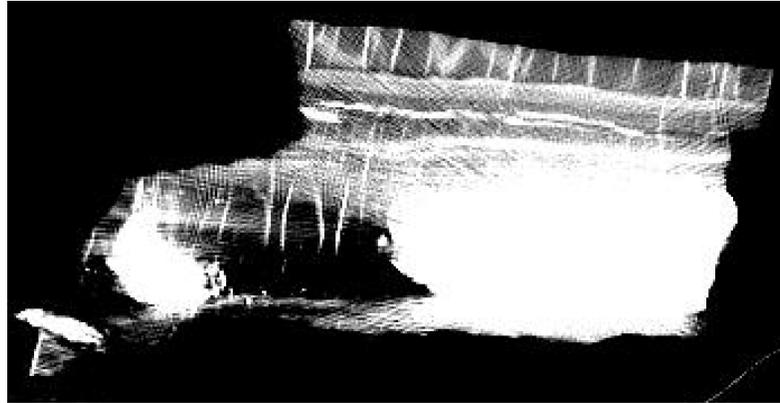


Figura 5.22: Tomografia 19 e seu respectivo gráfico da quantidade de *cleats* versus a quantidade de pixels dos mesmos.

#### 5.4. Volume de *Cleats* por Área

A partir da relação entre a área dos *cleats* e a área da matriz foi possível estimar o volume de *cleats* no carvão estudado, obtido através da média dos valores encontrados em 5 imagens representativas. Em uma área de 50 x 50 pixels de carvão, a área de *cleats* encontrados corresponde a 88 pixels<sup>2</sup>. Subtraindo a área total do carvão pela área dos *cleats*, obtém-se a área da matriz, equivalente a 2413 pixels<sup>2</sup>, como mostram os cálculos da Equação 5.1.

$$50 \times 50 = 2500 \text{ pixels}^2 \quad \gg \quad 2500 - 88 = 2413 \text{ pixels}^2 \quad [5.1]$$

A Equação 5.2 ilustra uma regra de três simples para a obtenção do volume de *cleats* por área de carvão.

$$2500 \div 2413 = 100\% \div x \quad \gg \quad x = 96,52\% \text{ de matriz de carvão} \quad [5.2]$$

$$x = 3,48\% \text{ de } \textit{cleats}$$

O cálculo do volume de *cleats* por área da amostra de carvão em estudo contém aproximadamente 3,48% do seu volume ocupado por *cleats*, repletos de carbonatos de cálcio. A média dos valores encontrados é compatível com outros volumes calculados para *cleats* de carvões do mundo (por exemplo, 5% do seu volume) (Rodrigues e Lemos de Souza, 2002).

#### 5.5. Erros

Os possíveis erros relativos aos testes realizados por tomografia estão ligados à má qualidade das imagens, pois a existência de pirita nas amostras de carvão reflete os raios-X e impede a obtenção de uma imagem mais detalhada dos *cleats*, por isso algumas manchas dispersas e tons de cinza muito claros foram identificadas como *cleats*, mas com alta ambiguidade. As imagens também possuem

detecção incompleta dos *cleats* que prosseguem para dentro da amostra de carvão, mas imperceptíveis pela tomografia.

## 6. CONCLUSÕES

Foi utilizada pela primeira vez a ferramenta de tomografia computadorizada de raios-X para estudar o sistema de fraturas (*cleats*) em amostras de carvão do Brasil, mostrando que os *cleats* são identificáveis e que é possível extrair dados relevantes sobre a orientação, espaçamento, quantidade, comprimento e volume dos *cleats* por área de carvão da Mina do Leão II. Os erros sobre a amostragem poderão ser minimizados pela escolha do carvão, pois as piratas presentes em sua matriz refletem os raios-X impedindo a obtenção de imagens mais detalhadas e bem definidas formando manchas dispersas nas imagens.

Os resultados indicam que a amostra de carvão estudada possui uma quantidade de segmentos de *butt cleats* mais elevada (aproximadamente 27) que a de *face cleats* (entre 3 e 4). Por outro lado, este possui comprimento muito superior, atingindo 263 pixels (13,15cm) contra 72 pixels (3,6cm). Ainda assim, possuem quantidade e comprimento de *cleats* muito menores que o das amostras de carvão de países como França e Polônia descritas por Mazumder *et al.* (2006).

Avaliando-se a implantação de projetos para CBM e ECBM, parâmetros como o espaçamento, informam que apesar dos *cleats* estarem uniformemente espaçados e presentes em toda a superfície da amostra, a conectividade entre seus *cleats* foi avaliada como sendo moderada, pois os *cleats* estão preenchidos por carbonato de cálcio que dificulta o fluxo de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>, implicando, por exemplo, na baixa permeabilidade (<1mD) de fluidos e sugere-se aqui, a possível não utilização da camada S, na Mina do Leão II, da Jazida de Leão-Butiá em tais projetos.

O volume de *cleats* por área de carvão está de acordo com outros encontrados em carvões do mundo e estima-se que aproximadamente 3,48% do seu volume é composto por *cleats*, mas não possui impacto significativo na quantidade

de gases armazenados na camada de carvão e, portanto, só influenciam na redução da permeabilidade.

A tomografia computadorizada de raios-X se mostrou uma poderosa ferramenta para análise da macroporosidade do carvão associada aos *cleats*. Sua distribuição espacial, tamanho, conectividade, grau de preenchimento mineral e padrões de orientação preferencial contribuíram para um melhor entendimento do armazenamento e fluxo de gases nas camadas de carvão do Brasil.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO CARVÃO MINERAL. **Sobre o Carvão**. Disponível em: <<http://www.carvaomineral.com.br/abcm/conteudo.asp?d1=38&d2=&d3=5>>. Acesso em 22 dezembro 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO CARVÃO MINERAL. **Tipos de Carvão**. Disponível em: <<http://www.carvaomineral.com.br/abcm/conteudo.asp?d1=38&d2=&d3=6>>. Acesso em 22 dezembro 2009.

BACHU, S.; Adams, J. J. **Sequestration of CO<sub>2</sub> in Geological Media in Response To Climate Change**: Capacity of deep saline aquifers to sequester CO<sub>2</sub> in solution. *Energy Conversion and Management*, v. 44, 2003.

BACHU, S.; BONIJOLY, D.; BRADSHAW, J.; BURRUSS, R.; HOLLOWAY, S.; CHRISTENSEN, N. P.; MATHIASSEN, O. M. **CO<sub>2</sub> Storage Capacity Estimation: Methodology and Gaps**. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, v. 1. P.430–443, 2007.

BLUNT, M.; FAYERS F. J.; ORR, F. M. Jr. **Carbon Dioxide in Enhanced Oil Recovery**. *Energ Convers Manage*, 34(9-11):1197-1204, 1993.

BRESSAN, Lia Weigert; IGLESIAS, Rodrigo Sebastian; KETZER, João Marcelo Medina. **Geoquímica e Integridade Mineralógica de Amostras do Campo de Buracica, Reservatório Potencial para o Armazenamento Geológico de CO<sub>2</sub>**: III Mostra de Pesquisa da Pós-Graduação – PUCRS, 2008.

BORBA, R. F. **Balço Mineral Brasileiro 2001**. 19p. Disponível em: <<http://www.dnrm.gov.br/assets/galeriadocumento/balancomineral2001/carvao.pdf>>. Acesso em 22 dez 2009.

BURJACK, M.I.A. **Estudo Palinológico da Jazida Carbonífera de Charqueadas, Rio Grande do Sul**. Ed. Universidade de Goiás, Goiânia. 204p, 1978.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (CGEE). **Manual de Capacitação sobre Mudança do Clima e Projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL)**. Brasília, DF. 276p, 2008. Disponível em: <<http://www.cgee.org.br/publicacoes/MudancaDoClima.php>>. Acesso em 22 dezembro 2009.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (CGEE). **Prospecção Tecnológica sobre Mudança do Clima. Nota Técnica: Vulnerabilidade, Impactos e Adaptação** – O Caso Particular das Florestas Brasileiras. In.: *Thelma Krug*. Brasília, DF. 23p. Disponível em: <[www.cgee.org.br/atividades/redirect.php?idProduto=1828](http://www.cgee.org.br/atividades/redirect.php?idProduto=1828)>. Acesso em 22 dezembro 2009.

CORRÊA DA SILVA, Z. C.; MARQUES-TOIGO, M.; CAZZULO-KLEPZIG, M.; PAIM, P. S. G.; DIAS-FABRÍCIO, M. E.; HENZ, G. I. **Características Petrográficas e Palinológicas do Perfil das Camadas de Carvão na Sondagem P4, Bacia Carbonífera de Santa Rita**. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 32, Salvador. Anais, 4: 1271-1283, 1982.

CUNHA, P.; SANTAROSA, C. S. **Desenvolvimento Tecnológico em Sequestro de Carbono na PETROBRAS**. In: Carbono: Desenvolvimento Tecnológico, Aplicação e Mercado Global. Curitiba: UFPR – Instituto Ecoplan. P.266-273, 2006.

DAY, S.; FRY, R.; SAKUROVS, R. **Swelling of Coals by Supercritical Gases and Its Relationship to Sorption**. Energy Fuels. 24(4):2777-2783, 2010.

GALE, J.; FREUND, P. **Coal-Bed Methane Enhancement with CO<sub>2</sub> Equestration Worldwide Potencial**. Environ Geosci. 8(3):210-217, 2001.

GOZALPOUR, F.; REN S. R.; TOHIDI, B. **CO<sub>2</sub> EOR and Storage in Oil Reservoirs**. Oil Gas Sci Technol. 60(3):537-546, 2005.

HOUGHTON, J.T., MEIRA FILHO, L.G., GRIGGS, D.J., MASKELL, K. 1997. **Stabilization of Atmospheric Greenhouse Gases: Physical, Biological and Socio-Economic Implications**. International Panel for Climate Change Technical Paper III, 61p.

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS – Universidade de Brasília. **Glossário Geológico Ilustrado**. Disponível em: <<http://vsites.unb.br/ig/glossario>>. Acesso em 20 dezembro 2009.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (Eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007. Disponível em: <[http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/publications\\_ipcc\\_fourth\\_assessment\\_report\\_wg1\\_report\\_the\\_physical\\_science\\_basis.htm](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_wg1_report_the_physical_science_basis.htm)>. Acesso em 22 dezembro 2009.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage**. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Metz, B., Davidson, O., Coninck, H. C. de, Loos, M., Meyer, L. A. (Eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 431p, 2005. Disponível em: <[http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/publications\\_and\\_data\\_reports\\_carbon\\_dioxide.htm](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports_carbon_dioxide.htm)>. Acesso em 22 dezembro 2009.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY GREENHOUSE GAS R&D PROGRAMME. **Storing CO<sub>2</sub> Underground.** 14p, Maio 2007. Disponível em: <<http://www.ieagreen.org.uk/glossies/storingCO2.pdf>>. Acesso em 22 dezembro 2009.

KALKREUTH, Wolfgang; HOLZ, Michael; CASAGRANDE, Junia; CRUZ, Rodrigo; OLIVEIRA, Tiago; KERN, Marcio; LEVANDOWSKI, Janaina; ROLIM, Sílvia. **O Potencial de Coalbed Methane (CBM) na Jazida da Santa Terezinha – Modelagem 3D e Avaliação do Poço de Exploração CBM001-ST-RS.** Revista Brasileira de Geociências. 38(2 - suplemento): 3-17, junho de 2008.

KETZER, J. M. **O Que é Sequestro de Carbono?** In: Revista Super Interessante - A Última Chance de Salvar a Terra. Ed. 247. 100p, 15 dezembro 2007. Disponível em: <<http://super.abril.com.br/ecologia/sequestro-carbono-447349.shtml>>. Acesso em 30 dezembro 2009.

KETZER, J. M. **Redução das Emissões de Gases Causadores do Efeito Estufa Através da Captura e Armazenamento Geológico de CO<sub>2</sub>.** In: Carbono: Desenvolvimento Tecnológico, Aplicação e Mercado Global. Curitiba: UFPR – Instituto Ecoplan. P.280-293, 2006.

KETZER, J. M.; IGLESIAS, R. S.; EINLOFT, S. **Reducing Greenhouse Gas Emissions with CO<sub>2</sub> Capture and Geological Storage.** Handbook of Climate Change Mitigation. Cap. 41, 2011.

LAUBACH, S.E.; MARRETT R.A.; OLSON, J.E.; SCOTT, A.R. **Characteristics and Origins of Coal Cleat:** A review. International Journal of Coal Geology, vol 35. P.175–207, 1998.

MAZUMDER, S.; WOLF, K.-H.A.A., ELEWAUT, K.; EPHRAIM, R. **Application of X-Ray Computed Tomography for Analyzing Cleat Spacing and Cleat Aperture in Coal Samples.** Science Direct. In: International Journal of Coal Geology, vol. 68. P.205-222, 2006.

MENEZES, César. **Brasil Quer Confinar CO<sub>2</sub> Debaixo da Terra**. In: Jornal da Globo – Página do G1 na Globo.com, 16 dezembro 2009. Disponível em: <<http://g1.globo.com/Sites/Especiais/Noticias/0,,MUL1418243-17816,00.html>>. Acesso em 22 dezembro 2009.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA (MCT). **Contribuição do Brasil para Evitar a Mudança do Clima**. 82p, 2007. Disponível em: <[http://www.mct.gov.br/upd\\_blob/0024/24867.pdf](http://www.mct.gov.br/upd_blob/0024/24867.pdf)>. Acesso em 22 dezembro 2009.

NATIONAL ENERGY TECHNOLOGY LABORATORY (NETL). **Carbon Sequestration: CO<sub>2</sub> Storage**. Disponível em: <[http://www.netl.doe.gov/technologies/carbon\\_seq/core\\_rd/storage.html](http://www.netl.doe.gov/technologies/carbon_seq/core_rd/storage.html)>. Acesso em 24 dezembro 2009.

O'DOWD, W.; PLASYNSKI, S.; McVAY, D. **CO<sub>2</sub> Sequestration Potential of Texas Low-Rank Coals**. National Energy Technology Laboratory (NETL). Disponível em: <<http://www.netl.doe.gov/publications/factsheets/project/Proj308.pdf>>. Acesso em 21 dezembro 2009.

PACALA, S.; SOCOLOW, R. **Stabilization Wedges: Solving the Climate Problem for the Next 50 Years with Current Technologies**. Science Vol.305. p. 968 – 972, 2004.

REEVES, S.R.; SCHOELING, L. **Geological Sequestration of CO<sub>2</sub> in Coal Seams: Reservoir Mechanisms, Field Performance and Economics**. In: Fifth international conference on greenhouse gas control technologies. CSIRO, Cairns, 2001.

RODRIGUES, C.F.; LEMOS DE SOUZA, M. J. **The Measurement of Coal Porosity with Different Gases**. International Journal of Coal Geology, vol 48. P.245-251, 2002.

SHI J. Q.; DURUCAN, S. **CO<sub>2</sub> Storage in Deep Unmineable Coal Seams**. Oil & Gas Science and Technology – Rev. Instituto Francês de Petróleo, vol. 60, No.3.

P.547-558, 2005.

SILVA, M. **Petrologia de Carvões nas Jazidas do Leão e Candiota, Permiano Inferior da Bacia do Paraná.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brazil. 259p, 1999.

SILVA, M. B.; KALKREUTH, W. **Petrological and Geochemical Characterization of Candiota Coal Seams, Brazil — Implication for Coal Facies Interpretations and Coal Rank.** International Journal of Coal Geology 64. P.217–238, 2005.

STACH, E.; TAYLOR, G. H.; MACKOWSKY, M. -TH.; CHANDRA, D.; TEICHMÜLLER, M.; TEICHMÜLLER, R. **Textbook of Coal Petrology.** 3rd revised and enlarged edition. Berlin, Stuttgart: Gebrüder Borntraeger. 535p, 1982.

VAN BERGEN, F.; GALE, J.; DAMEN, K.J. **Worldwide Selection of Early Opportunities for CO<sub>2</sub>-Enhanced Oil Recovery and CO<sub>2</sub>-Enhanced Coal Bed Methane Production.** Energy. 29(9-10):1611-1621, 2005.

WELLINGTON, F; BRADLEY, R. **Implementing the Wedge Approach to Climate Change.** In: World Resources Institute. Working At The Intersection of Environment and Human Needs. Disponível em: <<http://www.wri.org/stories/2007/04/implementing-wedge-approach-climate-change>>. Acesso em 21 dezembro 2009.