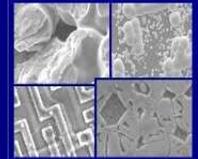




PUCRS

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

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DAS PRINCIPAIS JAZIDAS SUL-
BRASILEIRAS PARA GASEIFICAÇÃO *IN SITU* DE CARVÃO:
ASPECTOS GEOLÓGICOS E DE REATIVIDADE QUÍMICA**

FERNANDA DE OLIVEIRA ROEHE
ENGENHEIRA QUÍMICA

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

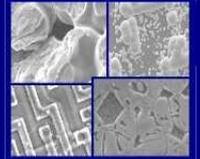
Porto Alegre

Junho, 2012



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

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DAS PRINCIPAIS JAZIDAS SUL-
BRASILEIRAS PARA GASEIFICAÇÃO *IN SITU* DE CARVÃO:
ASPECTOS GEOLÓGICOS E DE REATIVIDADE QUÍMICA**

FERNANDA DE OLIVEIRA ROEHE

Engenheira Química

ORIENTADOR: PROF. Dr. João Marcelo 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

Junho, 2012

*“Mesmo as noites totalmente sem
estrelas podem anunciar a aurora
de uma grande realização.”
(Martin Luther King)*

DEDICATÓRIA

Dedico a minha família. Minha irmã e minha mãe pelo carinho, apoio e muitas ajudas “extras”. Ao meu pai, pelo incentivo e por me fazer sempre persistir. Aos meus irmãos e avós por estarem igualmente ao meu lado em mais uma etapa. Ao meu noivo Tiago Kappke, agradeço todo amor, apoio e compreensão.

Dedico este trabalho a todos com quem pude compartilhar momentos de alegria, cansaço, expectativas, dúvidas e tristezas. Agradeço muito a todos por fazerem parte dessa conquista. Obrigada por tudo. Amo muito vocês.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a minha família e ao meu noivo, pois mesmo que desconhecessem a minha área de pesquisa, sempre tentaram de alguma forma me ajudar e motivar.

Agradeço a todos os professores do PGETEMA pela atenção com que sempre me receberam, em especial, as professoras Dr^{as} Eleani Costa e Rosane Ligabue. Agradeço igualmente ao meu orientador, João Marcelo Medina Ketzer e ao professor Dr. Roberto Heemann pelo apoio.

Agradeço a todos os meus amigos que estiveram ao meu lado, torcendo por mim, em especial a Juliana Holz. Aos meus colegas de aula que fizeram parte dessa jornada, dividindo dúvidas e expectativas. Aos colegas, Leonardo Moreira dos Santos e Viviane de Lima, do Laboratório de Caracterização de Materiais da FAQUI/PUCRS pela ajuda e ensinamentos.

Agradeço aos meus amigos e colegas do CEPAC, Juliane Marcolino, Felipe Dalla Vecchia, Martimiano Moraes, Gláucia Costa e Daniel Hastenpflug, por me orientarem e me auxiliarem em todos os momentos que precisei.

Ao CNPq agradeço pelo incentivo financeiro. Ao CEPAC por proporcionar a realização dessa pesquisa e a COPELMI Mineração Ltda pelo apoio.



**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DAS PRINCIPAIS JAZIDAS
SUL-BRASILEIRAS PARA GASEIFICAÇÃO IN SITU DE
CARVÃO: ASPECTOS GEOLÓGICOS E DE REATIVIDADE
QUÍMICA.**

CANDIDATA: FERNANDA DE OLIVEIRA ROEHE

Esta Dissertação de Mestrado foi julgada para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.



DR. JOÃO MARCELO DE MEDINA KETZER - ORIENTADOR

BANCA EXAMINADORA



DR. ROBERTO HEEMANN - FFCH - PUCRS



DRA. ELEANI MARIA DA COSTA - DO PGETEMA/FENG - PUCRS



DRA. ROSANE ANGÉLICA LIGABUE - DO PGETEMA/FENG - PUCRS

PUCRS

Campus Central
Av. Ipiranga, 6681 - Prédio 30 - Sala 103 - CEP: 90619-900
Telefone: (51) 3353.4059 - Fax: (51) 3320.3625
E-mail: engenharia.pg.materiais@pucrs.br
www.pucrs.br/feng

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| DEDICATÓRIA | 4 |
| AGRADECIMENTOS | 5 |
| SUMÁRIO | 7 |
| LISTA DE FIGURAS | 10 |
| LISTA DE TABELAS | 12 |
| LISTA DE QUADROS..... | 14 |
| LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS..... | 15 |
| RESUMO | 17 |
| ABSTRACT | 18 |
| 1. INTRODUÇÃO | 19 |
| 2. OBJETIVOS | 23 |
| 2.1. Objetivos Específicos | 23 |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 25 |
| 3.1. Mudanças Climáticas e Armazenamento Geológico de Carbono..... | 25 |
| 3.2. Carvão | 28 |
| 3.2.1. Reservas, Produção e Consumo de Carvão no Mundo..... | 29 |
| 3.2.2. Carvão no Brasil | 30 |
| 3.2.3. Geração de Energia e Impactos Ambientais | 32 |
| 3.3. Gaseificação <i>in situ</i> de Carvão (UCG)..... | 36 |
| 3.3.1. Conceito..... | 36 |
| 3.3.2. Projetos de Gaseificação <i>in situ</i> no Mundo..... | 38 |
| 3.4. Vantagens e Desvantagens da Gaseificação <i>in situ</i> de Carvão..... | 40 |
| 3.5. Reações Químicas da Gaseificação <i>in situ</i> de Carvão | 43 |
| 3.6. Características do Carvão que Influenciam a Gaseificação <i>in situ</i> de Carvão | 47 |
| 3.6.1. Reatividade | 52 |
| 3.6.1.1. Fatores que Afetam a Reatividade do <i>Char</i> | 53 |
| 3.6.1.2. Reatividade dos <i>Chars</i> via Termogravimetria | 54 |

| | |
|--|-----------|
| 3.6.1.3. Eventos Térmicos Associados à Reatividade dos <i>Chars</i> via Calorimetria Exploratória Diferencial | 56 |
| 3.7. Gás de Síntese e suas Rotas Químicas | 58 |
| 4. MATERIAIS E MÉTODOS | 61 |
| 4.1. Avaliação das Características Geológicas e Físico-Químicas das Jazidas Potenciais para Gaseificação <i>in situ</i> | 61 |
| 4.2. Avaliação Experimental das Jazidas Selecionadas | 63 |
| 4.2.1. Carvões Escolhidos | 63 |
| 4.2.2. Caracterização dos Carvões | 64 |
| 4.2.2.1. Análise Imediata | 64 |
| 4.2.2.2. Análise Elementar | 65 |
| 4.2.2.3. Poder Calorífico | 66 |
| 4.2.3. Avaliação da Reatividade via Análise Termogravimétrica (TGA) | 66 |
| 4.2.3.1. Parâmetros Experimentais Selecionados | 67 |
| 4.2.3.2. Avaliação da Influência da Granulometria do Carvão | 68 |
| 4.2.3.3. Avaliação da Influência da Temperatura de Reação | 68 |
| 4.2.4. Análises Experimentais para Acompanhar a Variação de Energia da Amostra via Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) | 69 |
| 4.2.5. Análise estatística via ANOVA | 69 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES | 71 |
| 5.1. Características das Jazidas de Carvão no Sul do Brasil | 71 |
| 5.2. Jazidas Potenciais para Gaseificação <i>in situ</i> de Carvão via Informações Geológicas | 77 |
| 5.3. Avaliação das Jazidas Potenciais Escolhidas via Propriedades Físico-Químicas | 81 |
| 5.4. Reatividade dos Carvões das Jazidas de Butiá-Leão e Charqueadas | 83 |
| 5.4.1.1. Influência da Granulometria e da Temperatura de Reação na Amostra da Jazida de Butiá-Leão | 84 |
| 5.4.1.2. Influência da Granulometria e da Temperatura de Reação na Amostra da Jazida de Charqueadas (camada I1F) | 87 |
| 5.4.1.3. Influência da Granulometria e da Temperatura de Reação na Amostra da Jazida de Charqueadas (camada I2B) | 89 |
| 5.4.1.4. Avaliação dos resultados de reatividade | 91 |

| | |
|---|------------|
| 5.5. Tabela ANOVA | 95 |
| 5.6. Variação Entálpica | 97 |
| 6. CONCLUSÕES | 101 |
| 7. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 104 |
| 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 105 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1.1. Geração mundial de eletricidade por tipo de combustível. | 19 |
| Figura 1.2. Emissões de CO ₂ do setor energético em 2008 e 2009. | 20 |
| Figura 3.1. Opções de armazenamento de CO ₂ em formações geológicas. | 27 |
| Figura 3.2. Constituição estrutural do carvão (poros). | 28 |
| Figura 3.3. Reservas mundiais de carvão em 2007. | 30 |
| Figura 3.4. Localização das jazidas de carvão no sul do Brasil. | 31 |
| Figura 3.5. Dependência externa do carvão no Brasil. | 34 |
| Figura 3.6. Esquema da Gaseificação <i>in situ</i> de carvão. | 37 |
| Figura 3.7. Países que desenvolvem atividades de UCG. | 39 |
| Figura 3.8. Comparativo entre o processo de UCG e a mineração convencional de carvão. | 41 |
| Figura 3.9. Zonas de gaseificação. | 44 |
| Figura 3.10. Esquema da geometria de fratura do carvão (<i>cleats</i>). | 49 |
| Figura 3.11. Operações de UCG no mundo em relação à espessura e à profundidade da camada. | 51 |
| Figura 3.12. Curva de aquecimento: a) quando não ocorre nenhum evento térmico; b) quando ocorre processo exotérmico no DSC; c) quando ocorre processo endotérmico no DSC | 57 |
| Figura 3.13. Aplicações do gás de síntese. | 58 |
| Figura 4.1. Primeira etapa para determinação da jazida sul-brasileira potencial ao UCG. | 61 |
| Figura 5.1. Perfil geológico das camadas principais de carvão na jazida de Charqueadas..... | 74 |
| Figura 5.2. Perfil geológico da jazida de Butiá-Leão..... | 81 |

| | |
|--|----|
| Figura 5.3. Termogramas com a escolha das temperaturas de reação para amostra de Butiá-Leão..... | 84 |
| Figura 5.4. Termograma e DTG da amostra B3 (granulometria de 200 <i>mesh</i> e isoterma de 950°C). | 85 |
| Figura 5.5. Reatividade das amostras de Butiá-Leão. | 86 |
| Figura 5.6. Evolução da conversão do <i>char</i> para as amostras de Butiá-Leão..... | 87 |
| Figura 5.7. Reatividade das amostras de Charqueadas (camada I1F). | 88 |
| Figura 5.8. Evolução da conversão do <i>char</i> para as amostras de Charqueadas (camada I1F). | 89 |
| Figura 5.9. Reatividade das amostras de Charqueadas (camada I2B)..... | 90 |
| Figura 5.10. Evolução da conversão do <i>char</i> para as amostras de Charqueadas (camada I2B)..... | 91 |
| Figura 5.11. Termograma comparativo das amostras B3, C4 e D3. | 91 |
| Figura 5.12. Influência da granulometria na reatividade. | 96 |
| Figura 5.13. Influência da temperatura de reação na reatividade. | 96 |
| Figura 5.14. Fluxo de calor para uma das triplicatas da amostra C4 de Charqueadas (camada I1F). | 97 |
| Figura 5.15. Reatividade x Variação de entalpia (amostra da jazida de Butiá-Leão). | 98 |
| Figura 5.16. Reatividade x Variação de entalpia (amostra da jazida de Charqueadas – camada I1F). | 99 |
| Figura 5.17. Reatividade x Variação de entalpia (amostra da jazida de Charqueadas – camada I2B)..... | 99 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 3.1. Características ideais do carvão para o UCG. | 52 |
| Tabela 4.1. Nomenclatura das amostras selecionadas e condições experimentais para os ensaios de reatividade. | 68 |
| Tabela 5.1. Análise imediata e elementar da camada Candiota. | 72 |
| Tabela 5.2. Análise imediata e elementar da camada Capanezinho. | 72 |
| Tabela 5.3. Análise imediata da camada Iruí Superior. | 73 |
| Tabela 5.4. Análise imediata e elementar da camada I da jazida de Butiá-Leão. | 74 |
| Tabela 5.5. Análise imediata e elementar das camadas MB, I1F e I2B da jazida de Charqueadas. | 75 |
| Tabela 5.6. Análise imediata e elementar das camadas M/CL2, M/CL4 e M/CL6 da jazida de Morungava/Chico Lomã. | 76 |
| Tabela 5.7. Análise imediata e elementar da camada ST4 da jazida de Santa Terezinha. | 76 |
| Tabela 5.8. Análise imediata e elementar das camadas Barro Branco e Bonito. | 77 |
| Tabela 5.9. Parâmetros geológicos para as diferentes jazidas estudadas. | 79 |
| Tabela 5.10. Jazidas selecionadas como favoráveis ao método UCG. | 80 |
| Tabela 5.11. Análises físico-químicas dos carvões selecionados como favoráveis ao método UCG. | 82 |
| Tabela 5.12. Influência da granulometria e da temperatura na reatividade (amostra de Butiá-Leão). | 84 |
| Tabela 5.13. Influência da granulometria e da temperatura na reatividade (amostra de Charqueadas camada I1F). | 87 |
| Tabela 5.14. Influência da granulometria e da temperatura na reatividade (amostra de Charqueadas camada I2B). | 89 |
| Tabela 5.15. Reatividade das amostras B3, C4 e D3. | 92 |

| | |
|--|----|
| Tabela 5.16. Reatividade de carvões encontrados em literatura. | 93 |
| Tabela 5.17. Propriedades físico-químicas dos carvões encontrados em literatura. | 94 |
| Tabela 5.18. Tabela ANOVA..... | 95 |
| Tabela 5.19. Variação de entalpia das amostras analisadas da jazida de Butiá-Leão e Charqueadas (camada I1F e I2B). | 98 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|----|
| Quadro 3.1. Classificação de carvões das jazidas sul- brasileiras..... | 32 |
| Quadro 3.2. Termelétricas a carvão no Brasil..... | 34 |
| Quadro 3.3. Parâmetros que influenciam na reatividade dos <i>chars</i> | 54 |
| Quadro 4.1. Amostras de carvão selecionadas. | 63 |
| Quadro 4.2. Descrição de parâmetros da análise imediata e normas associadas. .. | 65 |
| Quadro 4.3. Normas associadas aos parâmetros da análise elementar..... | 66 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|-------|---|
| Å | Angstrons |
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica |
| ASTM | Associação Americana para Testes e Materiais, do inglês <i>American Society for Testing and Materials</i> |
| BP | Além do petróleo, do inglês <i>Beyond Petroleum</i> |
| CC | Carvão Contido na camada |
| CCS | Captura e Armazenamento de dióxido de Carbono, do inglês <i>Carbon dioxide Capture and Storage</i> |
| CCT | Tecnologias Limpas de Carvão, do inglês <i>Clean Coal Technologies</i> |
| CEPAC | Centro de Excelência em Pesquisa e Inovação em Petróleo, Recursos Minerais e Armazenamento de Carbono |
| CGEE | Centro de Gestão e Estudos Estratégicos |
| CNI | Confederação Nacional da Indústria |
| CT | Camada Total de carvão |
| DME | Dimetil éter |
| DNPM | Departamento Nacional de Produção Mineral |
| DTF | Forno de Queda Livre, do inglês <i>Drop Tube Furnace</i> |
| DTG | Termogravimetria Derivada, do inglês <i>Derivative Thermogravimetry</i> |
| ECBM | Recuperação Avançada de Metano em Camadas de Carvão, do inglês <i>Enhanced Coalbed Methane Recovery</i> |
| EPE | Empresa de Pesquisa Energética |
| ESRL | Laboratório de Pesquisa do Sistema Terrestre, do inglês <i>Earth System Research Laboratory</i> |
| F-T | Fischer-Tropsch |
| GEE | Gases de Efeito Estufa |
| GLP | Gás Liquefeito do Petróleo |
| GTL | Conversão de Gás a partir de Líquido, do inglês <i>Gas to Liquid</i> |
| IEA | Agência Internacional de Energia, do inglês <i>International Energy Agency</i> |

| | |
|------|---|
| IGCC | Gaseificação Integrada a Ciclo Combinado, do inglês <i>Integrated Gasification Combined Cycle</i> |
| IPCC | Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, do inglês <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> |
| kW | Quilowatts |
| kWh | Quilowatts-hora |
| mD | Mili - Darcy |
| Mt | Megatonelada |
| MTBE | Metiltérciobutileter |
| Mtep | Milhões de toneladas equivalentes de petróleo |
| MTO | Conversão de Metanol em Olefinas, do inglês <i>Methanol to Olefins</i> |
| MW | Megawatts |
| NETL | Laboratório Nacional de Energia e Tecnologia, do inglês <i>National Energy Technology</i> |
| NOx | Óxidos de nitrogênio |
| PCI | Poder Calorífico Inferior |
| PCS | Poder Calorífico Superior |
| ppb | Partes por bilhão |
| ppm | Partes por milhão |
| ROM | Carvão bruto, do inglês <i>Run of Mine</i> |
| SOx | Óxidos de enxofre |
| TGA | Análise Termogravimétrica, do inglês <i>Thermogravimetric Analysis</i> |
| UCG | Gaseificação <i>in situ</i> de carvão, do inglês <i>Underground Coal Gasification</i> |
| WCI | Instituto Mundial do Carvão, do inglês, <i>World Coal Institute</i> |

RESUMO

ROEHE, Fernanda. **Avaliação do potencial das principais jazidas sul-brasileiras para gaseificação *in situ* de carvão: Aspectos geológicos e de reatividade química.** Porto Alegre. 2012. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL.

O carvão é visto como uma opção viável para garantir a segurança energética, devido sua grande disponibilidade no mundo. Porém, o futuro da utilização desse recurso estará em grande parte vinculado ao desenvolvimento de tecnologias limpas que possibilitem a redução de seus impactos ambientais. Nesse contexto, a gaseificação *in situ* de carvão (UCG) surge como um método promissor e já comprovado de aumento da disponibilidade de carvão como um recurso energético, sendo capaz de reduzir substancialmente a emissão de poluentes e gases de efeito estufa quando vinculado ao sequestro geológico de carbono. Dessa maneira, o presente trabalho objetiva avaliar a influência dos aspectos geológicos e físico-químicos dos carvões sul-brasileiros para aplicação da metodologia de gaseificação *in situ*. As jazidas escolhidas para essa avaliação foram: Cambuí; Sapopema; Sul-Catarinense (camadas Barro Branco e Bonito); Candiota; Santa Terezinha; Morungava/Chico Lomã; Charqueadas; Butiá-Leão; Iruí e Capané. As informações geológicas das camadas de carvão (profundidade, espessura e recursos totais) foram utilizadas como critério inicial de seleção. Desse modo, as jazidas de Butiá-Leão e de Charqueadas (camadas I1F e I2B) foram as que apresentaram as condições mais favoráveis ao UCG, sendo submetidas a análises físico-químicas, bem como a ensaios experimentais para a obtenção da reatividade dos carvões por meio de termogravimetria. A termogravimetria realizada permitiu ainda avaliar a influência da granulometria e da temperatura na reatividade dos carvões. Dentre as jazidas analisadas, a jazida de Charqueadas, camada I1F, foi a que apresentou as características físico-químicas e informações geológicas mais favoráveis para a aplicação da metodologia de UCG.

Palavras-Chaves: Carvão, UCG, Reatividade.

ABSTRACT

ROEHE, Fernanda. **Assessment of potential the main deposits south Brazil to underground coal gasification: Geological and chemical reactivity aspects.** Porto Alegre. 2012. Master. Graduation Program in Materials Engineering and Technology, PONTIFICAL CATHOLIC UNIVERSITY OF RIO GRANDE DO SUL.

Coal is seen as a viable option for energy security, because of its wide availability in the world. However, its future use is largely linked to the development of clean technologies to reduce its environmental impacts. In this context, the underground coal gasification (UCG) emerges as a promising method to increase the availability of coal as an energy resource, being able to substantially reduce the emission of pollutants and greenhouse gases when linked to carbon geologic sequestration. Thus, this study aims to evaluate the influence of geological and compositional parameters of the south Brazilian coals for underground coal gasification. The deposits chosen for this evaluation were: Cambuí; Sapopema; Sul- Catarinense (Barro Branco and Bonito coal seams); Candiota; Santa Terezinha; Morungava/Chico Lomã; Charqueadas; Butiá-Leão; Iruí and Capané. The geological properties of coal seams (depth, thickness and total resources) were used as the initial selection criterion. The deposits of Butiá-Leão and Charqueadas (I1F and I2B coal seams) showed the most favorable terms to UCG, being subjected to physical and chemical analysis and experimental tests to obtain reactivity of coals by thermogravimetry. The thermogravimetry carried out allowed us to evaluate the influence of particle size and temperature on the reactivity of coals. Among the analyzed deposits, the deposit of Charqueadas, I1F coal seam, was the one with the physico-chemical and geological information more favorable for the application of the methodology of UCG.

Key-words: Coal, UCG, Reactivity.

1. INTRODUÇÃO

Em muitas partes do mundo, há uma grande preocupação com a segurança energética e com as consequências ambientais trazidas pela produção de energia em grande escala. Os efeitos das emissões de gases de efeito estufa (GEE) relacionados com a queima de combustíveis fósseis e a potencial relação com as mudanças climáticas tem levado e estimulado políticas governamentais a apoiarem um aumento das fontes de energia renováveis.

Porém, de acordo com o relatório publicado pela *International Energy Agency*, IEA (2011b), é o carvão que continuará sendo a maior fonte de eletricidade mundial, pelo menos até 2035 (Figura 1.1). Segundo a mesma fonte, a demanda mundial por consumo de energia deverá aumentar em um terço nos próximos 25 anos e, se o crescimento ocorrer com uso intenso de combustíveis fósseis, as emissões de dióxido de carbono (CO₂) aumentarão em 20%.

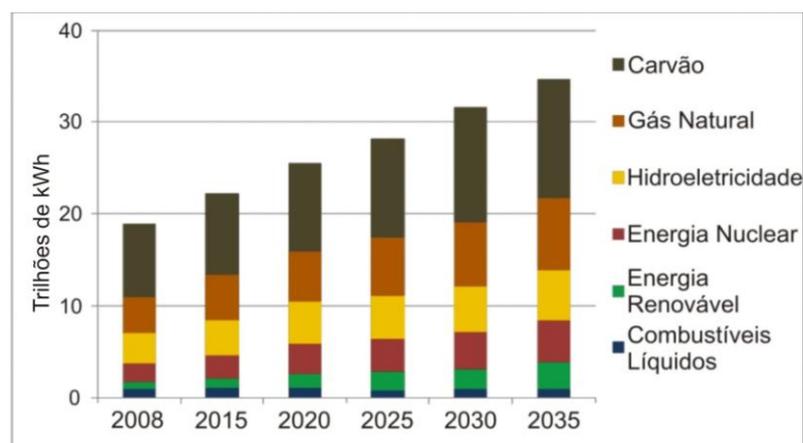


Figura 1.1. Geração mundial de eletricidade por tipo de combustível.

Fonte: IEA, 2011b.

A elevação das concentrações de CO₂ na atmosfera vem sendo verificada desde o período pré-industrial (ou seja, desde o ano de 1750 - escolhido como linha

de base) de aproximadamente 280 partes por milhão (ppm) de acordo com o *Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC (2007), para cerca de 392,76 ppm, conforme a *Earth System Research Laboratory*, ESRL (2011). Embora esse último valor ainda seja um valor médio preliminar do mês de janeiro do ano de 2012, é possível evidenciar que a concentração de CO₂ na atmosfera apresenta um valor superior ao dos últimos 650 mil anos e provavelmente o maior dos 20 milhões de anos passados (CANADELL et al., 2007).

O setor que mais emite o CO₂ para a atmosfera é o energético, no ano de 2009, conforme enfatiza a *International Energy Agency*, IEA (2011a), chegou a ser responsável por 41% das emissões mundias. Esse dado pode ser confirmado pela forte dependência desse setor ao carvão, uma das maiores fontes emissoras de CO₂ (Figura 1.2), ou seja, umas das formas de produção de energia mais impactantes ao meio ambiente.

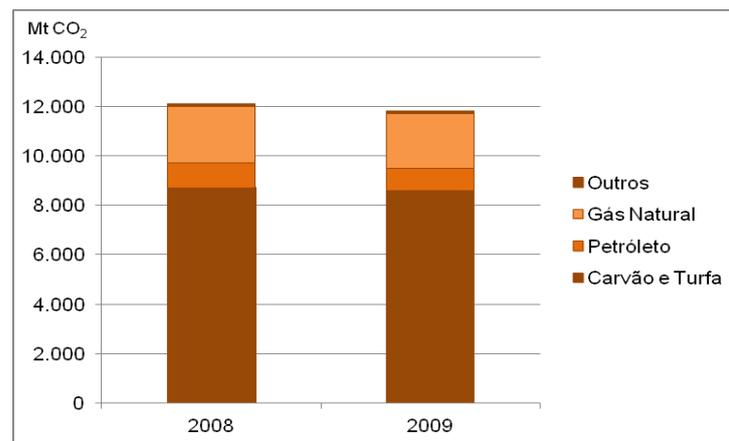


Figura 1.2. Emissões de CO₂ do setor energético em 2008 e 2009.

Fonte: IEA, 2011a.

Atualmente, o carvão é fundamental para garantir a segurança energética devido a sua grande disponibilidade e ampla distribuição mundial, pois conta com 847,5 bilhões de toneladas em reservas espalhadas pelo mundo, como ressalta a Agência Nacional de Energia Elétrica, ANEEL (2008). Dessa forma, a utilização futura desse minério estará subordinada a inovações tecnológicas apropriadas que permitam a redução dos impactos negativos causados por sua mineração e combustão, bem como de inovações tecnológicas que permitam a exploração dos seus recursos economicamente inviáveis, por se encontrarem, por exemplo, a grandes profundidades (BIALECKA, 2009).

Nesse cenário, a gaseificação *in situ* de carvão (UCG) é considerada uma promissora alternativa para a utilização desse combustível fóssil (SHAFIROVICH; VARMA, 2009). O UCG é uma tecnologia economicamente adequada e viável para aumentar a disponibilidade do carvão como um recurso energético, além disso, é capaz de reduzir substancialmente as emissões de gases de efeito estufa associadas à utilização do carvão, quando vinculado ao sequestro geológico de carbono (BIALECKA, 2009 e FRIEDMANN, 2009).

O conceito de tecnologia limpa, associado ao uso do carvão, torna o UCG uma grande possibilidade, embora ainda existam muitas barreiras econômicas para sua inserção nos mercados mundiais e brasileiro, praticamente baseados no uso de petróleo e de gás natural. O gás gerado pelo UCG, chamado de gás de síntese, além de possibilitar a obtenção de uma gama de produtos para a indústria química, e de combustíveis, pode ser igualmente utilizado para aquecimento industrial e geração de eletricidade.

O gás de síntese, composto principalmente por hidrogênio, um promissor substituto dos derivados de petróleo, e por monóxido de carbono, é insumo para a obtenção de diversos produtos químicos economicamente atrativos para o mercado brasileiro, podendo ser uma opção frente às importações. Um desses produtos químicos de destaque é o metanol, considerado uma das mais importantes matérias-primas químicas no mundo contemporâneo. Além disso, esse pode ser insumo da síntese para a obtenção de DME (dimetil éter), um dos possíveis candidatos à substituição do diesel, capaz de melhorar as questões ambientais devido a sua baixa emissão de poluentes e ser uma alternativa ao uso de derivados do petróleo.

Dentro desse contexto, o presente trabalho, pretende avaliar a influência dos aspectos geológicos e físico-químicos do carvão (com destaque para a reatividade) das principais jazidas do sul do Brasil para gaseificação *in situ*. Dessa maneira, foram inicialmente consideradas as seguintes jazidas: Cambuí; Sapopema; Sul-Catarinense; Candiota; Santa Terezinha; Morungava/Chico Lomã; Charqueadas; Butiá-Leão; Iruí; e, Capané – que chegam a somar 99% de todo carvão brasileiro.

Assim, por meio de pesquisa e análises das informações geológicas, tais como, profundidade, espessura e recursos totais, e dos parâmetros físico-químicos, como reatividade, teor de umidade, cinzas e enxofre pretende-se indicar a jazida nacional com maior possibilidade de aplicação da metodologia de UCG para as condições estudadas.

2. OBJETIVOS

O objetivo dessa dissertação é avaliar o potencial das seguintes jazidas sul-brasileiras para aplicação da metodologia de gaseificação *in situ*: Cambuí; Sapopema; Sul-Catarinense (camadas Barro Branco e Bonito); Candiota; Santa Terezinha; Morungava/Chico Lomã; Charqueadas; Butiá-Leão; Iruí; e, Capané. Assim, pretende-se avaliar a influência das informações geológicas (profundidade, espessura e recursos totais de carvão) e das características físico-químicas (com destaque para reatividade e teores de cinzas, enxofre e umidade) para a gaseificação *in situ* de carvão.

2.1. Objetivos Específicos

- Realizar levantamento bibliográfico sobre os parâmetros físico-químicos e as informações geológicas referentes às camadas de carvão das jazidas de Cambuí, Sapopema, Sul-Catarinense (camadas Barro Branco e Bonito), Candiota, Santa Terezinha, Morungava/Chico Lomã, Charqueadas, Butiá-Leão, Iruí e Capané;
- Selecionar dentre as jazidas referidas acima as que apresentarem condições mais favoráveis à aplicação do UCG ao se analisar apenas profundidade, espessura e recursos totais de carvão;
- Avaliar os parâmetros físico-químicos do carvão, por meio de análises imediata, elementar e de poder calorífico, bem como de ensaio termogravimétrico para a obtenção da reatividade dos carvões e calorimetria exploratória diferencial;
- Indicar a jazida sul-brasileira potencial (dentre as analisadas) para a aplicação futura de UCG, ou seja, aquela que obtiver as condições mais

adequadas ao método em relação aos parâmetros considerados nesse estudo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Mudanças Climáticas e Armazenamento Geológico de Carbono

Ao longo do século passado, a atividade humana contribuiu para o aumento das concentrações atmosféricas dos gases de efeito estufa (GEE), principalmente o CO₂ e o metano (CH₄), levando ao aquecimento global e as mudanças climáticas (BACHU, 2000). Conforme o *World Coal Institute* (2007) esse aumento foi impulsionado pelas emissões provenientes do desmatamento, agricultura e em sua maior parte pela utilização de combustíveis fósseis.

De acordo com o IPCC (2007) as concentrações atmosféricas de CO₂ vêm aumentando desde a era pré-industrial (desde o ano de 1750), de cerca de 280 ppm para 379 ppm em 2005 e esse número não para de crescer. Segundo Laboratório de Pesquisa do Sistema Terrestre, *ESRL* (2011), em janeiro de 2012 a média mensal calculada em locais de superfície marinha chegou a 392,76 ppm. Cabe ressaltar que os dados de 2012 ainda são preliminares, pois necessitam de recalibrações e outras verificações de controle de qualidade, mas já demonstram que a concentração de CO₂ na atmosfera apresenta um valor superior ao dos últimos 650 mil anos e provavelmente a maior dos 20 milhões de anos (CANADELL et al., 2007).

A concentração atmosférica de metano também teve um aumento significativo, especialmente pelo crescente uso de combustíveis fósseis e uso da terra, partindo de 715 partes por bilhão (ppb) no nível pré-industrial para uma concentração de 1774 ppb em 2005 (IPCC, 2007). No ano de 2008, segundo a *ESRL* (2009), esses níveis de metano alcançaram a concentração de 1788 ppb. De acordo com a mesma fonte, o metano é 25 vezes mais potente como gás de efeito

estufa se comparado ao CO₂, no entanto, seu impacto no clima terrestre é a metade do produzido por esse, devido à sua menor quantidade na atmosfera.

O setor energético (produção de eletricidade e calor) é considerado o maior responsável pelas emissões de CO₂ frente aos outros setores. Em 2009, de acordo com a IEA (2011a), chegou a ser responsável por 41% das emissões mundias, sendo esse setor fortemente dependente do carvão, uma das maiores fontes emissoras de CO₂. Países como a Austrália, China, Índia, Polônia e África do Sul chegam a produzir entre 68% e 94% de sua eletricidade e calor por meio da combustão de carvão. Em acréscimo, cabe salientar que, embora o carvão representasse apenas um quarto do consumo mundial de energia em 2009, 43% das emissões de CO₂ provenientes da queima de combustível fóssil foram produzidos a partir do mesmo, 37% do petróleo e 20% de gás (IEA, 2011a).

O Brasil é o terceiro maior emissor de gases de efeito estufa total no mundo. Porém, seu sistema energético tem um impacto muito menor sobre as emissões de GEE (15%), isso porque é baseado praticamente em energias renováveis. A maior parte das emissões brasileiras, ou seja, 85% vêm de atividades de agricultura, uso da terra e florestas, principalmente devido à expansão das fronteiras agrícolas na região amazônica (IEA, 2011a).

O grande desafio frente ao uso do carvão é a redução de seus impactos ambientais, por isso vem sendo desenvolvidas as chamadas tecnologias de carvão limpo e de carvão mais limpo, ambas preocupadas em reduzir os impactos ambientais gerados pelo uso desse minério. A tecnologia de carvão limpo é focada apenas no seu uso final, enquanto a de carvão mais limpo foca-se em todo o processo, desde a mineração até sua utilização final (HEEMANN et al., 2009).

As mudanças climáticas e a busca por eficiência energética são desafios globais e a evolução tecnológica deve fazer parte de suas soluções. A ligação entre alterações climáticas e energia é uma parte do maior desafio do desenvolvimento sustentável (IEA, 2011a). Segundo Bachu (2000), a redução das emissões de CO₂ deverá estar associada a várias medidas de mitigação. Algumas dessas medidas incluem: melhorar a eficiência energética, substituir o uso de combustíveis fósseis,

utilizar mais energias renováveis, desenvolver sumidouros de CO₂ como a captura e armazenamento geológico de CO₂ e etc.

A captura e armazenamento geológico de dióxido de carbono (*Carbon dioxide Capture and Storage - CCS*) é, então, um conjunto de tecnologias para capturar o CO₂ a partir de suas fontes antropogênicas, transportá-lo para o local em que será armazenado (subsuperfície e unidades geológicas adequadas) e isolá-lo da atmosfera (KETZER; IGLESIAS; EINLOFT, 2011). Essa é uma opção muito importante dentre as diversas opções existentes para combater o aumento da concentração atmosférica de CO₂ e ao mesmo tempo permitir o uso continuado e mais sustentável de combustíveis fósseis (MAZZOTTI; PINI; STORTI, 2009).

O transporte do CO₂ pode ser feito a longas distâncias por meio de carodutos e navios, sendo, por fim, armazenado permanentemente em formações geológicas profundas (Figura 3.1), dentre as quais têm-se: aquíferos salinos, reservatórios de óleo e gás e camadas não mineráveis de carvão (KETZER; IGLESIAS; EINLOFT, 2011). Outros meios geológicos também podem fornecer opções para o armazenamento geológico de CO₂, porém com capacidades de armazenamento muito restritas, são eles: basaltos, folhelhos betuminosos, cavernas de sal e minas abandonadas (IPCC, 2005), além de cavidades formadas pela gaseificação *in situ* de carvão (FRIEDMANN, 2009).

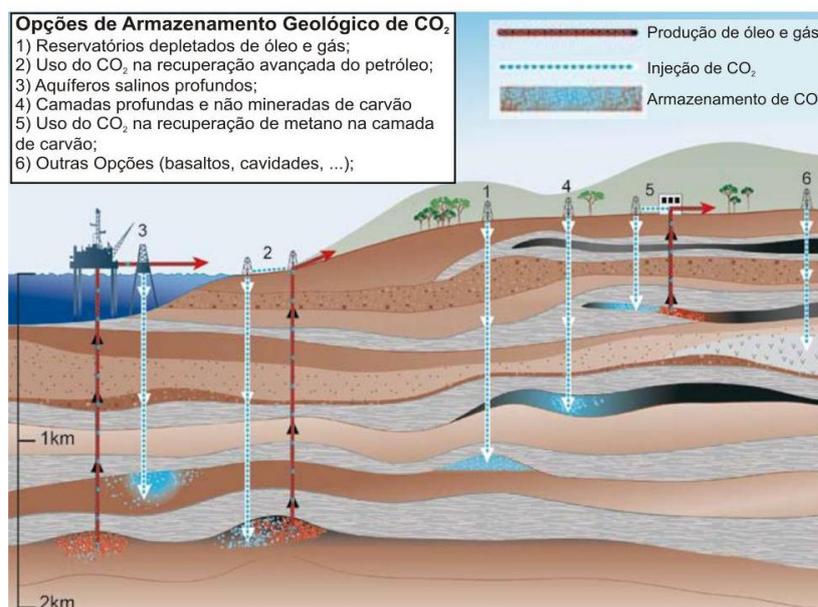


Figura 3.1. Opções de armazenamento de CO₂ em formações geológicas.

Fonte: IPCC, 2005.

3.2. Carvão

O carvão é uma rocha sedimentar combustível formada pela maturação de matéria orgânica durante milhões de anos, sob determinadas condições de temperatura e pressão. O carvão é, então, composto por uma matéria carbonosa constituída de átomos de carbono (C), oxigênio (O₂), nitrogênio (N₂), enxofre (S) e traços de outros elementos (CANO, 2009; ANEEL, 2008; EPE, 2007 e HEEMANN et al., 2009).

Em relação a sua estrutura química, pode-se afirmar que é muito complexa, pois contém uma infinidade de formas estruturais que incluem uma diversidade de constituintes orgânicos e inorgânicos (GAS TECH, 2007). Por não dispor de uma composição uniforme, o carvão não pode ser representado por uma fórmula química (XAVIER, 2004 *apud* LICKS, 2008). Assim, o carvão é considerado uma substância heterogênea, composta por vários constituintes que, diferentemente de rochas inorgânicas compostas por minerais, é composto pelos chamados macerais. Os macerais são constituintes microscópicos orgânicos do carvão, podendo ser classificados em três grupos: vitrinita, liptinita e inertinita (STACH et al., 1982).

Outro elemento muito importante no carvão e, talvez sua característica mais marcante ao ser comparado com outras fontes fósseis é a sua estrutura formada por uma extensa rede de poros. Desse modo, pode-se dizer que há uma grande variedade de tipos de poros em carvões de *rank* diferentes, desde grandes poros, macroporos (>300 Å) a pequenos poros, microporos (<12 Å), conforme se pode visualizar na Figura 3.2 (LEVINE; SCHLOSBERG; SILBERNAGEL, 1982).

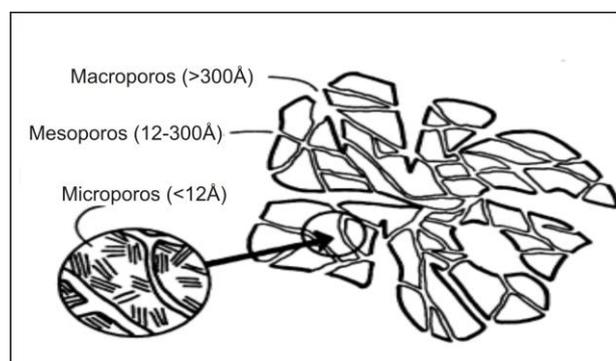


Figura 3.2. Constituição estrutural do carvão (poros).
Fonte: LEVINE; SCHLOSBERG; SILBERNAGEL, 1982.

O resultado da maturação térmica da matéria orgânica é o chamado *rank*, ou seja, representa o grau de carbonificação que a rocha sofreu durante sua história geológica (ULHÔA, 2003 *apud* FERREIRA FILHO, 2007). Quanto maior for o *rank* do carvão menor será o conteúdo de matéria volátil e maior a transformação da matéria orgânica sólida em metano (HEEMANN et al., 2009). O aumento do *rank* acarreta o aumento do teor de carbono e do conteúdo energético, bem como promove um decréscimo na umidade. A determinação do *rank* é comumente realizada por meio da medição da refletância do maceral vitrinita presente no carvão, devido sua abundância, facilidade de isolamento e variação contínua de suas propriedades durante o processo de carbonificação (FERREIRA FILHO, 2007).

No carvão fóssil, a intensidade da maturação determina a sua divisão em quatro grandes tipos, sendo eles: linhito, sub-betuminoso, betuminoso e antracito. De acordo com a Aneel (2008) e Cano (2009), 53% das reservas mundiais são constituídas por carvão com alto teor de carbono, enquanto 47% possuem baixo teor de carbono. É importante acrescentar que dentre os quatro grandes tipos, ou classes de carvão, há divisões em subclasses. As subclasses do betuminoso, conforme a classificação da *American Society for Testing and Materials* (ASTM), por exemplo, são: baixo-volátil, médio-volátil e alto-volátil A, B e C; já as do sub-betuminoso também de acordo com a ASTM, são: A, B e C.

3.2.1. Reservas, Produção e Consumo de Carvão no Mundo

Segundo a ANEEL (2008), as reservas de carvão chegam a somar 847,5 bilhões de toneladas, tornando esse mineral o combustível fóssil com maior disponibilidade do mundo. De acordo com a Confederação Nacional da Indústria, CNI (2007), essas reservas quase chegam a ser 3,5 vezes maiores que as de petróleo e de gás natural. Além disso, o carvão é responsável por 25% do consumo mundial de energia, sendo dois terços desse valor destinados a geração de eletricidade e praticamente todo o restante destinado a usos industriais (CNI, 2007).

As reservas carboníferas são quantificadas por meio de critérios geológicos, de mineração e econômicos. No Brasil, os critérios de quantificação das reservas de carvão são definidos pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM)

(EPE, 2007). Desse modo, faz-se necessário conhecer definições em comum como é o caso para recursos e reservas. No caso de recurso, esse faz referência à quantidade do bem mineral que pode ser encontrado em uma região, mesmo que sua extração possa ser economicamente inviável. Do mesmo modo, as reservas podem ser definidas como a quantidade economicamente recuperável de carvão, podendo ser classificadas como provadas (ou medidas) e prováveis (ou indicadas), sendo essa última estimada com um grau de confiança menor (IEA, 2005 *apud* EPE, 2007).

O carvão pode ser encontrado em quantidades expressivas em 75 países (Figura 3.3), com destaque para: Estados Unidos (28,6%), Rússia (18,5%) e China (13,5%). Atualmente, o maior produtor e consumidor mundial de carvão é a China, mas, no *ranking* dos maiores produtores de carvão, também aparecem os Estados Unidos com 587,2 Mtep (milhões de toneladas equivalentes de petróleo), a Índia com 181,0 Mtep e a Austrália que é a maior exportadora do minério no mundo, com 215,4 Mtep (ANEEL, 2008).

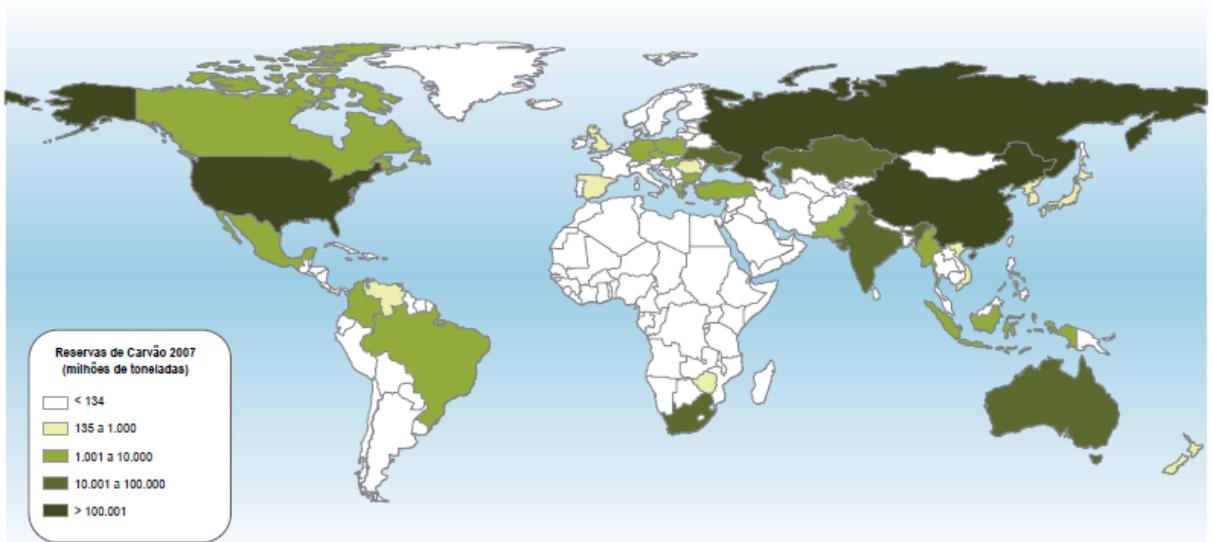


Figura 3.3. Reservas mundiais de carvão em 2007.

Fonte: BP, 2008 *apud* ANEEL, 2008.

3.2.2. Carvão no Brasil

Segundo a Aneel (2008), as maiores jazidas do Brasil situam-se nos estados do Rio Grande do Sul, que detém 89,25% do total das reservas brasileiras, e de Santa Catarina com 10,41%. As jazidas menores, por sua vez, localizam-se no

estado do Paraná (com 0,32%) e de São Paulo (com 0,02%). A maior jazida brasileira é encontrada na região de Candiota, no Rio Grande do Sul, possuindo 38% de todo o carvão nacional (ANEEL, 2008). As reservas carboníferas do Brasil são avaliadas em mais de 32 bilhões de toneladas e, assim como em outros países, um dos mais significantes usos desse carvão é a geração de energia elétrica (CNI, 2007).

Os jazimentos mais importantes que ocorrem, no Rio Grande do Sul e Santa Catarina, de Sudoeste para Nordeste, são: Candiota, Capané, Iruí, Butiá-Leão, Charqueadas, Morungava/Chico Lomã, Santa Terezinha e jazida Sul-Catarinense (Figura 3.4). As camadas de carvão da bacia do Paraná fazem parte da formação Rio Bonito, de idade Permiana, ou seja, com cerca de 290 milhões de anos (GOMES et al., 1998).

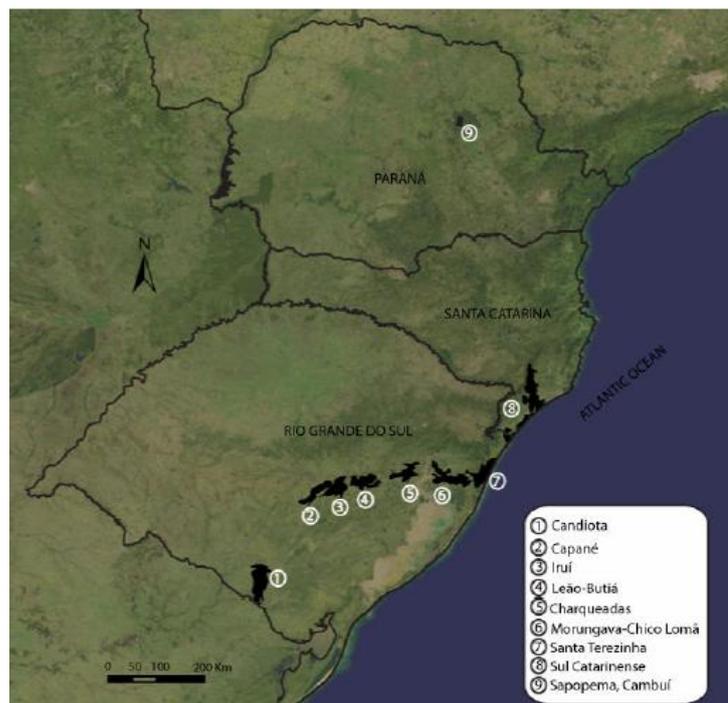


Figura 3.4. Localização das jazidas de carvão no sul do Brasil.

Fonte: Modificado de DNPM/CPRM, 1986 *apud* HEEMANN et al., 2009.

A maior parte do carvão brasileiro é do tipo linhito ou sub-betuminoso, com poder calorífico relativamente baixo (ACIOLI, 1993). Além disso, apresenta altos teores de cinzas e enxofre, o que encarece os custos de produção de energia (CNI, 2007). O Quadro 3.1 mostra a classificação dos carvões em algumas jazidas brasileiras, segundo a ASTM.

Quadro 3.1. Classificação de carvões das jazidas sul- brasileiras.

| Jazida | Classificação |
|----------------------|-----------------------------|
| Candiota | Sub-betuminoso A |
| Capané | |
| Iruí | |
| Butiá-Leão | |
| Charqueadas | |
| Morungava/Chico Lomã | Betuminoso alto volátil B/A |
| Santa Terezinha | Betuminoso alto volátil A |
| Sul-Catarinense | Betuminoso alto volátil A |

Fonte: Adaptado de SOUSA; SILVA; RODRIGUES, 2006 citado por LICKS, 2008.

No Brasil, ao contrário do que acontece em vários países, o carvão representa 1,3% da matriz energética em decorrência da utilização majoritária de hidroelétricas para geração de energia. Em 2010, a capacidade instalada das centrais de geração de energia elétrica do Brasil alcançou 113.327 MW (soma das centrais de serviço público e autoprodutoras). Desse total, as centrais hidráulicas representavam 71,2% e as centrais térmicas 26,2% da capacidade total (EPE, 2011).

Acrescido a isso, o Brasil possui moderadas reservas de carvão com qualidade variada, sem investimentos, sem pesquisas em tecnologias mais limpas, sem infraestrutura para a recuperação desse mineral e com pesquisas virtualmente paralisadas a cerca de 20 anos nessa área (EPE, 2007). Evidência disso é o valor do volume de reservas totais brasileiras, que conforme dados do Balanço Energético Nacional (MME/EPE, 2005) *apud* Empresa de Pesquisa Energética, EPE (2007), está por volta de 32 bilhões de toneladas desde 1985.

3.2.3. Geração de Energia e Impactos Ambientais

A produção de energia mediante o uso de carvão gera, em alguns casos, impactos ambientais significativos que devem ser considerados. Embora sua extração e sua utilização para a geração de eletricidade seja um benefício econômico para os envolvidos na região de mineração (aumento de empregos e da demanda por bens e serviços, entre outros), o processo envolvido para que isso aconteça pode causar significativos impactos socioambientais (ANEEL, 2008). No

entanto, esse cenário vem se alterando e alternativas de tecnologias mais limpas estão começando a surgir para mudar as perspectivas desse minério tão abundante no mundo.

A ocupação de grandes áreas exigidas para a exploração de reservas de carvão, na lavra a céu aberto, interfere na vida da população local no que diz respeito a poeira, a erosão do solo, a poluição sonora, entre outros. As principais fontes de poluição originadas pela mineração são provenientes da emissão de poeira nas estradas de acessos e dos processos de perfuração e de detonação (RIGOTTI, 2002). No entanto, o efeito mais severo é o volume de emissões de gases como: óxidos de nitrogênio (NOx), óxidos de enxofre (SOx) e o CO₂, provenientes da combustão do carvão. Além disso, as usinas a carvão podem gerar grandes quantidades de resíduos sólidos, como: cinzas leves ou secas, pesadas ou úmidas, lama, entre outros (EPE, 2007).

Conforme afirma Rigotti (2002), a mineração do carvão a céu aberto acarreta também impactos negativos sobre as águas superficiais e subterrâneas, pois provoca a redução do pH, o aumento da condutividade dos sólidos em suspensão e íons de metais pesados em solução. O assoreamento realizado nas drenagens naturais pode provocar, por sua vez, o aumento da salinidade das águas e até mesmo a erradicação dos ecossistemas aquáticos, caso não sejam aplicadas as melhores práticas ambientais para a extração convencional de carvão.

Diversos países, conforme já comentado, são dependentes do carvão como matéria-prima para a geração de energia elétrica, até por que o investimento para a extração desse minério é aproximadamente 5 vezes inferior ao investimento requerido para a extração do gás natural e cerca de 4 vezes inferior ao da extração do petróleo (WEC, 2004 *apud* EPE, 2007). No caso da geração de energia no Brasil, sabe-se que a mesma não é dependente do uso de carvão como insumo, mas é importante conhecer o cenário o qual esse combustível fóssil se insere. De acordo com a Epe (2007) e Cano (2009), pode-se dizer que o setor carbonífero brasileiro enfrenta grandes preocupações, sendo elas: problemas ambientais; infraestrutura (em especial o transporte); falta de estímulo ao desenvolvimento tecnológico; aspectos econômicos; ausência de participação em leilões de energia; problemas

políticos e, por fim os de natureza geopolítica e estratégica, citando como exemplo sua forte dependência em importações (Figura 3.5).

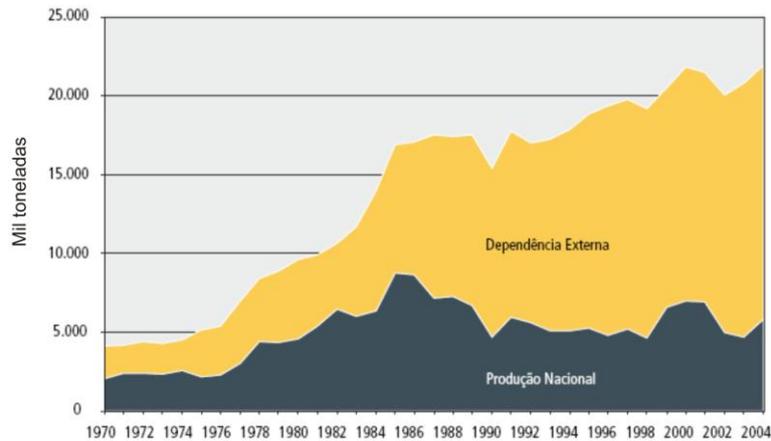


Figura 3.5. Dependência externa do carvão no Brasil.

Fonte: MME/EPE, 2005 *apud* EPE, 2007.

A potência total instalada e em operação em termelétricas a carvão no Brasil (Quadro 3.2), segundo dados retirados da ANEEL (2008) é de aproximadamente 1.905 MW. Essas usinas localizam-se no sul do país, próximas as minas de carvão, isso porque o carvão nacional tem alto conteúdo de matéria mineral (até 70%) o que inviabiliza economicamente seu transporte para locais mais distantes. Desse modo, térmicas a carvão fora da região sul têm sido associadas à importação desse recurso energético (EPE, 2007).

Quadro 3.2. Termelétricas a carvão no Brasil.

| Usinas | Potência (kW) | Município/Estado | Proprietário |
|----------------------------|---------------|----------------------|--|
| Charqueadas | 72.000 | Charqueadas/RS | Tractebel Energia S/A |
| Figueira | 160.250 | Figueira/PR | Copel Geração S/A |
| Jorge Lacerda I e II | 232.000 | Capivari de Baixo/SC | Tractebel Energia S/A |
| Jorge Lacerda III | 262.000 | Capivari de Baixo/SC | Tractebel Energia S/A |
| Jorge Lacerda IV | 363.000 | Capivari de Baixo/SC | Tractebel Energia S/A |
| Presidente Médici A, B e C | 796.000 | Candiota/RS | Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica |
| São Jerônimo | 20.000 | São Jerônimo/RS | Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica |

Fonte: Adaptado de ANEEL, 2008.

De acordo com a ANEEL (2008), sabendo-se de todos os impactos negativos gerados pelo carvão e da atual conscientização no mundo pela preservação do meio ambiente, principalmente no que diz respeito ao efeito estufa e às mudanças climáticas, deve ser adotada uma nova postura frente ao processo de mineração e produção de energia. Logo, surge a importância de se investir em obras de mitigação e em desenvolvimento de tecnologias limpas (*Clean Coal Technologies*, ou CCT).

Dessa maneira, conforme afirma a EPE (2007), o carvão pode contribuir para o aumento das taxas de eletrificação nos países em desenvolvimento, bem como ajudar a reduzir níveis de pobreza, contribuir para a industrialização e para uma melhor qualidade de vida da população local de maneira ambientalmente correta. Atualmente, no Brasil, já existem áreas de mineração totalmente reabilitadas, na qual são desenvolvidas outras atividades, até mesmo de valor comercial (EPE, 2007).

Assim, as principais medidas adotadas para tornar a mineração do carvão mais limpa e menos impactante são: a recuperação do solo; a destinação de resíduos sólidos e as negociações com a comunidade local. Acrescido a isso, devido ao interesse na produção de energia elétrica, aparecem os principais investimentos em pesquisa e desenvolvimento para a redução das emissões de CO₂ (ANEEL, 2008). Recentemente, então, diversas tecnologias estão sendo desenvolvidas e aplicadas em termelétricas com o objetivo de aumentar a eficiência energética e reduzir as emissões associadas aos sistemas de limpeza de gases (EPE, 2007). Nesse cenário vem surgindo também as rotas não convencionais, como o exemplo, têm-se o armazenamento geológico de carbono e o método de gaseificação *in situ* de carvão, sendo recentemente citadas em uma nota técnica desenvolvida pelo CEPAC para construção do *Roadmap* Tecnológico para Produção, Uso Limpo e Eficiente do Carvão Mineral Nacional Horizontes em 2022 e 2035 do Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE).

3.3. Gaseificação *in situ* de Carvão (UCG)

O carvão é visto como uma opção viável para garantir a segurança energética devido a sua grande disponibilidade. No entanto, de acordo com Bialecka (2009), o uso futuro desse minério depende muito da aplicação de tecnologias apropriadas que sejam capazes de reduzir os impactos negativos gerados por sua mineração/combustão, além de permitirem a exploração dos seus recursos economicamente inviáveis de serem acessados.

Nesse contexto, a gaseificação *in situ* de carvão (UCG) é considerada uma alternativa promissora para a futura utilização do carvão, sendo economicamente viável, inclusive a grandes profundidades (SHAFIROVICH; VARMA, 2009 e BIALECKA, 2009), haja vista que, conforme cita Walter (2007), menos de um sexto do carvão mundial é economicamente acessível. Além disso, o UCG é capaz de reduzir substancialmente a poluição e ao mesmo tempo permitir o controle de poluentes, tais como enxofre, NO_x e mercúrio; e as emissões de gases de efeito estufa associados com o uso do carvão quando vinculado ao sequestro geológico de carbono (FRIEDMANN, 2009).

3.3.1. Conceito

A gaseificação é um processo químico que converte um combustível sólido ou líquido em um gás (BURTON; FRIEDMANN; UPADHYE, 2006), nesse caso, converte carvão em gás de síntese ou *syngas* (FRIEDMANN, 2009). Os componentes principais desse produto gasoso são: hidrogênio (H₂), CO₂, monóxido de carbono (CO), CH₄ e vapor, sendo suas proporções variáveis dependendo das características do carvão e das condições de pressão, temperatura, entre outras, em que ocorre o processo de gaseificação (KHADSE et al., 2007).

A gaseificação pode ser realizada tanto em uma planta na superfície, mediante a utilização de gaseificadores (ex. IGCC), como no próprio meio subterrâneo, no caso a camada de carvão (*in situ*). Em acréscimo, é importante diferenciá-la do processo de combustão do carvão, pois, enquanto a atmosfera

redutora da gaseificação converte o enxofre do carvão em ácido sulfídrico (H_2S) e o nitrogênio em amônia (NH_3), a combustão (oxidação) produz o SO_2 e os NO_x (MOREEA-TAHA, 2000 *apud* HEEMANN et al., 2009).

O produto da gaseificação *in situ* é, então, o gás de síntese ou *syngas*, sendo esse extraído por meio de poços (verticais e/ou horizontais) adjacentes perfurados até a camada de carvão (BURTON; FRIEDMANN; UPADHYE, 2006). Desse modo, a configuração básica do método de UCG é fundamentada na perfuração de um poço para injeção de agente oxidante e outro para a produção do gás de síntese, denominado de poço produtor, conforme demonstra a Figura 3.6. No poço de injeção é bombeado o oxidante, cuja função é causar a oxidação parcial do carvão, podendo ser ele o ar, o oxigênio, o vapor de água, o CO_2 ou uma mistura dos mesmos, a altas temperaturas e sob pressão (COLLOT, 2006). A oxidação produzirá calor que, por sua vez conduzirá as reações de gaseificação que são fundamentais para a produção do gás de síntese (FRIEDMANN, 2009).

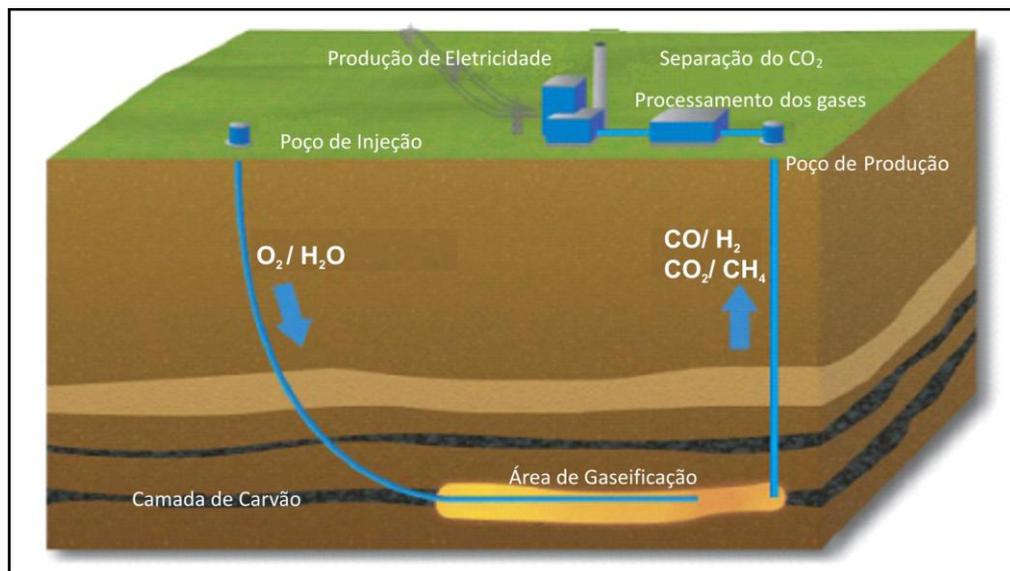


Figura 3.6. Esquema da Gaseificação *in situ* de carvão.

Fonte: KEMPKA et al., 2010.

No poço produtor, ou poço de produção, (que pode ser um ou mais dependendo das características da camada, por exemplo), o gás produzido pelas reações é trazido para a superfície, para posterior processamento, transporte e utilização (BURTON; FRIEDMANN; UPADHYE, 2006). Esse gás é uma fonte potencial de energia elétrica ou de matéria-prima para a fabricação de produtos

químicos e de combustíveis líquidos, que serão detalhados mais adiante (FRIEDMANN, 2009).

3.3.2. Projetos de Gaseificação *in situ* no Mundo

Recentemente, muitos países vem se empenhado para a realização de testes e estudos para gaseificar o carvão (GAS TECH, 2007). A Rússia foi o primeiro país a dar ênfase a essas pesquisas e a testar a viabilidade da gaseificação *in situ* de carvão (GAS TECH, 2007), sendo de acordo com Friedmann (2009) a pioneira na aplicação do UCG em grande escala. O *site*, localizado em Angren, Uzbequistão, ainda em operação (desde a década de 1960), é uma referência em UCG, servindo de modelo para diversos projetos pilotos no mundo (FRIEDMANN, 2009).

O desenvolvimento da gaseificação *in situ* de carvão, ao longo dos últimos anos, teve destaque em países como China, Austrália e África do Sul. Na África do sul um projeto piloto de UCG no campo de Joanesburgo alcançou a ignição em janeiro de 2007. Na Austrália, um ensaio de UCG em grande escala foi produzido de 1999 a 2003 envolvendo a tecnologia desenvolvida no Uzbequistão. O projeto abrangeu a gaseificação de 35 mil toneladas de carvão (GAS TECH, 2007) e recuperou 95% dos recursos de carvão (SHAFIROVICH; VARMA, 2009). Atualmente os projetos comerciais de UCG estão sendo desenvolvidos por, pelo menos, três empresas australianas: a *Cougar Energy Ltd.*, a *Linc Energy Ltd.* e a *Carbon Energy Ltd.* (SHAFIROVICH; VARMA, 2009).

Na China, está em andamento o maior programa mundial de UCG, confirmado pelo número relativamente grande de patentes realizadas na área de UCG nesse país (GAS TECH, 2007 e SHAFIROVICH; VARMA, 2009). Atualmente, o projeto de UCG que está repercutindo mundialmente é uma parceria do governo chinês com o governo britânico. Essa parceria tem o objetivo de gaseificar 6 milhões de toneladas de carvão por ano no subsolo chinês, gerando 1000 MW de energia elétrica por cerca de 25 anos. O orçamento está estipulado em 1,5 bilhões de dólares e o projeto visa ampliar o acesso ao carvão e reduzir simultaneamente o seu impacto ambiental (FAIRLEY, 2011).

Vários países em desenvolvimento já iniciaram pesquisas em UCG. Na Índia, o interesse em UCG é particularmente elevado, pois há vastas reservas de carvão, escassez de gás natural e grande parte do carvão do país está em depósitos difíceis de serem minerados convencionalmente. Paquistão, Vietnã, Turquia, Polônia, Cazaquistão e Hungria também iniciaram suas pesquisas para verificar o potencial da gaseificação *in situ* em seus países (FRIEDMANN, 2009 e NETL, [2010]). Na Figura 3.7, são apresentados os países que vem desenvolvendo atividades de UCG (pesquisa, *sites* pilotos e comerciais, entre outras) nos últimos anos.



Figura 3.7. Países que desenvolvem atividades de UCG.

Fonte: Adaptado de UCG ASSOCIATION, [2012a].

Os Estados Unidos entre os anos de 1974 e 1989 foram o principal local de pesquisa e implantação de esforços em várias áreas das energias renováveis e fósseis, incluindo o UCG. Em um período superior a 15 anos, os EUA conduziu 33 projetos piloto de UCG, localizados em *Wyoming*, Texas, Alabama, *West Virginia* e em Washington (FRIEDMANN, 2009). Embora não tenha plantas industriais de UCG, atualmente os EUA possui importantes instituições envolvidas em pesquisas, como o Laboratório Nacional *Lawrence Livermore* e o Laboratório Nacional de

Energia e Tecnologia (NETL). Em contrapartida, fora dos Estados Unidos, as universidades estão desempenhando um papel importante no desenvolvimento de UCG, como exemplo, tem-se: a Universidade Chinesa de Minas e Tecnologia, o Instituto Indiano de Bombaim na Índia, além de universidades no Reino Unido, no Canadá, na Austrália e recentemente no Brasil com a PUCRS (FRIEDMANN, 2009).

3.4. Vantagens e Desvantagens da Gaseificação *in situ* de Carvão

Associados ao UCG, existem benefícios tanto econômicos como ambientais. A gaseificação *in situ* de carvão, então, permite o aproveitamento da energia contida em camadas de carvão, bem como das camadas que são economicamente ou tecnicamente inviáveis de serem exploradas se fossem utilizadas as técnicas de mineração convencional, sendo capaz de recuperar, de acordo com a UCG Association (2012b) até 80% do poder calorífico desse minério. Os custos operacionais também são reduzidos, bem como os danos na superfície e os problemas de segurança e saúde ocupacional em minas (BURTON; FRIEDMANN; UPADHYE, 2006).

A perturbação da superfície é minimizada se comparada a grandes extensões necessárias para a mineração, sendo assim, as plantas de UCG requerem um menor espaço para efetivarem a extração energética do carvão (GAS TECH, 2007). Além disso, de acordo com Burton, Friedmann e Upadhye (2006) e Gas Tech (2007), proporcionam a eliminação de grande parte do desperdício de energia e da poluição associada à movimentação e ao armazenamento de resíduos do carvão na superfície, conforme comparativo mostrado na Figura 3.8. O resíduo sólido desse processo, a cinza, deixa de ser manuseada, pois permanece na cavidade subterrânea formada após a reação, preenchendo cerca de um quarto a um terço do volume de carvão original (PERKINS, 2004 *apud* ZIELENIEWSKI; BRENT, 2008).

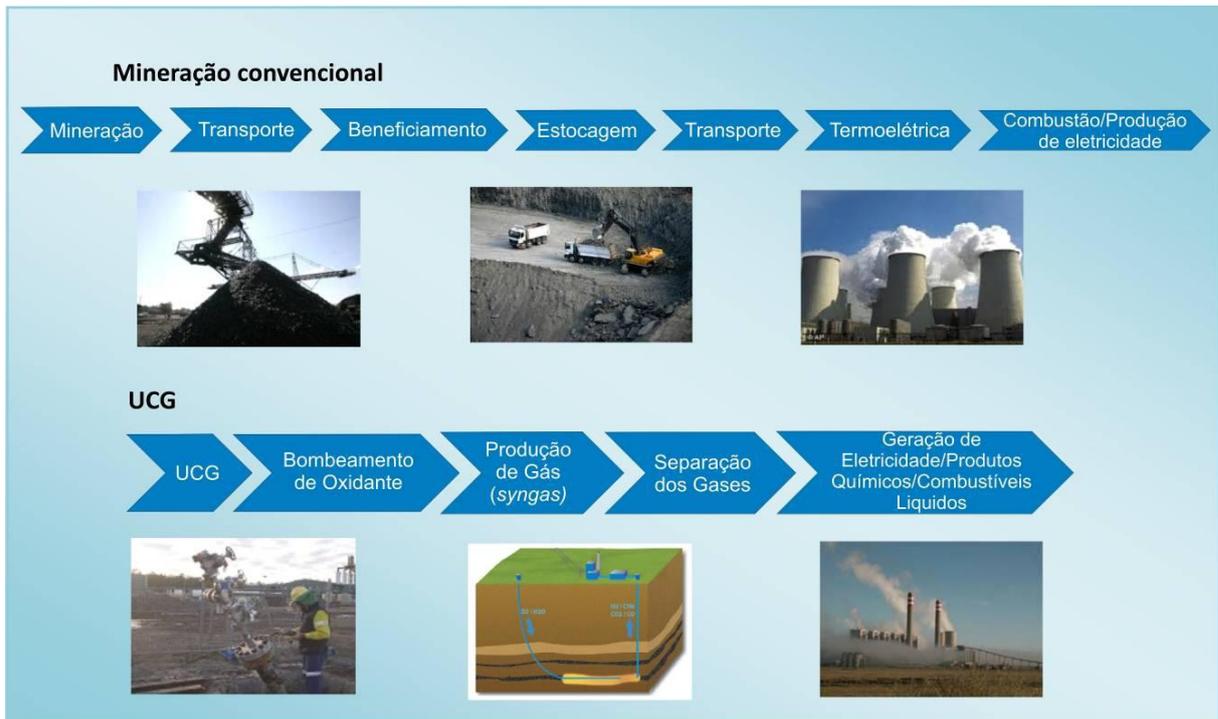


Figura 3.8. Comparativo entre o processo de UCG e a mineração convencional de carvão.

Fonte: Adaptado de ESKOM, 2008.

O UCG, em relação à combustão do carvão na superfície, produz menor volume de gases de efeito estufa, justamente por não ocorrer a etapa de mineração e transporte. Não há produção de SO_x e NO_x, sendo que outros poluentes como o mercúrio e o enxofre são reduzidos em volume e mais fáceis de serem manuseados, uma vez que permanecerão em grande parte no subsolo (BURTON; FRIEDMANN; UPADHYE, 2006). Cabe salientar novamente que as cavidades formadas como resultado do processo da gaseificação *in situ* de carvão poderiam potencialmente ser utilizadas para o armazenamento geológico de CO₂ (SHAFIROVICH; VARMA, 2009).

Realizando um comparativo com a gaseificação de superfície, pode-se dizer que os custos de investimento de capital (devido a ausência de um gaseificador) e os custos de produção de *syngas* são reduzidos em pelo menos 25%. Desse modo, o produto final torna-se muito mais competitivo frente às outras formas de produção energética a partir do carvão (GAS TECH, 2007).

O processo de UCG, no entanto, também tem áreas de potencial melhoria e adaptação às circunstâncias locais que devem ser abordadas através de pesquisa e

desenvolvimento adicionais (SHAFIROVICH; VARMA, 2009). Deve-se levar em conta, conforme cita a *Gas Tech* (2007) que a permeabilidade natural da camada de carvão nem sempre é suficiente para que haja transmissão dos gases no seu processo de gaseificação. Há necessidade, então, de melhorias para otimizá-la, o que inclui, segundo Shafirovich e Varma (2009), a ligação entre poços de injeção e poços de produção e a construção de canais dentro da camada de carvão.

A potencial contaminação das águas subterrâneas e os eventuais fenômenos de subsidência do solo são duas grandes preocupações em um projeto de UCG e podem ser desvantagens a esse processo, caso ele não seja corretamente implementado, monitorado e não estabeleça medidas preventivas. Além disso, são também consideradas grandes preocupações ambientais, pois, o processo de gaseificação *in situ* ao permitir que o carvão seja retirado do subsolo como um gás, acaba gerando uma cavidade, ou seja, cria espaços vazios em subsuperfície. Esses espaços vazios, antes ocupados pelo carvão, representam um problema ao UCG, podendo ocasionar uma deformação na superfície (subsidência), o que comprometeria não só a instalação e a operação de UCG, mas também a aceitação pública (DAGGUPATI et al., 2011; FRIEDMANN, 2009 e BURTON; FRIEDMANN; UPADHYE, 2006).

A cavidade subterrânea formada também pode abrigar os subprodutos da gaseificação e do processo de pirólise, tornando-se uma fonte de poluentes gasosos e líquidos. Nesse caso, o risco de ocorrer contaminação das águas subterrâneas ocorre principalmente devido à dispersão/migração desses gases poluentes a altas pressões para camadas permeáveis circundantes, se essas existirem. Assim, pode-se dizer que o transporte ou não desses contaminantes estará vinculado às características da área selecionada (permeabilidade das rochas, configuração geológica, hidrogeologia, entre outras) para a realização do método UCG (SHU-QIN et al., 2007).

A fase pós-operacional, conforme afirma Shu-Qin et al. (2007), é também uma condição crítica para a contaminação de águas subterrâneas. A estratégia do desligamento é, portanto, resfriar o reator, o mais rapidamente possível para minimizar a formação de poluentes. Desse modo, a injeção do oxidante é

suspendida, e exceto que o desligamento tenha sido forçado pelo ingresso de água subterrânea, a injeção de água permanece. Logo, em locais onde o fluxo de águas subterrâneas não é alto o suficiente para esfriar a cavidade com rapidez, deve ser injetado água da superfície (SURY et al., 2004).

O poço de produção de gás é mantido em sua vazão máxima. Entretanto, sua qualidade irá ficando gradativamente inferior, até conter proporções elevadas de CO₂, vapor e compostos orgânicos. Assim, se o reator não é esfriado após desligar, a pressão da cavidade pode se igualar ou ficar rapidamente superior à pressão hidrostática, permitindo, então, o transporte de grandes quantidades de produtos de pirólise para fora da cavidade e arredores (SURY et al., 2004).

Dessa maneira, é importante ressaltar que as preocupações ambientais podem ser mitigadas e reduzidas por meio do uso de sistemas de monitoramento operacional, que pode detectar perdas de gás e garantir que as pressões da zona de reação sejam mantidas abaixo da pressão hidrostática. Acrescido a isso, deve-se: garantir que os poços utilizados no processo sejam devidamente selados; selecionar um local apropriado e, realizar pesquisas e estudos que permitam aprimorar e garantir uma adequada operação de UCG (SHU-QIN et al., 2007).

3.5. Reações Químicas da Gaseificação *in situ* de Carvão

A química envolvida nos processos que ocorrem durante a gaseificação *in situ* de carvão é bastante complexa, apesar das reações serem conhecidas e compreendidas. Essa complexidade pode ser percebida, então, na dependência da composição final do gás ao equilíbrio termodinâmico e às taxas reacionais, as quais são controladas pela cinética da reação e pelo tempo de exposição dos reagentes ao carvão (HETHERINGTON; THAMBIMUTHU, 2003).

A cinética de reação tem um forte vínculo com as condições de operação do processo de gaseificação e com a própria natureza do carvão a ser gaseificado. Em relação a esse último, dependendo da sua composição, da presença de impurezas minerais (algumas são conhecidas por ter atividade catalítica em reações de

gaseificação) e da sua reatividade, o gás gerado pode vir a sofrer variações significativas na sua composição e qualidade (NETL, [2010]).

Da mesma forma, as escolhas dos parâmetros de processo (pressão e temperatura) e do agente oxidante podem influenciar na composição e no poder calorífico dos gases combustíveis obtidos pela reação química (BIALECKA, 2009). Os agentes oxidantes, já referidos, podem ser: vapor de água, oxigênio, ar, hidrogênio, CO₂ ou uma mistura de alguns desses gases. O mais usual é a utilização de ar e vapor de água. Entretanto, em alguns casos, utiliza-se como oxidante o oxigênio puro, ocasionando, dessa forma, uma redução nas perdas de energia associada à presença de gases inertes, entre eles o N₂ (que representa quase 80% em volume do ar atmosférico). O gás obtido nessas condições detém um maior poder calorífico, contudo o alto custo para obtenção de O₂ com uma pureza elevada é uma importante limitação econômica dessa alternativa (HEEMANN et al., 2009).

Assim, pode-se dizer que além de ser complexa, a química envolvida nos processos de UCG é dependente de inúmeras variáveis, como as citadas acima. De acordo com Bialecka (2009), para entender um pouco mais o processo de gaseificação *in situ* é importante apontar três zonas básicas de reação, sendo elas: a zona de oxidação, a zona de redução e a zona de pirólise (Figura 3.9). O conhecimento das mesmas é outro ponto fundamental para o conhecimento do gás de síntese gerado.

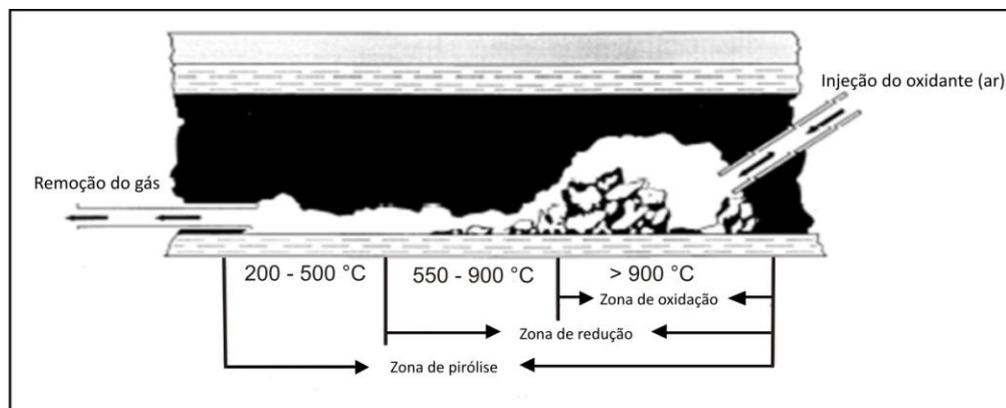


Figura 3.9. Zonas de gaseificação.

Fonte: Adaptado de adaptado de ANON, 1977 *apud* CHAIKEN; MARTIN, 1992.

Na zona de oxidação as reações que ocorrem são exotérmicas e fornecem energia para o sistema. Logo, elas se tornam fundamentais para o progresso do processo de UCG, pois são responsáveis por manter a temperatura ao longo das zonas de gaseificação. Além disso, segundo Bialecka (2009), a presença do O₂, no poço de injeção, possibilita nessa zona o aparecimento do CO e do CO₂, conforme demonstram as Equações 3.1 e 3.2.

Reação de oxidação:



Reação de oxidação parcial:



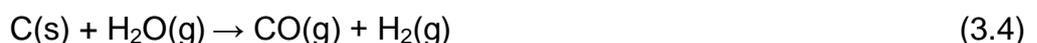
Outra reação de oxidação está representada na Equação 3.3. Conforme afirmam Redman, Fenerty e Fowler (2009), essa reação além de ser muito rápida permite também o consumo do O₂ ainda disponível.

Reação de oxidação:



Na zona de redução surge a reação mais importante, a de produção do gás de síntese (BURTON; FRIEDMANN; UPADHYE, 2006). Usualmente é conhecida por reação de gaseificação e é fortemente dependente do vapor de água para ocorrer. Assim, caso esse vapor já não esteja contido na própria camada de carvão ou em camadas adjacentes, o mesmo deverá ser injetado juntamente com o O₂ ou o ar (oxidantes mais comuns), possibilitando a formação do H₂ e do CO, conforme demonstra a Equação 3.4 (SHAFIROVICH; VARMA, 2009). De acordo com Burton, Friedmann e Upadhye (2006), é igualmente nesse momento que podem também existir as reações exotérmicas colaterais (Equações 3.5 e 3.6), como as de formação de metano.

Reação de gaseificação:



Reação de formação de metano:



Reação de gaseificação com o hidrogênio:



Enquanto a reação de gaseificação praticamente independe do aumento da pressão, as reações de formação do metano são favorecidas por um aumento na pressão. Desse modo, a formação preferencial do *syngas*, ou seja, CO e H₂ ocorre em alta temperatura e baixas pressões, enquanto a formação do metano é favorecida a baixa temperatura e alta pressão (HETHERINGTON; THAMBIMUTHU, 2003). Na zona de redução também surge o CO, representado pela Equação 3.7:

Reação de Boudouard:



Segundo Burton, Friedmann e Upadhye (2006) é possível obter uma maior quantidade de H₂ no gás de síntese, para isso, o vapor disponível deverá reagir com o CO para gerar mais H₂ e conseqüentemente, CO₂ em uma reação exotérmica, conforme Equação 3.8. Em razão disso, é necessário adequar as condições de projeto com os produtos as quais se deseja obter, para que não haja assim, a produção de quantidades significantes de produtos indesejados, como por exemplo, o CO₂. Por fim, em relação à última zona, conhecida por zona de pirólise, pode-se resumir que é nessa em que ocorre a eliminação da matéria volátil, composta por uma diversidade de hidrocarbonetos, CO, CO₂, vapores de alcatrão, vapor de água, entre outros (CHAIKEN; MARTIN, 1992 e FERREIRA FILHO, 2007).

Reação de conversão:



3.6. Características do Carvão que Influenciam a Gaseificação *in situ* de Carvão

O conhecimento das características da camada total de carvão, incluindo níveis de siltitos, siltitos carbonosos, argilitos e/ou leitos de pirita (propriedades físicas e químicas), bem como das informações geológicas da jazida são determinantes para iniciar um processo de gaseificação *in situ* de carvão. Em relação às propriedades do carvão, as mais influentes no processo de gaseificação são: teor de umidade, teor de cinzas e reatividade (HETHERINGTON; THAMBIMUTHU, 2003).

A composição do carvão, referente ao teor de cinzas, teor de umidade e até mesmo ao teor de enxofre, exerce influência direta na qualidade do gás formado durante o processo de UCG. Carvões com teores de cinzas superiores a 50%, por exemplo, tendem a ter seu poder calorífico reduzidos, além de dificultarem o controle do processo de gaseificação e, caso superem o teor de 60% podem ocasionar a inibição do processo de UCG (BIALECKA, 2009; MASTALERZ et al., 2011 e INDIANA UNIVERSITY, 2011). Em relação ao teor de enxofre, quanto maior for o seu valor, mais o gás produzido durante a gaseificação *in situ* necessitará de limpeza para remoção de impurezas. Além disso, teores de umidade inferiores a 15% são necessários para a ocorrência de uma gaseificação ótima (LONG, 2011 *apud* INDIANA UNIVERSITY, 2011).

Apesar das recomendações de que não haja nenhum sistema aquífero à 30m da camada de carvão ou que aquíferos localizados acima da camada de carvão tenham uma distância mínima de 25 vezes a altura da própria camada de carvão, algum fluxo de água, quer a partir de injeção direta na camada de carvão, ou presente dentro da mesma (umidade), continua a ser necessário para manter a reação de gaseificação (MASTALERZ et al., 2011; SURY et al., 2004 e SHAFIROVICH; VARMA, 2009). Desse modo, pode-se dizer que o fluxo de água, tem grande influência sobre o processo de UCG, sendo de extrema importância para a ocorrência da reação de gaseificação, conforme já comentado. Entretanto, a ocorrência de aquíferos nas imediações da camada de carvão a ser gaseificada ou

um forte fluxo de água natural podem reduzir a qualidade do gás de síntese ou até mesmo interromper a gaseificação (BIALECKA, 2009).

Outra propriedade do carvão capaz de afetar o UCG, sendo fundamental para a ocorrência de seu processo, é a reatividade, isso porque a reatividade é influenciada principalmente pelo *rank* do carvão e esse por sua vez, é um importante influente na qualidade do *syngas* gerado (INDIANA UNIVERSITY, 2011). Conforme Hetherington e Thambimuthu (2003), vários estudos realizados na área de gaseificação de carvão permitem demonstrar que carvões de baixo *rank* podem ter reatividade até 100 vezes maior do que carvões de alto *rank*. Essa variação pode ser atribuída a um maior número de sítios ativos na superfície de carvões de baixo *rank*, bem como uma maior porosidade e um maior teor de cálcio nas cinzas. No tópico seguinte essa propriedade será mais detalhada, devido sua relativa importância ao UCG.

Com relação às considerações sobre a camada de carvão, os valores de porosidade e permeabilidade (ainda contendo dados escassos), apesar de não serem critérios decisivos para a realização de UCG são fatores importantes para o processo de gaseificação. Camadas mais permeáveis permitem a conexão mais efetiva entre os poços de injeção e de produção, levando a uma maior taxa de gaseificação (SHAFIROVICH; VARMA, 2009). Pesquisadores recomendam valores de permeabilidade de 50 a 150 mili-Darcy ou mD (na qual 1Darcy corresponde a $1 \times 10^{-12} \text{m}^2$) (OLIVER; DANA, 1991 *apud* INDIANA UNIVERSITY, 2011).

A permeabilidade de carvões de baixo *rank* é maior em ordem de grandeza do que a de carvões de alto *rank*, por isso, além de outros motivos já comentados, que carvões de baixo *rank* são preferidos para a gaseificação *in situ* de carvão (HETHERINGTON; THAMBIMUTHU, 2003). Por outro lado, maior porosidade e permeabilidade aumentam o fluxo de água (proveniente da própria camada ou de camadas adjacentes) e aumentam as perdas do gás produzido (SHAFIROVICH; VARMA, 2009).

Acrescido a isso, de acordo com Sury e outros (2004), é recomendado também um leve mergulho (ângulo de inclinação) nas camadas de carvão para

facilitar a drenagem e a manutenção do equilíbrio hidrostático dentro da zona de gaseificação. Conforme afirma a *Gas Tech* (2007) são recomendados ângulos de inclinação de 0 a 20 graus, no entanto, esse parâmetro não é considerado um fator crítico para a seleção e operação de *sites* de UCG.

Os estudiosos ainda indicam que a ocorrência de rochas maçicas com pelo menos 15 m de espessura acima da camada de carvão são importantes para impedir a ocorrência de subsidência, enquanto que a presença de rochas relativamente impermeáveis ao redor da camada são importantes para evitar a fuga de gases do produto, bem como reduzir o fluxo de água do solo para a camada de carvão (MASTALERZ et al., 2011).

Nesse contexto, cabe ressaltar que a camada de carvão deve ser também contínua ao longo da área a ser gaseificada, pois grandes descontinuidades podem igualmente levar à interrupção da reação (HETHERINGTON; THAMBIMUTHU, 2003). Já as fraturas, ou seja, *cleats* (Figura 3.10) que ocorrem nas camadas de carvão, podem ser positivas no que diz respeito a exercer um controle fundamental na estabilidade do carvão e no fluxo de fluidos na camada (LAUBACH et al., 1998).

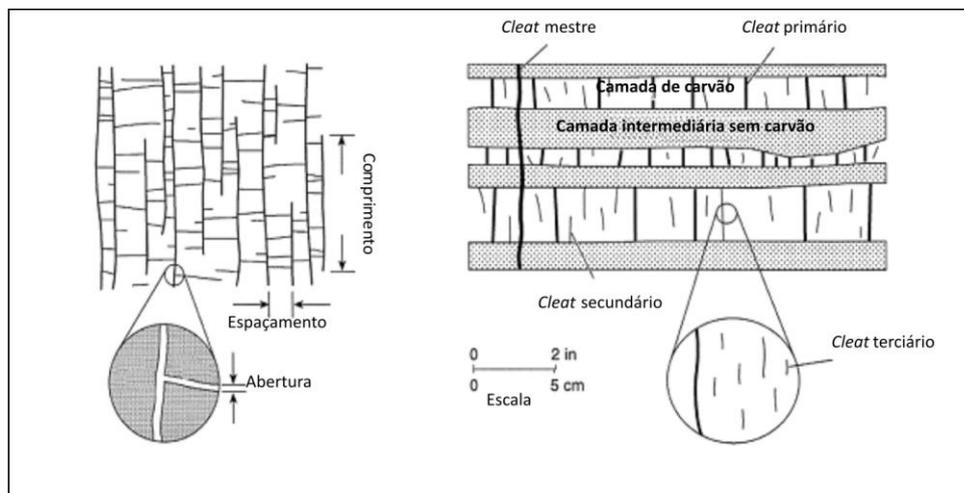


Figura 3.10. Esquema da geometria de fratura do carvão (*cleats*).

Fonte: LAUBACH et al., 1998.

Assim, a estrutura física da camada de carvão, com poros e *cleats* (onde gás e água podem estar presentes), torna-se muito importante para a realização do processo de UCG. Conforme visto anteriormente, a estrutura do carvão é formada

por macroporos e mesoporos, na qual existe apenas gás livre e, microporos na qual ocorre o processo de adsorção. A adsorção é fundamental, pois antecede as reações químicas do processo de gaseificação (LAUBACH et al., 1998).

A espessura contínua da camada de carvão e a profundidade são os principais fatores a serem considerados na gaseificação *in situ*. Todavia, as informações disponíveis sobre a espessura mínima que deve ter uma camada de carvão para poder ser gaseificada, ainda são contraditórias (HETHERINGTON; THAMBIMUTHU, 2003 e SHAFIROVICH; VARMA, 2009). Conforme Zieleniewski e Brent (2008) a espessura mínima que uma camada de carvão deve ter para o processo de UCG é de aproximadamente 0,35 m. Já, de acordo com a Indiana University (2011), a espessura da camada deve permanecer entre 2 a 15 m, com variação inferior a 25% ao longo da camada de carvão.

Segundo Zamzow (2010), camadas de carvão com espessuras menores de 2 metros produzem um gás de baixa qualidade, composto principalmente de CO₂, mas contendo também pequenas quantidades de H₂, CO, e CH₄, isso porque espessuras menores permitem que o calor escape para os arredores da camada de carvão, impedindo o progresso das reações. Em relação a camadas mais espessas o mesmo autor afirma que embora não alterem muito a quantidade de CO₂, CO e CH₄ elas são capazes de produzir muito mais H₂. Além disso, espessuras maiores exigem menos poços para a extração do gás produzido. De acordo ainda com Zamzow (2010), espessuras inferiores a 2 m, como por exemplo, as de 0,5 m podem ser utilizadas no UCG, porque provavelmente há influência positiva da profundidade em que a camada de carvão se encontra (Figura 3.11).

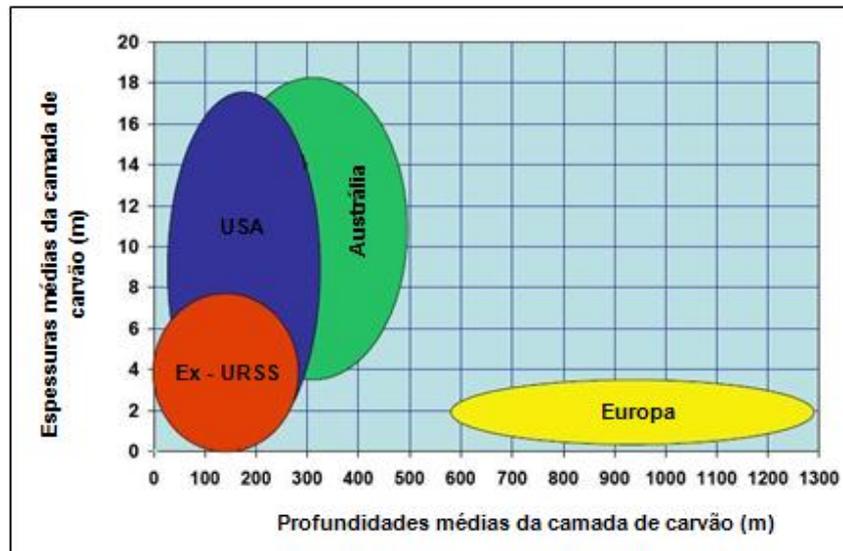


Figura 3.11. Operações de UCG no mundo em relação à espessura e à profundidade da camada.

Fonte: BURTON; FRIEDMANN; UPADHYE, 2006.

Em relação à profundidade são recomendadas profundidades superiores a 200 m, sendo que profundidades superiores a 300 m necessitam de tecnologias de perfuração mais complicadas, porém são sugeridas para diminuir o risco de perdas descontroladas de gás e de contaminação de aquíferos. Para a combinação de UCG e armazenamento de carbono são razoáveis profundidades acima de 350 m (BURTON; FRIEDMANN; UPADHYE, 2006 e SHAFIROVICH; VARMA, 2009).

As informações sobre a profundidade ideal que deve estar uma camada de carvão para a aplicação do método de UCG também têm grandes variações de autor para autor. Segundo Oliver e Dana (1991) *apud* Indiana University (2011) a profundidade ideal deve ficar entre 92 e 460 m, com preferência para camadas com mais de 200 m de profundidade para evitar problemas de subsidência. O mesmo autor ainda salienta que camadas de carvões localizadas em maiores profundidades e conseqüentemente maiores pressões poderão produzir gás com um maior poder calorífico. Assim, a escolha da área para a gaseificação também deverá ser baseada no equilíbrio entre os altos custos e as vantagens de utilizar o UCG em profundidades maiores (SHAFIROVICH; VARMA, 2009). Na Tabela 3.1 é possível visualizar um resumo das principais características que influenciam na escolha do método de gaseificação *in situ* e seus valores ideais conforme alguns autores. Salienta-se que os valores da Tabela 3.1 são apenas referenciais, visto que, cada

bacia carbonífera é diferente e para cada projeto de UCG haverão características ideais diferenciadas.

Tabela 3.1. Características ideais do carvão para o UCG.

| Parâmetros | Valores desejados |
|--|--|
| Teor de cinzas (%) | < 50 ^A / <60 ^F |
| Umidade do carvão (%) | < 15 ^A |
| Teor de enxofre (%) | < 1 ^A |
| Distância do aquífero mais próximo (m) | >31 ^A |
| Reatividade do carvão (min ⁻¹) | Alta ^D |
| Rank do carvão | Baixo rank ^D |
| Permeabilidade da camada total (mD) | 50-150 ^A |
| Espessura da camada de carvão (m) | 2-15 ^A / >0,35 ^C |
| Variação da espessura (%) | <25 ^A |
| Profundidade da camada (m) | 92 – 460 ^A / >60 ^B / >200 ^F |
| Recursos disponíveis de carvão (10 ⁶ m ³) | >15,4 ^A |

Legenda: A = MASTALERZ et al., 2011; B = SHAFIROVICH; VARMA, 2009; C = ZIELENIEWSKI; BRENT, 2008; D = HETHERINGTON; THAMBIMUTHU, 2003; E = BURTON; FRIEDMANN; UPADHYE, 2006; F= WESTBLADE, 2011.

3.6.1. Reatividade

A reatividade de um combustível sólido pode ser entendida como a velocidade de sua reação frente a um agente de gaseificação adicionado em condições controladas de temperatura e pressão (MASUDA, 1967 *apud* SCHIFINO, 1977). Nos processos de gaseificação de carvão, a reação do CO₂ com o carbono é muito importante pelo fato de ser responsável pela formação de CO. Assim, a velocidade dessa reação, conhecida e já referida pelo nome de Boudouard, para uma amostra de carvão, é a mais utilizada para caracterizar o que se pode chamar de reatividade frente ao CO₂ (SCHIFINO, 1977). Além disso, a reação de oxidação parcial do carvão também é considerada uma reação importante na gaseificação, logo os experimentos que forem realizados para a obtenção da reatividade refletirão as características da própria reação de gaseificação (YOON et al., 2007).

Geralmente, conforme salienta Gomes (2004), cada grupo de pesquisa utiliza um procedimento experimental próprio, na qual a atmosfera para a gaseificação (ar, CO₂, O₂ ou até mesmo misturas entre eles) e a temperatura são as principais

variáveis. No entanto, uma atmosfera de CO_2 é a mais utilizada, isso porque a reação de Boudouard é endotérmica, causando apenas um leve efeito sobre a temperatura do forno.

A determinação da reatividade só pode ser realizada em carvões desgaseificados (coque ou *char*), pois os gases formados durante a desgaseificação impedem a análise da relação produto/reagente na qual os cálculos da reatividade estão fundamentados. Assim, reatividade é dita como a taxa em que o *char* reage em atmosfera oxidante/reutora, em sequência a sua desvolatilização (SCHIFINO, 1977 e GOMES, 2004).

Os carvões do Rio Grande do Sul, por não apresentarem propriedades coqueificantes, após serem desgaseificados formam o chamado *char*, ou resíduo carbonoso (SCHIFINO, 1977). O *char* pode ser definido como o produto sólido resultante da desvolatilização do carvão, ou seja, da pirólise das partículas de carvão a temperatura e atmosfera controladas, sendo produzido juntamente com diversas substâncias voláteis (NUNES; RECH; MARCÍLIO, 2011).

3.6.1.1. Fatores que Afetam a Reatividade do *Char*

A reatividade do *char* depende basicamente de três fatores principais. Um deles é a estrutura física, que pode ser entendida como a acessibilidade da matéria carbonosa ao gás reagente. Outro fator é a estrutura química, que faz referência a concentração de sítios ativos de carbono e, o último fator é a presença de agentes catalíticos no carvão (MARTINEZ- ALONSO; TASCÓN, 1991 *apud* MACHADO, 2009).

A estrutura química e física do carvão e a presença de agentes catalíticos abrangem uma diversidade de parâmetros (Quadro 3.3) que juntamente com as condições operacionais, podem afetar a reatividade dos *chars*. O conhecimento desses parâmetros é, então, de grande valia para auxiliar na escolha da jazida com maior potencial para a realização de testes futuros de UCG.

Quadro 3.3. Parâmetros que influenciam na reatividade dos *chars*.

| Parâmetros | Descrições |
|--|--|
| Rank do carvão | O <i>rank</i> é um dos fatores mais influentes na reatividade do <i>char</i> . Quanto maior ele for, menor será a reatividade do carvão. |
| Tamanho da partícula | A eficiência de queima geralmente aumenta com a diminuição da partícula, pois uma maior área superficial se torna disponível para reação, logo se espera um aumento de reatividade. |
| Composição de macerais do carvão | Macerais do tipo inertinita são menos reativos do que a vitrinita. Porém, essa classificação é complicada porque nem todas as inertinitas são não reativas e nem todas as vitrinitas são reativas. |
| Efeito da matéria mineral do carvão | Sílica e alumina podem diminuir a taxa de reação, enquanto cálcio, magnésio, ferro e espécies alcalinas podem aumentar. |
| História térmica do <i>char</i> (pirólise) | Em relação à pirólise do carvão vários fatores podem afetar a reatividade, como: teor de voláteis da amostra de carvão; taxa de aquecimento; e, atmosfera na qual ocorre a pirólise. Pode-se dizer ainda, que aumentando a temperatura de produção do <i>char</i> , há uma maior liberação da matéria volátil o que torna sua estrutura mais aromática e estável, e por sua vez diminui sua reatividade. |

Fonte: MACHADO, 2009; POHLMANN, 2010; GOMES, 2004 e NUNES; RECH; MARCÍLIO, 2011.

3.6.1.2. Reatividade dos *Chars* via Termogravimetria

Usualmente, de acordo com Machado (2009), utilizam-se fornos de queda livre (DTF – *Drop Tube Furnace*) para gerar os *chars*, enquanto a reatividade é apontada pelo uso de análise termogravimétrica. No entanto, é possível realizar a pirólise do carvão (utilizando uma atmosfera de N₂ para obter o *char*) e a gaseificação do *char* consecutivamente mediante termogravimetria (TGA – *Thermogravimetric Analysis*), embora ainda não exista um método padrão para a análise de reatividade de *chars*.

A TGA é uma técnica que fornece informações sobre variações de massa em função do tempo e/ou temperatura em condições determinadas. Os testes são realizados por meio de uma termobalança de grande sensibilidade, reprodutibilidade e também de resposta rápida às alterações de massa (SILVA; PAOLA; MATOS, 2007).

As curvas obtidas nos termogramas dessa análise permitem obter informações sobre a composição e estabilidade térmica da amostra, assim como os produtos intermediários e resíduos gerados. A TGA é uma análise dinâmica, logo, vários fatores podem influenciar a natureza, a precisão e a exatidão dos resultados experimentais, sendo eles (SILVA; PAOLA; MATOS, 2007):

- Fatores instrumentais (taxa de aquecimento, atmosfera e temperatura do forno, vazão de gás, composição do cadinho, entre outros);
- Características relacionadas à própria amostra (quantidade, granulometria, calor de reação envolvido, entre outros).

Dessa maneira, a termogravimetria é uma ferramenta útil para descobrir a influência de diversos parâmetros que afetam a reatividade, incluindo tamanho da partícula, peso da amostra, taxa de aquecimento, temperatura do forno e gás reagente. Além disso, com o auxílio da primeira derivada da curva de perda de massa (DTG – *Derivative Thermogravimetry*) é possível conhecer a taxa máxima de reação ou reatividade dos carvões (MACHADO, 2009). Os experimentos de gaseificação do *char* em termobalança envolvem etapas fundamentais, sendo elas (MACHADO, 2009):

- Difusão do reagente (CO_2 , Ar, O_2 ou misturas entre eles) e transferência de calor até a superfície externa do sólido poroso (*char*);
- Difusão do reagente e transferência de calor para o interior dos poros do *char*;
- Reação química na superfície com adsorção do reagente e dessorção do produto nas superfícies externas e internas do *char*;
- Difusão do produto.

O cálculo da primeira derivada da perda de massa permite encontrar as máximas taxas de umidade, perda de voláteis e perda de carbono fixo. Calcula-se, então, a reatividade (sem tentar modelar o comportamento cinético) conforme a Equação 3.9 (adaptado de MACHADO, 2009 e GOMES, 2004).

$$-R = \frac{-1}{m_o - m_c} \left(\frac{dm}{dt} \right) \quad (3.9)$$

Onde: **R** = taxa de reação ou máxima reatividade

m_o = massa inicial de *char* (massa quando inicia o consumo de carbono fixo ao reagente)

m_c = massa de cinzas (resíduo)

dm/dt = taxa máxima de perda de carbono fixo

Calculando a reatividade do *char* via TGA é possível realizar comparações entre carvões de diferentes *ranks* e tipos. Além disso, pode ser calculado o grau de conversão das amostras, ou seja, da fração da matéria carbonosa que reage com reagente e gera produto, conforme Equação 3.10 (adaptado de MACHADO, 2009 e GOMES, 2004).

$$X = \left(1 - \frac{m - m_c}{m_o - m_c} \right) \times 100 \quad (3.10)$$

Onde: **X**= conversão

m_o= massa quando inicia o consumo de carbono fixo ao reagente

m= massa de *char* no instante t

m_c = massa de cinzas (resíduo)

3.6.1.3. Eventos Térmicos Associados à Reatividade dos *Chars* via Calorimetria Exploratória Diferencial

A calorimetria exploratória diferencial, conhecida pela sigla DSC (*Differential Scanning Calorimetry*), é uma análise que permite o acompanhamento da variação de temperatura da amostra, em relação a um material termicamente inerte, denominado material de referência. Desse modo, em um experimento de DSC, mede-se a variação de entalpia que ocorre entre a amostra e a referência durante um processo que pode ser de aquecimento ou resfriamento (BERNAL et al., 2002).

Assim, por meio dessas alterações de temperatura devido a eventos endotérmicos e/ou exotérmicos, registra-se o fluxo de calor diferencial necessário para manter a amostra e o material de referência à mesma temperatura. Essa diferença de temperatura entre a amostra e o material de referência ($T_a - T_r$) pode ocorrer devido a fenômenos que podem ser químicos, como exemplo, fenômenos de decomposição, combustão, reações catalíticas e etc. ou físicos, como exemplo, adsorção, dessorção, fusão, entre outros (SILVA; PAOLA; MATOS, 2007). Caso não ocorra nenhum processo físico ou químico, observa-se uma reta paralela ao eixo do tempo, enquanto em um processo exotérmico observa-se um pico para cima e em um processo endotérmico um pico para baixo (DSC com fluxo de calor), conforme a Figura 3.12 (BERNAL et al., 2002).

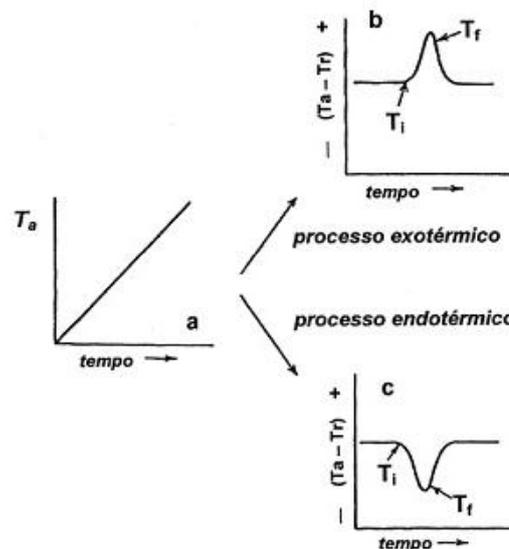


Figura 3.12. Curva de aquecimento: a) quando não ocorre nenhum evento térmico; b) quando ocorre processo exotérmico no DSC; c) quando ocorre processo endotérmico no DSC

Fonte: Adaptado de BERNAL et al., 2002.

De acordo com Silva, Paola e Matos (2007) é importante que haja uma associação de dados derivados dos ensaios de TG/DTG e DSC. Desse modo, torna-se essencial a utilização do DSC para melhorar a caracterização dos materiais, isso porque, a TG/DTG indica apenas os eventos térmicos relacionados a variações de massa, enquanto o DSC detecta eventos que podem estar associados ou não a essa perda de massa.

3.7. Gás de Síntese e suas Rotas Químicas

O conceito de tecnologia limpa, associado ao uso do carvão, torna o UCG uma grande possibilidade, embora ainda existam muitas barreiras econômicas para sua inserção nos mercados mundiais e brasileiro, praticamente baseados no uso de petróleo e de gás natural. O *syngas* gerado pelo UCG além de possibilitar a obtenção de uma gama de produtos para a indústria química e de combustíveis (Figura 3.13), pode ser igualmente utilizado para aquecimento industrial e geração de eletricidade.

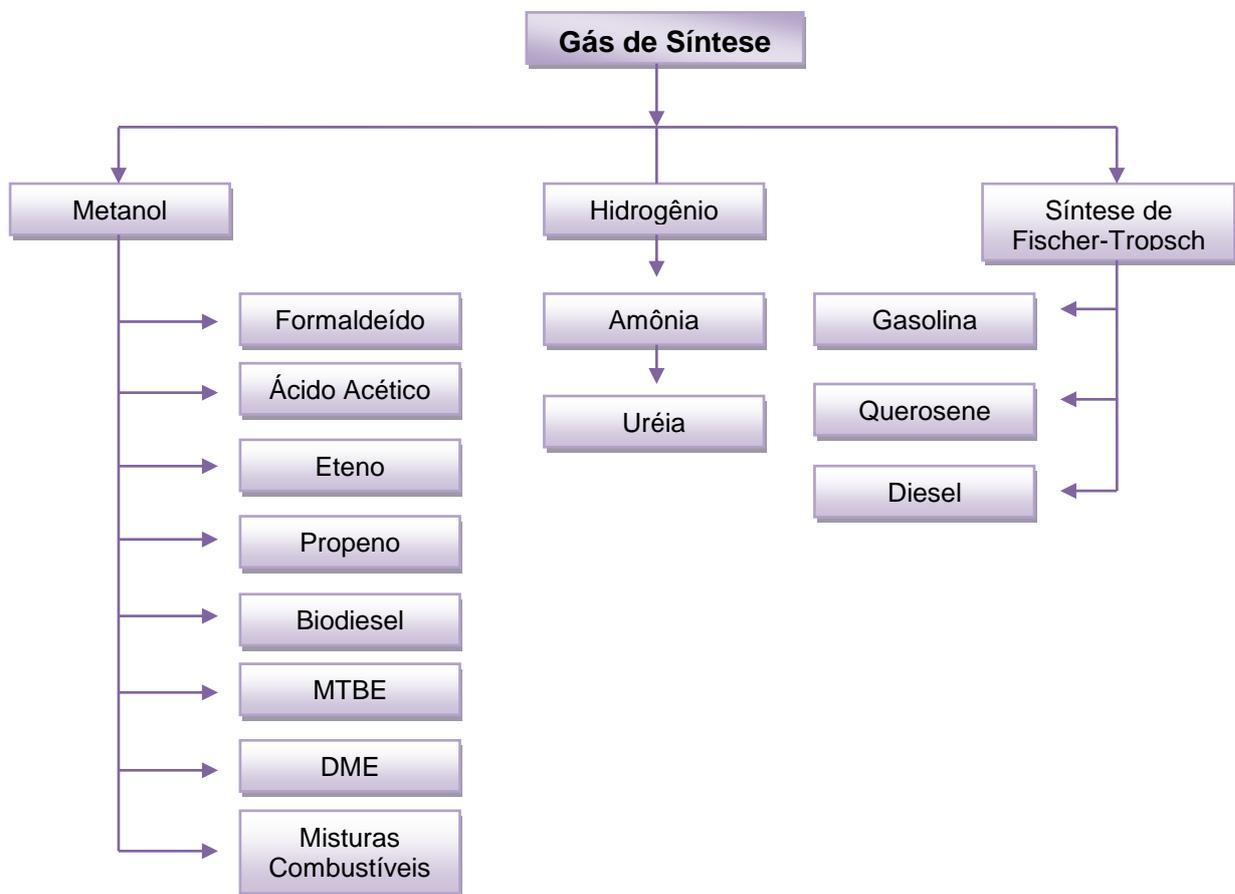


Figura 3.13. Aplicações do gás de síntese.

Fonte: A autora.

A partir do gás de síntese, então, obtêm-se, o hidrogênio, um promissor substituto dos derivados de petróleo em sua posição de combustível do futuro, além de ser um importante insumo para a produção de fertilizantes (FOSTER; ARAÚJO; SILVA, 2005). Atualmente a produção de fertilizantes se concentra basicamente no continente asiático (LIMA, 2007). Assim, o gás de síntese proveniente da

gaseificação *in situ* de carvão poderia ser uma alternativa para aumentar o mercado de amônia brasileiro e diminuir as importações de fertilizantes.

O gás de síntese também permite a obtenção do metanol considerado uma das mais importantes matérias-primas químicas no mundo contemporâneo (CAMARGO, 2007). Além de suas diversas aplicações, o metanol pode favorecer as sínteses orgânicas de diversos intermediários químicos, como formaldeído, cloreto de metila, ácido acético, entre outros (AQUINO, 2008). Acrescido a isso, ele é fundamental na síntese para a obtenção de DME (Dimetil éter) e MTBE (Metiltérciobutileter), na síntese para conversão em gasolina, no uso em célula combustível e na obtenção de olefinas leves, como etileno e propileno, por meio do processo denominado conversão de metanol em olefinas (*Methanol to Olefins - MTO*) (GEROSA, 2007).

Dentre as variedades de produtos químicos que utilizam o metanol como matéria-prima, cabe destacar o DME por ser um combustível limpo e uma opção energética frente aos derivados de petróleo. Fisicamente é semelhante ao GLP (gás liquefeito do petróleo), sendo de fácil armazenamento e transporte (BOURG, 2006 e *METHANOL INSTITUTE*, 2011). Cabe ressaltar também o seu uso como substituto do diesel. Fabricantes de automóveis como a Nissan, *Hindo Motors*, Isuzu, *Mitsubishi Motors* e Volvo já estão desenvolvendo veículos pesados movidos por DME (*METHANOL INSTITUTE*, 2011). Salvo algumas modificações, seu emprego em motores a diesel atinge baixos níveis de emissão de particulados, bem como de NOx. Por não conter enxofre, há inexistência de SOx emitidos para a atmosfera (*METHANOL INSTITUTE*, 2011; SOUZA et al., [2006]).

Além disso, de acordo com Ramos e outros (2011), a necessidade da busca por alternativas que conciliem o avanço da tecnologia ao desenvolvimento sustentável, permite também que outros processos possam vir a ser considerados perante o domínio da indústria petroquímica. A tecnologia GTL (*Gas to Liquid*) é uma delas, e está fundamenta na produção de hidrocarbonetos líquidos a partir do gás de síntese, via reação de Fischer-Tropsch (F-T).

O processo GTL está sendo considerado o refino do futuro, pois é responsável por promover a obtenção de combustíveis para motores a diesel de alta qualidade, nafta petroquímica, bases para lubrificantes e alfa-olefinas de alta qualidade. Desse modo, pode-se dizer que o processo GTL produz combustíveis limpos, sem a presença de metais pesados, componentes aromáticos, sulfurados, ou nitrogenados (RAMOS et al., 2011).

A síntese F-T é uma reação catalítica que converte gás de síntese em uma variedade complexa de produtos. Dentre os produtos formados encontram-se alquenos (olefinas), alcanos (parafinas) e compostos oxigenados, tais como: alcoóis, aldeídos, ácidos carboxílicos e cetonas (RAMOS et al., 2011).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Avaliação das Características Geológicas e Físico-Químicas das Jazidas Potenciais para Gaseificação *in situ*

A determinação da jazida potencial para aplicação do método UCG desenvolveu-se a partir de três etapas. Na primeira etapa, apresentada na Figura 4.1, realizou-se uma revisão bibliográfica das jazidas sul-brasileiras, ou seja, um levantamento de dados, destacando suas informações geológicas, como recursos totais, espessuras médias e profundidade da camada de carvão e as propriedades físico-químicas dos seus carvões (teor de umidade, cinzas e enxofre). No entanto, nem todas as propriedades puderam ser conhecidas, principalmente para as jazidas que apresentavam menores recursos totais de carvão. Assim, nesse estudo, foram consideradas somente as principais jazidas sul-brasileiras, sendo elas: Cambuí; Sapopema; Sul- Catarinense (camadas Barro Branco e Bonito); Candiota; Santa Terezinha; Morungava/Chico Lomã; Charqueadas; Butiá-Leão; Iruí e Capané. A segunda etapa correspondeu ao processo de seleção das jazidas mais favoráveis ao método UCG, sendo essas avaliadas experimentalmente na terceira etapa.



Figura 4.1. Primeira etapa para determinação da jazida sul-brasileira potencial ao UCG.

O processo de seleção das jazidas ocorreu mediante a escolha de um critério capaz de apontar as jazidas que aparentemente apresentavam condições mais favoráveis ao método de UCG. Optou-se, nesse primeiro momento, por avaliar as informações geológicas da camada para cada uma dessas jazidas, sendo escolhidas as seguintes: quantidade de recursos disponíveis, profundidade da camada e espessuras médias da camada total (CT) e de carvão contido na camada (CC). Considerando essas últimas, é importante mencionar que a diferença entre CT e CC é a soma das espessuras das intercalações, que podem ser siltitos, siltitos carbonosos, argilitos ou leitos de pirita. Assim, selecionaram-se, para a próxima etapa, as jazidas de Butiá-Leão e Charqueadas (camadas I1F e I2B), pois as mesmas apresentaram recursos totais de carvão e profundidade e espessuras médias da camada mais favoráveis ao método UCG.

Cabe ressaltar que existem outras informações geológicas igualmente importantes de serem conhecidas para dar início a um projeto de gaseificação *in situ*. No método de UCG é também fundamental conhecer a hidrogeologia do local para avaliar, por exemplo, se há ou não presença de aquíferos próximos. Da mesma maneira, é importante conhecer toda a estrutura geológica dessa jazida para garantir que caso haja aquífero esse seja preservado e principalmente para garantir que a área escolhida tenha condições para a aplicação do UCG, evitando assim potenciais preocupações ambientais. Em relação à petrografia do carvão, essa é também significativa para obter conhecimentos a respeito de seus macerais, que irão influenciar principalmente na reatividade de seus carvões.

No entanto, esses dados nem sempre são conhecidos, encontrados e disponíveis na literatura. Assim, devido à relativa dificuldade de encontrar em literatura informações hidrogeológicas, estruturais, petrográficas, entre outras para as principais jazidas sul-brasileiras, optou-se por avaliar somente as três informações geológicas apontadas acima que também são essenciais critérios para a seleção de uma área potencial à metodologia de UCG.

4.2. Avaliação Experimental das Jazidas Seleccionadas

A avaliação experimental foi realizada nas amostras de carvão oriundas das jazidas seleccionadas e teve por objetivo caracterizá-las no ponto de vista físico-químico. Assim realizaram-se análises imediatas, elementares e de reatividade, sendo essas detalhadas a seguir.

4.2.1. Carvões Escolhidos

As amostras de carvão seleccionadas foram, então, provenientes das jazidas de Butiá-Leão (RS) e de Charqueadas (RS), sendo essas consideradas futuras possibilidades para a aplicação do método UCG. Um descritivo de cada uma delas pode ser visto no Quadro 4.1. A amostra da jazida de Butiá-Leão (camada M2 – nomenclatura fornecida pela COPELMI) foi cedida pela mineradora COPELMI, enquanto as amostras de Charqueadas (camadas I1F e I2B) foram fornecidas pelo CEPAC/PUCRS, sendo essas obtidas de um poço de estudos experimentais de ECBM na região de Porto Batista. Nesse trabalho, as duas amostras da jazida de Charqueadas (camada I1F e camada I2B) disponíveis no CEPAC foram indicadas por meio de uma avaliação visual macroscópica que visou a escolha de pedaços de carvão que contivessem maiores teores de vitrênio (constituente orgânico do carvão).

Quadro 4.1. Amostras de carvão seleccionadas.

| Jazidas | Especificações | Nomenclatura |
|--------------|-------------------------------------|--------------|
| Butiá - Leão | Camada: M2; Profundidade: 67,10 m | B |
| Charqueadas | Camada: I1F; Profundidade: 346,85 m | C |
| Charqueadas | Camada: I2B; Profundidade: 355,48 m | D |

Fonte: Dados fornecidos pela COPELMI/CEPAC.

É importante ressaltar que a amostra fornecida pela mineradora COPELMI, diferentemente das retiradas do poço de estudos experimentais do CEPAC, foi de uma mina de exploração convencional do carvão. Desse modo, sua profundidade geralmente fica próxima ou inferior a 60 m. A jazida de Butiá-Leão, por exemplo, tem variações de 50 a 800 m de profundidade, sendo as camadas mais profundas hoje não mineradas pela relação custo-benefício. Assim, devido a essa limitação, não foi

possível obter amostras a profundidade desejada ao UCG, mas por meio de análises experimentais, essa jazida poderá demonstrar características favoráveis ao método, assim como já acontece com suas informações geológicas (recursos totais e profundidade e espessuras médias da camada).

As amostras de carvão foram fornecidas em pedaços compactos. Dessa maneira, para que as mesmas fossem submetidas às análises físico-químicas foi realizada a etapa de preparação de amostras baseada na norma ABNT NBR 8292 (1983) com a finalidade de reduzir gradativamente a massa de cada uma, mantendo-se a representatividade da amostra original. As três amostras (B, C e D) foram, então, homogeneizadas e quarteadas a partir da formação de pilha cônica, reunindo os quartos opostos para a obtenção de duas amostras representativas. Uma dessas amostras foi destinada a análises imediata, elementar e de poder calorífico e a outra ao ensaio de reatividade, sendo cada uma novamente quarteada para obter uma quantidade destinada ao arquivo. As amostras foram reduzidas para as granulometrias adequadas à realização de análises (posteriormente detalhadas) por meio de um sistema manual com peneiras do tipo Tyler da Bertel Indústria Metalúrgica Ltda, em ordem decrescente de tamanho.

4.2.2. Caracterização dos Carvões

As amostras de carvão escolhidas foram inicialmente submetidas às seguintes análises: imediata; elementar e poder calorífico. Essas análises, descritas a seguir, permitiram o conhecimento de suas características de composição, ou seja, principalmente seus teores de cinzas, umidade e enxofre, bem como seu potencial calorífico.

4.2.2.1. Análise Imediata

As análises imediatas das amostras dos carvões selecionados foram realizadas pela Fundação de Ciência e Tecnologia – CIENTEC, em Porto Alegre, seguindo normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). A análise imediata foi utilizada para caracterizar as amostras de carvões selecionadas nos parâmetros apresentados no Quadro 4.2.

Quadro 4.2. Descrição de parâmetros da análise imediata e normas associadas.

| Parâmetros | Definição | Normas |
|-----------------|---|-------------|
| Umidade | É toda quantidade de água presente no carvão, ou seja, é o somatório da água que fica agregada na superfície externa com a água retida nos poros ou capilares do carvão. | ASTM D 7582 |
| Cinzas | É o resíduo inorgânico restante após a queima do carvão. | ASTM D 7582 |
| Matéria Volátil | É todo produto que desprende do carvão (com exceção da umidade), sendo ele gás ou vapor. | ASTM D 7582 |
| Carbono Fixo | É o resíduo sólido que representa basicamente a concentração de carbono, ainda que contenha também elementos como enxofre, H ₂ , N ₂ e O ₂ . | ASTM D 7582 |

Fonte: Adaptado de FERNANDES; MERGEL; SÁNCHEZ, 2002.

4.2.2.2. Análise Elementar

A análise elementar caracteriza o carvão por meio da determinação do percentual em massa de carbono, enxofre, nitrogênio, hidrogênio e oxigênio presentes. O enxofre determinado nessa análise é o enxofre total, ou seja, o somatório do orgânico (átomos de enxofre como parte da estrutura do carvão) com o inorgânico (aparecem como compostos de enxofre mineral). A determinação de hidrogênio também engloba, sob diferentes formas, o H₂ contido nos materiais orgânicos e o associado à água (FERNANDES; MERGEL; SÁNCHEZ, 2002).

Em relação ao oxigênio, como já comentado, seu percentual tende a diminuir à medida que o *rank* do carvão aumenta. O nitrogênio, por sua vez, ocorre combinado quase que totalmente na estrutura orgânica do carvão e seu teor é utilizado para avaliar o potencial de formação de óxidos de N₂, que são fontes de poluição atmosférica (FERNANDES; MERGEL; SÁNCHEZ, 2002).

As análises elementares das amostras dos carvões selecionados foram realizadas pela Fundação de Ciência e Tecnologia – CIENTEC, em Porto Alegre, seguindo normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), conforme Quadro 4.3.

Quadro 4.3. Normas associadas aos parâmetros da análise elementar.

| Parâmetros | Normas |
|------------|-------------|
| Carbono | ASTM D 5373 |
| Enxofre | ASTM D 4239 |
| Nitrogênio | ASTM D 5373 |
| Hidrogênio | ASTM D 5373 |
| Oxigênio | ASTM D 3761 |

Fonte: Laboratório Cientec.

4.2.2.3. Poder Calorífico

As análises de poder calorífico das amostras dos carvões selecionados foram realizadas pela Fundação de Ciência e Tecnologia – CIENTEC, em Porto Alegre, seguindo a norma NBR 8628/1983 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). O poder calorífico, ou seja, o calor liberado pela combustão de uma substância pode ser considerado de duas maneiras, como afirmam Fernandes, Mergel e Sánchez (2002):

- Poder Calorífico Superior (P.C.S): é a quantidade de calor liberado por massa de combustível quando esse entra em combustão, em excesso de ar, sendo os gases produzidos resfriados de modo que toda a água proveniente da combustão esteja no estado líquido;
- Poder Calorífico Inferior (P.C.I): é a quantidade de calor liberado por massa de combustível quando esse entra em combustão, em excesso de ar, sendo os gases produzidos resfriados (até o ponto de ebulição da água) de modo que toda a água proveniente da combustão esteja no estado de vapor.

4.2.3. Avaliação da Reatividade via Análise Termogravimétrica (TGA)

A reatividade por ser um parâmetro influente e importante para o processo de gaseificação *in situ*, foi avaliada mediante o uso de Termogravimetria. A TGA teve, então, a função inicial de promover a desvolatilização do carvão em atmosfera inerte, seguida de reação química, cuja função principal foi fornecer a taxa em que o *char* reage na atmosfera do gás reagente escolhido, no caso o ar. Da mesma

maneira, foram avaliadas as influências da granulometria da amostra e da temperatura de gaseificação, por meio de diversos ensaios.

A análise termogravimétrica foi realizada no Laboratório de Caracterização de Materiais da FAQUI/PUCRS. O equipamento utilizado foi a balança termogravimétrica de modelo SDT Q6000 da *TA Instruments*, que possibilita ensaios dentro de uma faixa de temperatura variando entre 25 e 1500°C.

4.2.3.1. Parâmetros Experimentais Selecionados

Visando a avaliação de influentes (granulometria e temperatura), o ensaio de reatividade ocorreu baseado em parâmetros experimentais, sendo esses característicos do equipamento e escolhidos especificamente para essa análise. Os parâmetros experimentais utilizados, então, em ordem de aplicação, foram:

- Cadinho de platina, por suportar altas temperaturas;
- Massa da amostra entre 10 e 11mg com granulometrias diferentes de 60 e 200 *mesh* para cada ensaio;
- Temperatura inicial de 25°C;
- Atmosfera inerte de N₂ para a desvolatilização do carvão;
- Vazão de 100 mL/mim de N₂;
- Taxa de aquecimento de 20°C/mim;
- Troca do gás inerte pelo gás reativo quando o forno atingia temperaturas determinadas para cada ensaio, sendo elas: 900°C e 950°C.
- Gás reativo: ar em uma vazão de 100 mL/mim;
- Injeção de ar em fase isotérmica por uma hora;

Na Tabela 4.1 pode ser visualizada a nomenclatura utilizada nesse trabalho para cada amostra de carvão selecionada e suas condições experimentais. Os ensaios de reatividade foram realizados em triplicatas.

Tabela 4.1. Nomenclatura das amostras selecionadas e condições experimentais para os ensaios de reatividade.

| Jazidas | Denominação das amostras | Temperatura dos Ensaios |
|---|--------------------------|-------------------------|
| Butiá– Leão/ Camada não especificada | B1 (60 <i>mesh</i>) | 950°C |
| | B2 (60 <i>mesh</i>) | 900°C |
| | B3 (200 <i>mesh</i>) | 950°C |
| | B4 (200 <i>mesh</i>) | 900°C |
| Charqueadas/ Camada I1F | C1 (60 <i>mesh</i>) | 950°C |
| | C2 (60 <i>mesh</i>) | 900°C |
| | C3 (200 <i>mesh</i>) | 950°C |
| | C4 (200 <i>mesh</i>) | 900°C |
| Charqueadas/ Camada I2B | D1 (60 <i>mesh</i>) | 950°C |
| | D2 (60 <i>mesh</i>) | 900°C |
| | D3 (200 <i>mesh</i>) | 950°C |
| | D4 (200 <i>mesh</i>) | 900°C |

4.2.3.2. Avaliação da Influência da Granulometria do Carvão

A influência da granulometria nos ensaios de reatividade foi avaliada utilizando dois tamanhos diferenciados de partícula para cada amostra de carvão. Selecionou-se assim, a granulometria de 60 *mesh*, por ser padrão em realização de análises físico-químicas de carvão, e a granulometria de 200 *mesh*. Essa última foi utilizada de modo comparativo, pois segundo Pohlmann (2010), com a diminuição do tamanho das partículas poderá haver um aumento da reatividade do carvão.

4.2.3.3. Avaliação da Influência da Temperatura de Reação

A influência da temperatura de reação foi testada para as amostras selecionadas nas granulometrias já especificadas de 60 *mesh* e 200 *mesh*. Foram realizados ensaios para todas as amostras na temperatura de 950°C e 900°C. Assim, quando se atingia a temperatura escolhida na etapa de pirólise com o N₂, o ensaio seguia isotermicamente na etapa de reação (troca do N₂ por ar) por uma hora. As temperaturas foram selecionadas levando-se em conta a zona de redução, na qual acontece a reação de gaseificação com a formação do gás de síntese. A

zona de redução ocorre em uma faixa que vai de 550°C até valores superiores a 900°C, segundo ANON, 1977 *apud* CHAIKEN; MARTIN, 1992.

4.2.4. Análises Experimentais para Acompanhar a Variação de Energia da Amostra via Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

As análises de DSC foram realizadas em triplicatas nas amostras selecionadas para avaliar as suas variações de temperatura, associando-as a fenômenos físicos e químicos. Dessa maneira, detectaram eventos que poderiam estar associados ou não à perda de massa da amostra analisada. Essas análises foram, então, obtidas no Laboratório de Caracterização de Materiais da FAQUI/PUCRS. O modelo do equipamento utilizado foi o mesmo utilizado para a realização de análises termogravimétricas SDT Q6000 da TA *Instruments* com fluxo de calor.

4.2.5. Análise estatística via ANOVA

Realizou-se uma análise dos resultados obtidos para reatividade, nas diferentes condições impostas, através do teste estatístico ANOVA (análise de variância). A análise de variância visa fundamentalmente verificar se existe uma diferença significativa entre as médias e se os fatores exercem influência em alguma variável dependente.

Os cálculos foram realizados por meio do *software* Statistica v 8.0, permitindo desse modo a determinação da tabela ANOVA. As variáveis analisadas foram jazida, *mesh* e granulometria. Assim, por meio do valor indicado por “p” na tabela ANOVA foi possível avaliar se cada uma dessas variáveis detinha alguma influência sobre a reatividade ou se existia alguma diferença significativa entre os parâmetros testados (60 e 200 *mesh*; 900° e 950°C). Esse valor “p” indica se há significância estatística com certo grau de confiança para uma determinada variável ou uma relação de variáveis. O grau de confiança utilizado nesse estudo foi o de 95%, dessa maneira o valor de “p” deverá ser inferior a 0,05 para que se possa afirmar

que a influência de determinada variável é bastante significativa para a determinação da reatividade dos carvões.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Características das Jazidas de Carvão no Sul do Brasil

Os carvões brasileiros distribuem-se praticamente em oito grandes jazidas, sete encontradas no Rio Grande do Sul e uma em Santa Catarina (GOMES et al., 1998 e HEEMANN et al., 2009). Segundo Borba (2001) *apud* EPE (2007), a jazida brasileira com maior recurso de carvão é a de Candiota. Localizada no sul do estado do Rio Grande do Sul, Candiota é considerada a maior jazida do país com aproximadamente 38% dos recursos totais brasileiros. A espessura média da sua camada total é de 4,5 m, podendo chegar a 6,0 m em alguns pontos. Essa jazida apresenta 17 camadas de carvão com grande continuidade e pequena cobertura (menores que 50 m), na qual a mais importante é também denominada de Candiota, pois contém 80% dos recursos totais da jazida. Suas características geológicas são propícias à lavra a céu aberto e proporcionam grande rentabilidade (EPE, 2007 e GOMES; CRUZ; BORGES, 2003).

Na Tabela 5.1 são apresentados alguns parâmetros da camada de Candiota, encontrados na literatura indicada, obtidos via análise imediata e elementar. A amostra de carvão analisada foi do ROM (*Run of Mine*), ou seja, do minério bruto, obtido diretamente da mina, sem sofrer nenhum tipo de beneficiamento. O poder calorífico também foi analisado para a camada de Candiota e atingiu valores de 3.381 kcal/kg (NAHUYS; CÂMARA, 1972 *apud* BASTIANI et al., [1986]).

Tabela 5.1. Análise imediata e elementar da camada Candiota.

| Parâmetros analisados | Teores (%) |
|------------------------------|-------------------|
| Umidade | 9,60 |
| Cinzas | 50,30 |
| Matéria volátil | 22,10 |
| Carbono fixo | 27,60 |
| Carbono | 38,0 |
| Hidrogênio | 2,96 |
| Enxofre | 2,40 |
| Oxigênio+Halogênios | 9,30 |
| Nitrogênio | 0,40 |

Fonte: NAHUYS; CÂMARA, 1972 e CORREA DA SILVA et al., 1985 *apud* BASTIANI et al., [1986].

O estado do Rio Grande do Sul ainda apresenta diversas jazidas, dentre as quais destacam-se: Charqueadas, Butiá - Leão, Iruí e Capané. A jazida de Capané contém três camadas de carvão, a de Capanezinho que é considerada a principal contendo uma espessura média de 2,60 m, a de Jeribá com espessura média de 1,50 m e a de Triângulo com espessura média de 0,73 m. Em relação às coberturas máximas dessas suas camadas, essas não chegam a ultrapassar os 50 m de profundidade. Os recursos totais de Capané são de 1.010 Mt, sendo 859 Mt relativos à camada Jeribá e 86 Mt à camada Capanezinho (GOMES; CRUZ; BORGES, 2003 e CORRÊA FABRÍCIO et al., 1983 *apud* BASTIANI et al., [1986]).

Na Tabela 5.2 são apresentados alguns parâmetros da camada principal encontrados na literatura indicada e obtidos via análise imediata e elementar. A amostra de carvão analisada foi a do minério bruto, com poder calorífico atingindo valores de 3.500 kcal/kg (HENZ; DIAS, 1985 *apud* BASTIANI et al., [1986]).

Tabela 5.2. Análise imediata e elementar da camada Capanezinho.

| Parâmetros analisados | Teores (%) |
|------------------------------|-------------------|
| Umidade | 3,87 |
| Cinzas | 44,40 |
| Matéria volátil | 20,90 |
| Carbono fixo | 32,60 |
| Enxofre | 1-7 |

Fonte: HENZ; DIAS, 1985 *apud* BASTIANI et al., [1986].

A jazida de Iruí detém recursos totais de 1.665 Mt, dos quais 1.442 Mt correspondem a sua principal camada, a camada Iruí Superior. Nessa camada a espessura varia de 1,5 a 2,0 m e alguns desses recursos encontram-se a coberturas menores do que 50 m (GOMES; CRUZ; BORGES, 2003). Na Tabela 5.3 é possível conhecer alguns parâmetros da camada principal, encontrados na literatura indicada e obtidos por meio de análise imediata. A amostra de carvão analisada foi a do minério bruto que continha 4.285 kcal/kg de poder calorífico (SARAIVA; MARQUES, 1983 *apud* BASTIANI et al., [1986]).

Tabela 5.3. Análise imediata da camada Iruí Superior.

| Parâmetros analisados | Teores (%) |
|------------------------------|-------------------|
| Umidade | 7,72 |
| Cinzas | 39,85 |
| Matéria volátil | 27,18 |
| Carbono fixo | 32,97 |

Fonte: SARAIVA; MARQUES, 1983 *apud* BASTIANI et al., [1986].

A jazida de Butiá-Leão contém sete camadas de carvão, sendo a mais importante chamada de Camada I. Conta ainda com espessuras médias de aproximadamente 1,80 m e detém 709 Mt de recursos totais de carvão de um total de 2.442 Mt da jazida. Outras camadas como S2, S3, I3 e I4 contém recursos entre 250 e 600 Mt, sendo a maioria encontrada entre 50 e 300 m de profundidade e uma porção significativa entre 300 e 800 m (GOMES; CRUZ; BORGES, 2003). Na Tabela 5.4 são apresentados parâmetros da camada principal, encontrados na literatura indicada e obtidos por meio de análise imediata e elementar. A amostra de carvão analisada foi do ROM que continha 3.381 kcal/kg de poder calorífico (BASTIANI et al., [1986]).

Tabela 5.4. Análise imediata e elementar da camada I da jazida de Butiá-Leão.

| Parâmetros analisados | Teores (%) |
|-----------------------|------------|
| Umidade | 5,50 |
| Cinzas | 45,70 |
| Matéria volátil | 24,30 |
| Carbono fixo | 30,00 |
| Carbono | 38,70 |
| Hidrogênio | 2,90 |
| Enxofre | 2,60 |
| Oxigênio | 8,50 |
| Nitrogênio | 0,60 |

Fonte: BASTIANI et al., [1986].

Por sua vez, tem-se a jazida de Charqueadas, com profundidades que variam de 300 a 450 m. Essa jazida é composta por seis camadas de carvão, mas apenas três contêm recursos significativos, sendo elas: I1F com espessura média de 2,30 m, I2B com espessura média de 3,15 m e MB com espessura média de 2,40 m (Figura 5.1).

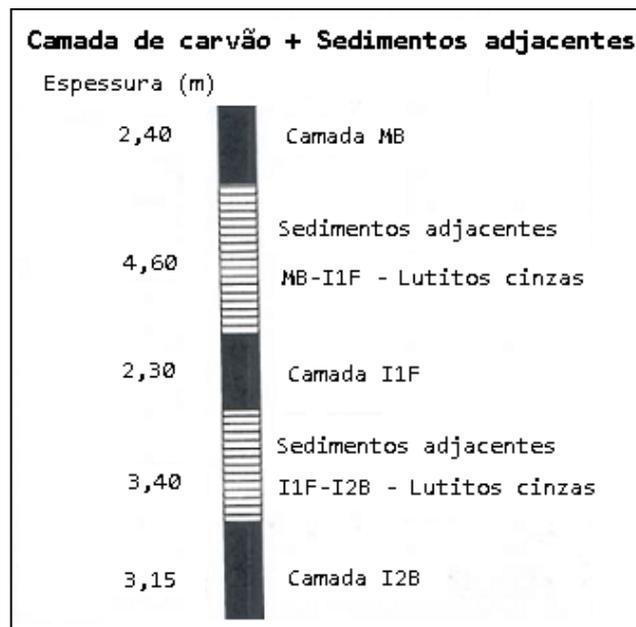


Figura 5.1. Perfil geológico das camadas principais de carvão na jazida de Charqueadas.

De acordo com Gomes, Cruz e Borges (2003), a camada I1F conta com 1.334 Mt de carvão, a I2B com 975 Mt e a MB com 648 Mt de um total de 2.994 Mt de recursos totais. A Tabela 5.5 apresenta alguns parâmetros das camadas principais encontrados na literatura indicada e obtidos por meio de análise imediata e elementar. A amostra de carvão analisada foi do ROM, contendo: 2.204 kcal/kg de

poder calorífico para a camada MB; 3.880 kcal/kg de poder calorífico para a I1F; e 4.220 kcal/kg para a I2B (BASTIANI et al., [1986]).

Tabela 5.5. Análise imediata e elementar das camadas MB, I1F e I2B da jazida de Charqueadas.

| Parâmetros analisados | Camada MB | Camada I1F | Camada I2B |
|------------------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| Umidade (%) | 6,10 | 6,50 | 5,50 |
| Cinzas (%) | 63,60 | 44,90 | 40,80 |
| Matéria volátil (%) | 19,10 | 27,40 | 27,00 |
| Carbono fixo (%) | 17,30 | 27,70 | 32,20 |
| Carbono (%) | 23,70 | 41,50 | 43,10 |
| Hidrogênio (%) | 2,80 | 2,10 | 2,20 |
| Enxofre (%) | 1,40 | 1,80 | 1,20 |
| Oxigênio+Halogênios (%) | 8,10 | 9,00 | 11,30 |
| Nitrogênio (%) | 0,40 | 0,60 | 0,40 |

Fonte: BASTIANI et al., [1986].

Continuando no estado do Rio Grande do Sul, entre Porto Alegre e o litoral, tem-se ainda as jazidas de Morungava/Chico Lomã e Santa Terezinha, essas contendo aproximadamente 16% das reservas medidas no Brasil. O carvão encontrado nessas jazidas é considerado de melhor qualidade, porém para seu aproveitamento energético necessita-se de investimentos, já que suas jazidas são mais profundas (até 800 m de profundidade) e de poucas espessuras (<1 m), no caso de Morungava/Chico Lomã (EPE, 2007).

A jazida de Morungava/Chico Lomã possui coberturas menores que 50 m em sua parte sudoeste, entre 50 e 300 m na região central, chegando a valores superiores a 300 m na porção noroeste e oeste. Apesar de conter até 7 camadas com 3.092 Mt de recursos totais, apenas 3 se destacam: M/CL2, M/CL6 (1.169 Mt) e M/CL4 (1.104 Mt) (GOMES; CRUZ; BORGES, 2003).

A Tabela 5.6 mostra alguns parâmetros das camadas principais, encontrados na literatura indicada e obtidos por meio de análise imediata e elementar. A amostra de carvão analisada foi do ROM que continha: 4.056 kcal/kg de poder calorífico para a camada M/CL2; 3.732 kcal/kg de poder calorífico para a M/CL4; e 2.616 kcal/kg para a M/CL6 (BASTIANI et al., [1986]).

Tabela 5.6. Análise imediata e elementar das camadas M/CL2, M/CL4 e M/CL6 da jazida de Morungava/Chico Lomã.

| Parâmetros analisados | Camada M/CL2 | Camada M/CL4 | Camada M/CL6 |
|------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Umidade (%) | 3,40 | 3,00 | 2,10 |
| Cinzas (%) | 43,70 | 48,20 | 62,10 |
| Matéria volátil (%) | 27,10 | 26,60 | 20,40 |
| Carbono fixo (%) | 29,20 | 25,20 | 17,50 |
| Carbono (%) | 44,80 | 39,80 | 28,30 |
| Hidrogênio (%) | 3,10 | 2,90 | 1,50 |
| Enxofre (%) | 2,00 | 0,70 | 0,80 |
| Oxigênio+Halogênios (%) | 5,60 | 7,70 | 6,70 |
| Nitrogênio (%) | 0,80 | 0,70 | 0,60 |

Fonte: BASTIANI et al., [1986].

Na jazida de Santa Terezinha as coberturas mínimas chegam a 500 m na parte sul, podendo alcançar até 800 m em outras partes. Os recursos totais de carvão são de 4.283 Mt, contendo 7 camadas, sendo as mais importantes chamadas ST6, ST5 e ST4 (1.863 Mt) com espessuras médias de aproximadamente 2,30 m (EPE, 2007 e GOMES; CRUZ; BORGES, 2003). A Tabela 5.7 mostra alguns parâmetros de uma das camadas principais, camada ST4, encontrados na literatura indicada e obtidos via análise imediata e elementar. As amostras de carvão analisadas foram do minério bruto, com poder calorífico atingindo valores de 3.875 kcal/kg (BASTIANI et al., [1986]).

Tabela 5.7. Análise imediata e elementar da camada ST4 da jazida de Santa Terezinha.

| Parâmetros analisados | Teores (%) |
|------------------------------|-------------------|
| Umidade | 1,90 |
| Cinzas | 44,00 - 48,00 |
| Matéria volátil | 24,10 |
| Carbono fixo | 31,70 |
| Carbono | 45,70 |
| Hidrogênio | 3,10 |
| Enxofre | 0,62 |
| Oxigênio + Halogênios | 5,67 |

Fonte: BASTIANI et al., [1986].

No estado de Santa Catarina, tem-se a jazida Sul - Catarinense, contendo 10 camadas de carvão, com destaque para as camadas Barro Branco e Bonito que juntas representam cerca de 21% das reservas medidas no Brasil. Os recursos

totais da jazida somam os 4.288 Mt, sendo 1.323 Mt vindos da camada Barro Branco e 1.843 Mt da camada Bonito. Suas profundidades variam de aflorantes para até maiores de 800 m, a espessura média da camada Barro Branco fica em torno de 1,60 m, enquanto para a camada Bonito esses valores são superiores (EPE, 2007 e GOMES; CRUZ; BORGES, 2003). A Tabela 5.8 apresenta alguns parâmetros dessas camadas, encontrados na literatura indicada e obtidos via análise imediata e elementar. As amostras de carvão analisadas foram do minério bruto, com poder calorífico atingindo valores de 2.038 kcal/kg para Barro Branco e 2.777 kcal/kg para Bonito (REDIVO, 2002).

Tabela 5.8. Análise imediata e elementar das camadas Barro Branco e Bonito.

| Parâmetros analisados | Camada Barro Branco | Camada Bonito |
|-----------------------|---------------------|---------------|
| Umidade (%) | 1,76 | 1,90 |
| Cinzas (%) | 68,30 | 61,10 |
| Matéria volátil (%) | 15,50 | 15,30 |
| Carbono fixo (%) | 16,10 | 23,60 |
| Enxofre (%) | 5,04 | 4,99 |

Fonte: REDIVO, 2002.

Por fim, segundo a Epe (2007) e Gomes, Cruz e Borges (2003), têm-se na região central do Paraná as jazidas de Cambuí, com reservas totais de 22,7 Mt e a de Sapopema, com reservas totais de 64 Mt, juntas representando menos de 1% das reservas medidas do país. Além dessas jazidas apresentadas há também várias outras menores, tais como: Gravataí Oeste (a oeste de Morungava/Chico Lomã) com 38,9 Mt de reservas de carvão; Faxinal (ao sul de Charqueadas) com 10,7 Mt; Água Boa (ao sul do Leão) com 6,1 Mt; Cerro do Roque (ao sul do Leão) com 22 Mt; Arroio dos Ratos (entre Charqueadas e Leão) com reservas esgotadas; Pantano Grande (entre Leão e Iruí) com 148 Mt; e São Sepé (a oeste de Capané) com 13,2 Mt.

5.2. Jazidas Potenciais para Gaseificação *in situ* de Carvão via Informações Geológicas

A espessura contínua da camada de carvão e a profundidade são os principais fatores a serem considerados na gaseificação *in situ*. Em relação às

propriedades do carvão, as mais influentes são: teor de umidade, teor de cinzas e reatividade. A partir da revisão realizada no tópico anterior foram avaliadas as características geológicas da camada e as propriedades físico-químicas do carvão nas principais jazidas sul-brasileiras, sendo elas: Cambuí; Sapopema; Sul-Catarinense (camadas Barro Branco e Bonito); Candiota; Santa Terezinha; Morungava/Chico Lomã; Charqueadas; Butiá-Leão; Iruí; e, Capané. As informações geológicas foram utilizadas como critério para a seleção das jazidas potenciais ao UCG, pois, verificou-se que os valores obtidos para as propriedades físico-químicas não seriam decisivos nessa seleção.

Assim, os valores das propriedades físico-químicas analisados, ou seja, teor de umidade, enxofre e cinzas, demonstraram além de proximidade, a possibilidade da aplicação do UCG para todas as jazidas, com algumas recomendações. Dessa maneira, pode-se dizer que os teores de umidade das jazidas sul - brasileiras aproximaram-se de valores que variam de 2 a 10%, sendo considerados ótimos para o UCG. Os teores de enxofre variaram entre 0,6 e 8%, sendo os valores mais altos de enxofre basicamente encontrados nas jazidas de Santa Catarina e do Paraná, prevendo dessa forma possíveis processos de separação e limpeza no gás produzido para a remoção dos poluentes gerados. Os teores de cinzas variaram entre 40 e 70%, cabendo ponderar que dependendo da jazida de carvão o gás produzido terá um poder calorífico reduzido.

Em relação às informações geológicas, conforme já comentado, foram avaliadas as seguintes: quantidade de recursos disponíveis, profundidade da camada e espessuras médias. A Tabela 5.9, mostra os critérios geológicos avaliados para a seleção das jazidas.

Tabela 5.9. Parâmetros geológicos para as diferentes jazidas estudadas.

| Estados | Jazidas | Recursos (10 ⁶ t) | Camadas Potenciais | Profundidade (m) | Espessura CT (m) | Espessura CC (m) |
|-------------------|--------------------------------------|------------------------------|--------------------|------------------|------------------|------------------|
| Paraná | Cambuí | 22,7 | Cambuí | 150-300 | 0,5-1,0 | 0,45-0,90 |
| | Sapopema | 64,0 | Sapopema | 400-700 | 0,5-1,0 | 0,45-0,90 |
| Santa Catarina | Sul-Catarinense: Camada Barro Branco | 1323,0 | Barro Branco | 50-400 | 1,86 | 1,16 |
| | Sul-Catarinense: Camada Bonito | 1843,0 | Bonito | 50-450 | 3,08 | 2,18 |
| Rio Grande do Sul | Candiota | 12278,0 | Candiota | <50 | 4,5-6,0 | 3,15-4,2 |
| | Santa Terezinha | 4283,0 | ST4 | 600-800 | 2,5 | 1,75 |
| | Morungava/ Chico Lomã | 3092,0 | MCL2/MCL4/MCL6 | 200-300 | <1,0 | 0,80 |
| | Charqueadas | 2994,0 | I1F/I2B | 300 | 2,30-3,40 | 2,13-3,15 |
| | Butiá-Leão | 2442,0 | S2/S3/I3/I4/I | 50-800 | 1,8 | 1,53 |
| | Iruí | 1665,0 | Iruí Superior | <50 | 1,5-2,0 | 1,35-1,80 |
| | Capané | 1010,0 | Jeribá/Triângulo | <50 | 1,5-2,8 | 0,75-1,4 |

Fonte: EPE, 2007; GOMES; CRUZ; BORGES, 2003; REDIVO, 2002 e dados fornecidos por carboníferas.

Os dados geológicos apresentados na Tabela 5.9 permitiram avaliar e também selecionar as jazidas com propriedades adequadas para o UCG. Assim, levando em consideração apenas a profundidade da camada, observou-se que as jazidas de Candiota, Iruí e Capané não atendiam a condição mínima que é de pelo menos 60 m - limite para a mineração na superfície para o estado do Rio Grande do Sul. Desse modo, ponderando que o uso dessa tecnologia ainda continuará e que seu custo é relativamente baixo, não se recomendou o uso de UCG para profundidades menores que esse valor. Além disso, conforme já comentado, profundidades muito rasas podem ocasionar potenciais preocupações ambientais.

Avaliando a espessura das camadas, optou-se pelas que apresentavam valores superiores a 1 m e de preferência superiores a 2 m, pois, conforme *Indiana University* (2011) e *Zamzow* (2010), abaixo desse valor o gás produzido poderá ter um poder calorífico relativamente baixo. Assim, as jazidas de Cambuí, Sapopema e

Morungava/Chico Lomã não foram selecionadas, sendo que essas últimas em comparação às demais também apresentavam menores recursos totais de carvão.

As jazidas de Santa Terezinha e Sul-Catarinense (camada Barro Branco e Bonito) apesar de apresentarem valores de espessura, profundidade e recursos totais satisfatórios ao UCG não foram escolhidas. A camada Barro Branco não foi escolhida pelo fato de ter sido intensamente minerada, não justificando, nesse momento, o investimento em pesquisas na área de gaseificação *in situ*, pelo menos em áreas *on-shore*. No caso da camada Bonito, optou-se por não selecioná-la, pois a mesma apresenta menores recursos dentre as opções restantes também promissoras para o UCG, além de um alto teor de cinzas na CT.

A jazida de Santa Terezinha por sua vez, de acordo com dados fornecidos pela COPELMI, apresenta muitas falhas estruturais e não detém uma boa rocha selo (rocha de baixa permeabilidade) sobrejacente as camadas de carvão. Dessa forma, os riscos de contaminação de aquíferos próximos e a subsidência são aumentados, fazendo com que sua jazida se torne a princípio inadequada ao UCG.

Assim, a Tabela 5.10 apresenta as jazidas selecionadas, ou seja, as jazidas que foram favoráveis ao método de UCG. É importante acrescentar que para a jazida de Charqueadas, escolheram-se apenas as camadas I1F e I2B (perfil geológico pode ser visualizado na Figura 5.1, anteriormente apresentada) por oferecerem maiores recursos totais de carvão.

Tabela 5.10. Jazidas selecionadas como favoráveis ao método UCG.

| Estado | Jazidas Selecionadas | Profundidade (m) | Espessura CT (m) | Espessura CC (m) |
|-------------------|----------------------|------------------|------------------|------------------|
| Rio Grande do Sul | Charqueadas | 300 | 2,30-3,40 | 2,13-3,15 |
| | Butiá-Leão | 50-800 | 1,8 | 1,53 |

Fonte: EPE, 2007; GOMES; CRUZ; BORGES, 2003; REDIVO, 2002 e dados fornecidos por carboníferas.

Desse modo, foram obtidas amostras das jazidas selecionadas a fim de submetê-las a próxima etapa. Na Figura 5.2, fornecida pela COPELMI, pode-se, então, visualizar o perfil geológico da jazida de Butiá-Leão (Mina B3), com destaque

para a camada M2 (nomenclatura da COPELMI), na qual foi retirada a amostra de carvão para os ensaios experimentais.

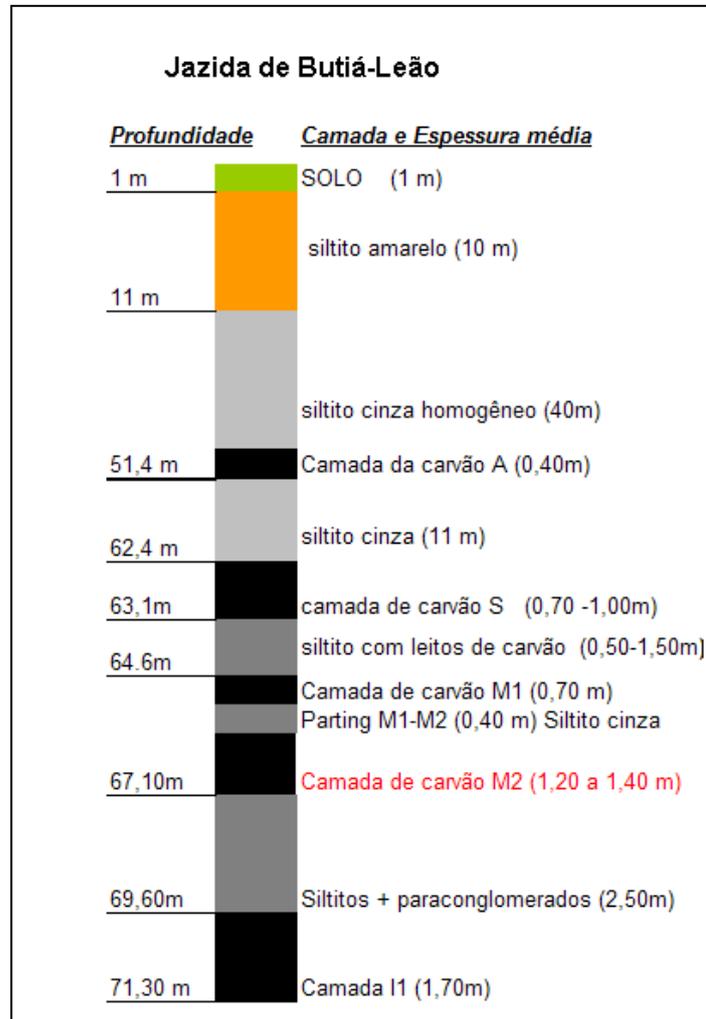


Figura 5.2. Perfil geológico da jazida de Butiá-Leão.

5.3. Avaliação das Jazidas Potenciais Escolhidas via Propriedades Físico-Químicas

As amostras de carvão das jazidas selecionadas, ou seja, das jazidas de Butiá-Leão (M2) e Charqueadas (camadas I1F e I2B), foram submetidas a análises imediatas, elementares e de poder calorífico, cujos resultados podem ser vistos na Tabela 5.11. Os resultados obtidos para a jazida de Charqueadas diferenciaram-se um pouco dos anteriormente apresentados por Bastiani et al. ([1986]). Essa variabilidade, apesar de pouca, demonstra a heterogeneidade do carvão e a importância do processo de amostragem, sendo esse responsável pela garantia de uma boa representatividade da amostra original. Em relação à jazida de Butiá-Leão,

os resultados para as análises físico-químicas foram diferentes dos apresentados por Bastiani et al. ([1986]), anteriormente descritos, por não terem sido amostrados na mesma camada.

Tabela 5.11. Análises físico-químicas dos carvões selecionados como favoráveis ao método UCG.

| Amostra | Butiá-Leão | Charqueadas (camada I1F) | Charqueadas (camada I2B) |
|--|-------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Umidade de higroscopia, % | 12,90 | 6,32 | 6,34 |
| Cinza (b.s), % | 24,60 | 40,88 | 30,29 |
| Matérias voláteis (b.s), % | 31,00 | 24,10 | 30,18 |
| Carbono fixo (b.s), % | 43,40 | 35,02 | 39,53 |
| Enxofre total (b.s), % | 0,94 | 0,38 | 0,62 |
| Carbono total (b.s), % | 62,10 | 47,56 | 54,90 |
| Hidrogênio (b.s), % | 4,43 | 3,50 | 3,63 |
| Nitrogênio (b.s), % | 0,98 | 1,05 | 1,19 |
| [Oxigênio + Halogênios] (b.s), % | 6,18 | 6,63 | 9,37 |
| Poder calorífico superior (b.s), kcal/kg | 5.600 | 4.255 | 4.840 |
| Poder calorífico inferior (b.s), kcal/kg | 5.400 | 4.075 | 4.655 |

(b.s) =base seca;

% = g/100g.

Além disso, é fundamental comentar que as amostras da jazida de Charqueadas se encontravam a pelo menos 2 anos guardadas no CEPAC, sendo nesse período expostas ao ambiente. Essa exposição pode acarretar na oxidação do carbono, do hidrogênio e do enxofre presentes no carvão, podendo alterar também o seu percentual de umidade. A umidade sofre alterações, pois é o somatório da água agregada na superfície do carvão e em seus poros e dependendo do ambiente, ou seja, da umidade do ambiente a qual o carvão é exposto, ela pode variar significativamente.

Em relação aos parâmetros analisados, como já comentado anteriormente, os mais influentes na gaseificação *in situ* são o teor de umidade, o teor de cinzas e a reatividade, sendo o teor de enxofre considerado também um grande influente na qualidade do gás formado nesse processo. As jazidas apresentaram valores inferiores a 15% de umidade, valores ótimos para o UCG. Entretanto, cabe destacar que as amostras de Charqueadas foram retiradas de amostras disponíveis no CEPAC e guardadas há 2 anos, estando expostas ao ambiente durante esse

período. Ao contrário da amostra da jazida de Butiá-Leão que foi retirada da mina algumas semanas antes da realização dessas análises.

O teor de cinzas de ambas as amostras ficaram abaixo de 50% representando boas condições para o UCG, haja vista que valores superiores a esse valor podem produzir gás com baixo poder calorífico. Desse modo, a jazida de Butiá-Leão para esse parâmetro foi a que apresentou um melhor resultado. Contudo, em referência ao teor de enxofre foi a que apresentou o maior valor percentual, demonstrando que o gás produzido durante a gaseificação *in situ* necessitará de maiores investimentos para a remoção de impureza. Novamente, cabe salientar que as amostras de Charqueadas já estavam a alguns anos expostas ao ambiente.

Em relação ao teor de nitrogênio, esse apresentou um maior valor para a jazida de Charqueadas camada I2B, demonstrando que a mesma poderá ter um maior potencial de formação de óxidos de N₂, que são fontes de poluição atmosférica. Observando os outros parâmetros é importante destacar que o percentual de carbono e o conteúdo energético tendem a aumentar à medida que o *rank* do carvão aumenta, enquanto que a matéria volátil e o percentual de oxigênio tendem a diminuir. Com exceção da análise de matéria volátil, pode-se dizer que a jazida de Butiá-Leão apresenta um maior *rank*, seguida pela jazida de Charqueadas camada I2B. Assim, a jazida de Charqueadas camada I1F detém um menor *rank* que as demais, condição também fundamental para a ocorrência do processo de gaseificação *in situ* e que afetará diretamente no resultado do ensaio de reatividade.

5.4. Reatividade dos Carvões das Jazidas de Butiá-Leão e Charqueadas

A partir da TGA avaliou-se à influência da granulometria e da temperatura de reação nas amostras de carvão selecionadas. Os resultados obtidos para a reatividade foram subdivididos de acordo com a jazida de origem da amostra.

5.4.1.1. Influência da Granulometria e da Temperatura de Reação na Amostra da Jazida de Butiá-Leão

Na Figura 5.3 pode-se visualizar, por meio da DTG, o pico da máxima perda de matéria volátil (segundo pico) quando a amostra com granulometria de 200 *mesh* foi submetida a atmosfera de N₂ com uma taxa de aquecimento de 20°C/min até atingir 1200°C. Desse modo, escolheram-se, então, temperaturas mais elevadas para a amostra reagir com o ar e dar início ao consumo de carbono fixo, pois se observou que a perda de voláteis continuava até valores superiores a 800°C. Assim, avaliando esse termograma, optou-se pelas temperaturas de 950°C e 900°C, como se pode observar na mesma Figura para a amostra de Butiá-Leão de 200 *mesh*.

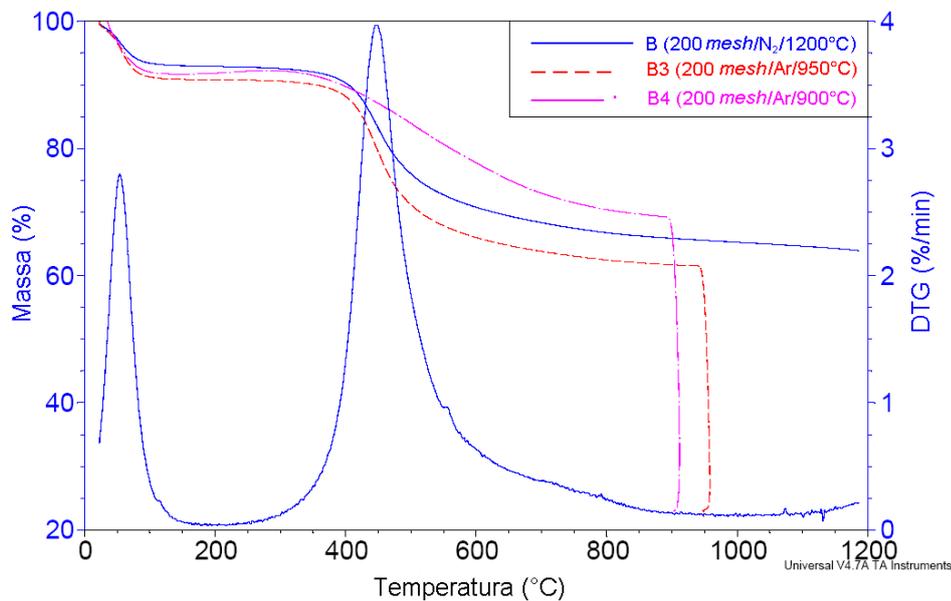


Figura 5.3. Termogramas com a escolha das temperaturas de reação para amostra de Butiá-Leão.

Na Tabela 5.12, encontram-se as reatividades médias e os desvios padrões referentes a amostras com granulometrias de 60 e 200 *mesh* submetidas às temperaturas de 950 e 900°C.

Tabela 5.12. Influência da granulometria e da temperatura na reatividade (amostra de Butiá-Leão).

| Temperatura de gaseificação (°C) | Granulometria (<i>mesh</i>) | Amostras | Reatividade (min ⁻¹) | Desvio padrão (min ⁻¹) |
|----------------------------------|-------------------------------|----------|----------------------------------|------------------------------------|
| 950 | 60 | B1 | 0,234 | 0,007 |
| 900 | 60 | B2 | 0,239 | 0,007 |
| 950 | 200 | B3 | 0,249 | 0,004 |
| 900 | 200 | B4 | 0,237 | 0,019 |

As reatividades foram calculadas conforme a Equação 3.9. A Figura 5.4 mostra o termograma de uma triplicata da amostra B3 (granulometria: 200 *mesh*; temperatura de reação: 950°C), na qual é possível observar a decomposição do carvão ao longo do tempo. Dessa maneira, pode-se evidenciar, na sequência de eventos, a perda de umidade, a liberação de voláteis, a perda de carbono fixo (m_o) e o resíduo gerado pela queima (cinzas) para essa amostra. Os picos da DTG comprovam essa decomposição, sendo o maior deles correspondente à máxima taxa de perda de carbono fixo, dm/dt .

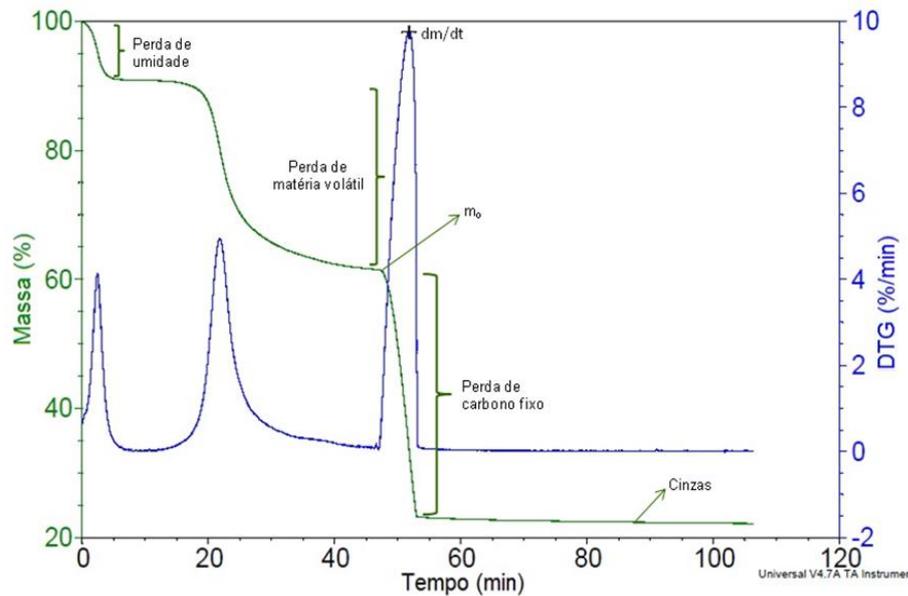


Figura 5.4. Termograma e DTG da amostra B3 (granulometria de 200 *mesh* e isoterma de 950°C).

Em virtude dos resultados apresentados pôde-se verificar que, comparando as amostras na temperatura de reação química de 950°C (B1 e B3), a de 200 *mesh* apresentou uma reatividade superior, enquanto que, para uma temperatura de 900°C (B2 e B4), a de 60 *mesh* foi superior (B2). Na Figura 5.5 pode ser visualizado que a amostra de Butiá-Leão, à temperatura de 950°C e 200 *mesh* (B3), apresentou a maior reatividade. O aumento da granulometria, de acordo com Pohlmann (2010), proporciona uma elevação da área superficial e conseqüentemente uma maior reatividade, porém isso não pôde ser confirmado na amostra B4 (200 *mesh*) em relação a B2 (60 *mesh*) provavelmente por essas terem sido analisadas a uma temperatura inferior (900°C).

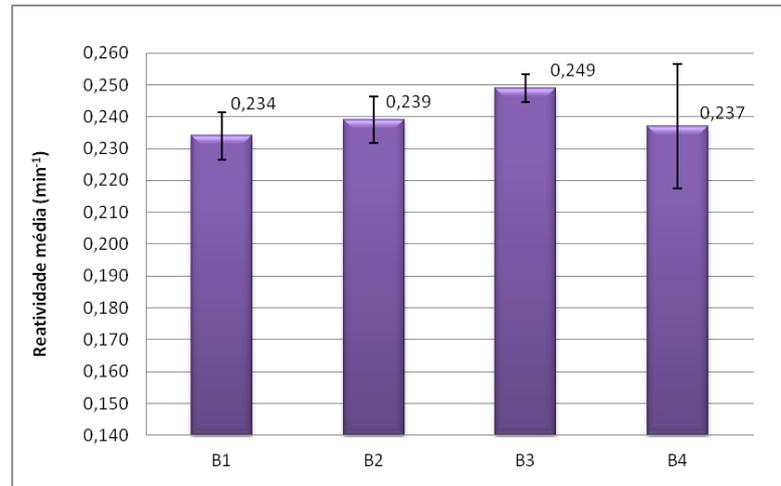


Figura 5.5. Reatividade das amostras de Butiá-Leão.

Analisando apenas as duas temperaturas testadas, observou-se que para amostras em uma mesma granulometria, ou seja, 60 *mesh* (B1 e B2) e 200 *mesh* (B3 e B4), não houve uma diferença significativa no valor obtido para a reatividade. Assim, observando os desvios padrões das amostras pode-se dizer que aparentemente não há influência da temperatura na reatividade.

O fato da análise de reatividade de *chars* não ser baseada em testes padrões, permite que a mesma seja avaliada de diferentes maneiras, como: reatividade máxima, média ou reatividade a uma determinada conversão. Optou-se por avaliar apenas a reatividade máxima dos carvões e da mesma forma, por conhecer a evolução da conversão do *char* ao longo do tempo. O cálculo da conversão foi realizado conforme a Equação 3.10, partindo-se da massa pirolisada, mo.

Nesse caso, a máxima conversão (100%) só foi obtida porque se desconsiderou o resíduo formado ao longo da reação química. A Figura 5.6 apresenta a conversão média para as amostras B1, B2, B3 e B4, com desvio padrão em torno de zero chegando ao máximo de 0,07. As amostras B1 e B3 (ensaio a 950°C) apresentaram um maior tempo para conversão, enquanto às amostras B2 e B4 (ensaio a 900°C) chegaram à conversão máxima ao mesmo tempo. Na temperatura de reação de 950°C a amostra com granulometria de 60 *mesh*, ou seja, B1, foi a que precisou de um maior tempo para converter reagente em produtos, cabendo ponderar que a diferença entre esses tempos é relativamente pequena.

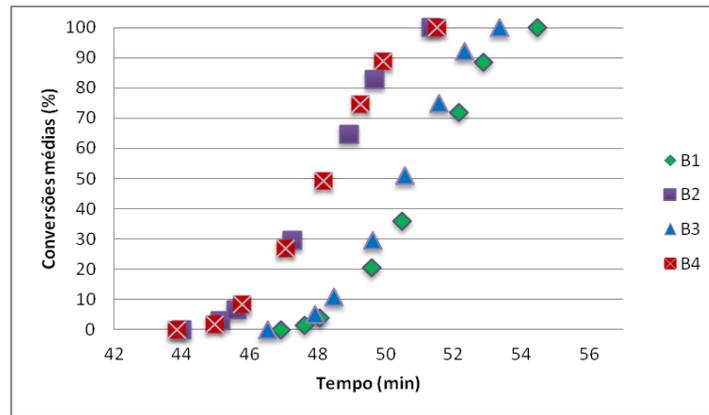


Figura 5.6. Evolução da conversão do *char* para as amostras de Butiá-Leão.

5.4.1.2. Influência da Granulometria e da Temperatura de Reação na Amostra da Jazida de Charqueadas (camada I1F)

O termograma para a jazida de Charqueadas (camada I1F) demonstrou que o ensaio de reatividade também deveria ser feito a altas temperaturas, pois a perda de voláteis ainda não estava estável na temperatura de 800°C. Assim, na Tabela 5.13, encontram-se as reatividades médias e os desvios padrões referentes a amostras com granulometrias de 60 e 200 *mesh* submetidas às temperaturas de 950 e 900°C.

Tabela 5.13. Influência da granulometria e da temperatura na reatividade (amostra de Charqueadas camada I1F).

| Temperatura de gaseificação (°C) | Granulometria (<i>mesh</i>) | Amostras | Reatividade (min ⁻¹) | Desvio padrão (min ⁻¹) |
|----------------------------------|-------------------------------|----------|----------------------------------|------------------------------------|
| 950 | 60 | C1 | 0,238 | 0,009 |
| 900 | 60 | C2 | 0,242 | 0,008 |
| 950 | 200 | C3 | 0,278 | 0,007 |
| 900 | 200 | C4 | 0,280 | 0,008 |

Em virtude dos resultados apresentados pôde-se verificar que, comparando as amostras na temperatura de reação química de 950°C (C1 e C3), a de 200 *mesh* apresentou uma reatividade superior, sendo observado o mesmo para amostras a 900°C (C2 e C4). Na Figura 5.7 pode ser visualizado que a amostra de Charqueadas (camada I1F) à temperatura de 900°C e 200 *mesh* (C4), apresentou a maior reatividade. O aumento da granulometria, segundo Pohlmann (2010), proporciona uma elevação da área superficial e conseqüentemente uma maior

reatividade e isso pôde ser confirmado nas amostras analisadas, pois para uma mesma temperatura de reação as que estavam a 200 *mesh* tiveram reatividades superiores.

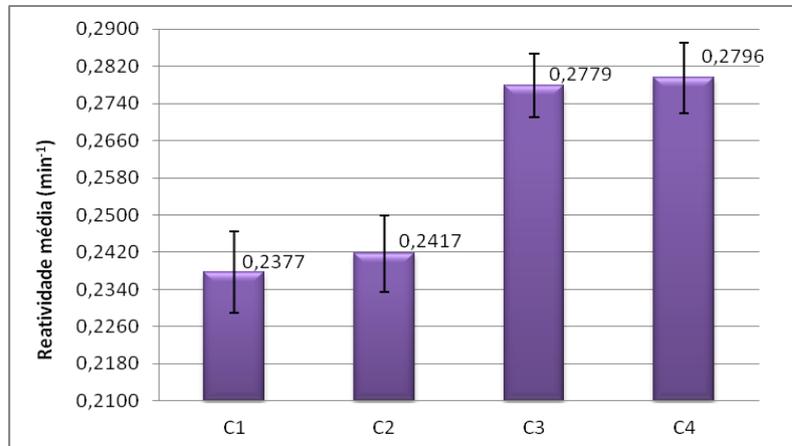


Figura 5.7. Reatividade das amostras de Charqueadas (camada I1F).

Analisando apenas as duas temperaturas testadas, observou-se que para amostras em uma mesma granulometria, ou seja, 60 *mesh* (C1 e C2) e 200 *mesh* (C3 e C4), não houve uma diferença significativa no valor obtido para a reatividade. Assim, observando os desvios padrões das amostras pode-se dizer também que aparentemente não há influência da temperatura na reatividade.

A conversão média do *char* para a jazida de Charqueadas (camada I1F) também foi calculada conforme a Equação 3.10, com desvio padrão em torno de zero chegando ao máximo de 0,09. Os resultados podem ser observados na Figura 5.8. As amostras C1 e C3 (ensaio a 950°C) apresentaram um maior tempo para conversão, enquanto as amostras C2 e C4 (ensaio a 900°C) chegaram mais rapidamente à conversão máxima, apesar da pouca diferença entre os tempos de conversões das amostras. Em referência à granulometria observou-se que para a temperatura de 950°C a de granulometria de 60 *mesh* (C1) foi a que apresentou o maior tempo para converter reagente em produtos e na temperatura de 900°C a amostra C2 também a 60 *mesh* apresentou um maior tempo para a conversão em relação a de 200 *mesh*.

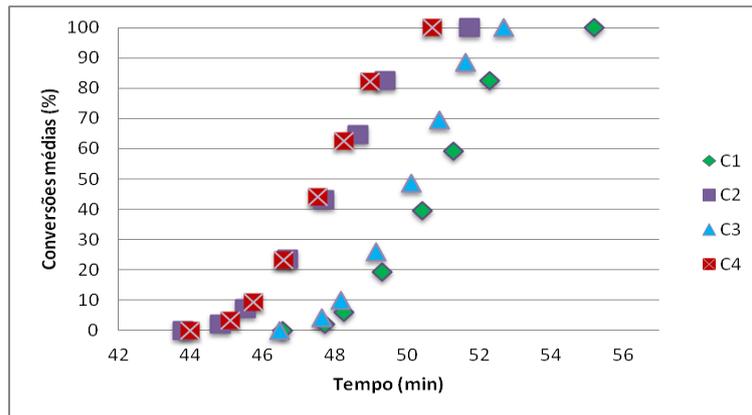


Figura 5.8. Evolução da conversão do *char* para as amostras de Charqueadas (camada I1F).

5.4.1.3. Influência da Granulometria e da Temperatura de Reação na Amostra da Jazida de Charqueadas (camada I2B)

O termograma para a jazida de Charqueadas (camada I2B) demonstrou que o ensaio de reatividade também deveria ser feito a altas temperaturas, pois a perda de voláteis ainda não estava estável na temperatura de 800°C. Desse modo, na Tabela 5.14, apresentada logo abaixo, encontram-se as reatividades médias e os desvios padrões referentes a amostras com granulometrias de 60 e 200 *mesh* submetidas às temperaturas de 950 e 900°C.

Tabela 5.14. Influência da granulometria e da temperatura na reatividade (amostra de Charqueadas camada I2B).

| Temperatura de gaseificação (°C) | Granulometria (<i>mesh</i>) | Amostras | Reatividade (min^{-1}) | Desvio padrão (min^{-1}) |
|----------------------------------|-------------------------------|----------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| 950 | 60 | D1 | 0,238 | 0,019 |
| 900 | 60 | D2 | 0,237 | 0,011 |
| 950 | 200 | D3 | 0,255 | 0,015 |
| 900 | 200 | D4 | 0,233 | 0,015 |

Em virtude dos resultados apresentados pôde-se verificar que, comparando as amostras na temperatura de reação química de 950°C (D1 e D3), a de 200 *mesh* apresentou uma reatividade superior, enquanto que, para uma temperatura constante de 900°C (D2 e D4), a de 60 *mesh* foi superior. Na Figura 5.9 pode ser visualizado que a amostra de Charqueadas (camada I2B) à temperatura de 950°C e 200 *mesh* (D3), apresentou a maior reatividade. O aumento da granulometria, de acordo com Pohlmann (2010), proporciona uma elevação da área superficial e conseqüentemente uma maior reatividade, porém isso não pôde ser confirmado na

amostra D4 (200 *mesh*), provavelmente por essa ter sido analisada a uma temperatura inferior (900°C).

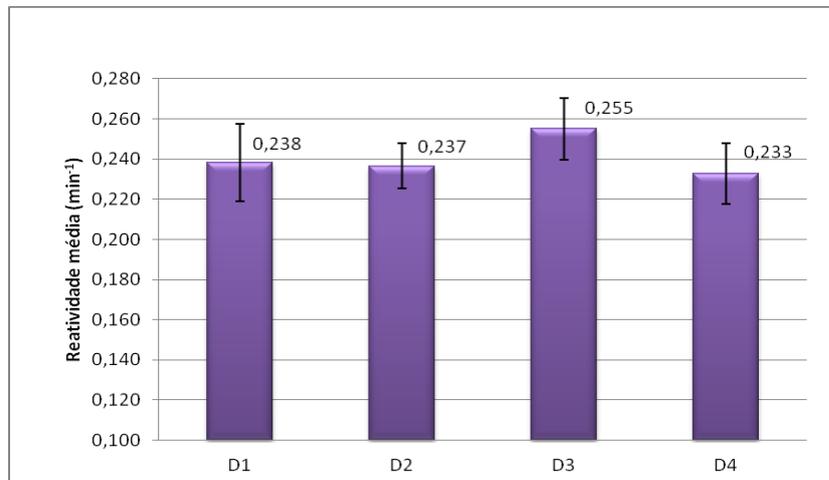


Figura 5.9. Reatividade das amostras de Charqueadas (camada I2B).

Analisando apenas as duas temperaturas testadas, observou-se que para amostras na granulometria de 60 *mesh* (D1 e D2) não houve uma diferença significativa no valor obtido para a reatividade. Assim, observando os desvios padrões das amostras pode-se dizer que aparentemente não há influência da temperatura na reatividade.

A conversão média do *char* para a jazida de Charqueadas (camada I2B) também foi calculada conforme a Equação 3.10, com desvio padrão variando de zero ao máximo de 0,16. Os resultados podem ser observados na Figura 5.10. As amostras D1 e D3 (ensaio a 950°C) apresentaram um maior tempo para conversão, enquanto as amostras D2 e D4 (ensaio a 900°C) chegaram mais rapidamente à conversão máxima, apesar da pouca diferença entre os tempos de conversões das amostras. Em referência à granulometria constatou-se que para a temperatura de 950°C a de granulometria de 60 *mesh* (D1) foi a que apresentou o maior tempo para converter reagente em produtos e na temperatura de 900°C a amostra D2 também a 60 *mesh* apresentou um maior tempo para a conversão em relação a de 200 *mesh*.

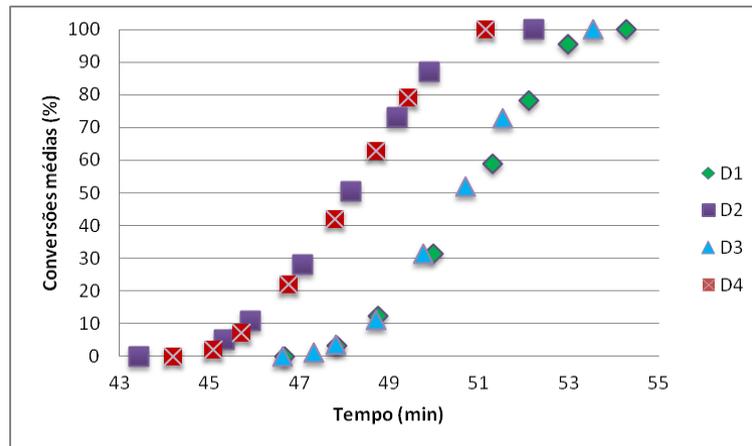


Figura 5.10. Evolução da conversão do *char* para as amostras de Charqueadas (camada I2B).

5.4.1.4. Avaliação dos resultados de reatividade

O termograma obtido no ensaio de reatividade para as amostras de carvão B3 (200 *mesh*/950°C), C4 (200 *mesh*/900°C) e D3 (200 *mesh*/950°C) das jazidas de Butiá-Leão e de Charqueadas camada I1F e I2B, respectivamente, é apresentado na Figura 5.11. Essas amostras foram as que apresentaram as maiores reatividades médias entre as condições de temperatura e granulometria testadas.

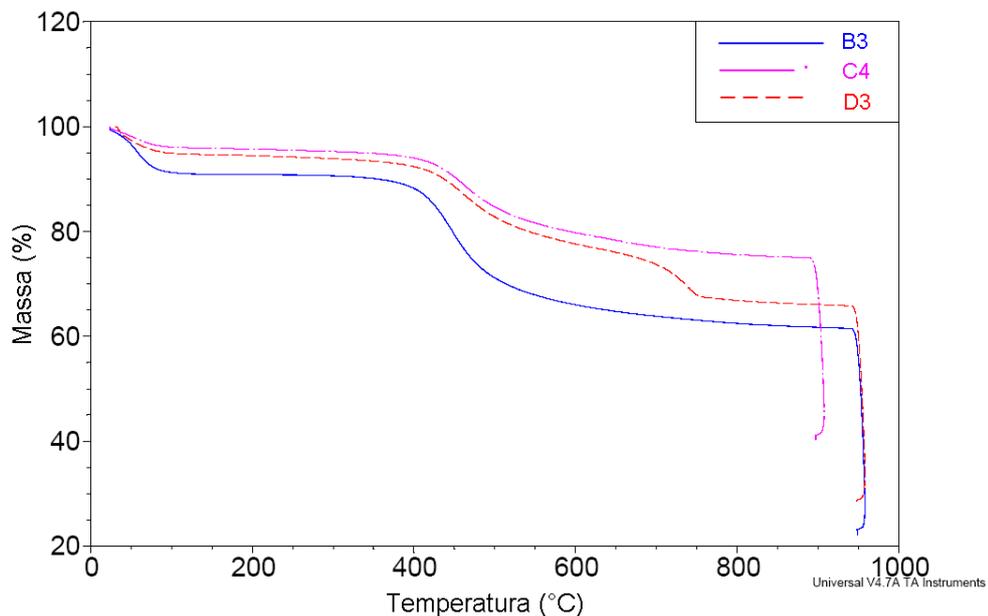


Figura 5.11. Termograma comparativo das amostras B3, C4 e D3.

O termograma apresenta tanto a etapa de pirólise como a etapa de gaseificação. Na etapa de pirólise, devido ao alto teor de matéria volátil, a amostra B3 teve uma perda de massa mais acentuada do que as demais, seguida pelas

amostras D3 e C4. A temperatura de início da pirólise para as amostras analisadas ficou em torno dos 400°C.

Na Tabela 5.15 estão apresentados os valores das reatividades médias obtidas para as jazidas potenciais nas condições de ensaio que detiveram os melhores resultados. Nessa, pode ser observado, conforme já citado, que o carvão de Charqueadas camada I1F reage mais rapidamente ao ar do que as demais.

Tabela 5.15. Reatividade das amostras B3, C4 e D3.

| Amostra | Reatividade (min^{-1}) |
|---------|-----------------------------------|
| B3 | 0,249 |
| C4 | 0,280 |
| D3 | 0,255 |

A amostra de Charqueadas camada I2B (D3) deteve a segunda maior reatividade, enquanto a amostra da jazida de Butiá-Leão (B3) foi a detentora da menor reatividade. Avaliando as propriedades físico-químicas anteriormente descritas para essas amostras, ressaltou-se que, com exceção da análise de matéria volátil, a jazida de Butiá-Leão apresentava um maior *rank* dentre as três analisadas, seguida da jazida de Charqueadas camada I2B.

De acordo com o Quadro 3.3 (anteriormente apresentado) sabe-se que o *rank* é um dos fatores mais influentes na reatividade do *char*, pois, segundo Pohlmann (2010), quanto maior o *rank*, menor a reatividade do carvão. A amostra C4, detentora de um menor *rank* foi a que obteve a maior reatividade, enquanto a amostra B3 de Butiá-Leão, que apresentava um maior *rank* foi a que obteve a menor reatividade. Assim, ao se correlacionar os resultados de reatividade com os resultados obtidos para os parâmetros físico-químicos avaliados (que permitiram apontar o *rank* das amostras) confirmou-se a grande dependência ao *rank*.

Além disso, conforme Machado (2009) cabe salientar a possibilidade de ocorrer influência da matéria mineral do carvão. Desse modo, sílica e alumina presentes nos carvões podem diminuir a reatividade, enquanto cálcio, magnésio, ferro e espécies alcalinas podem aumentar, sendo esse efeito catalítico mais notado em carvões de baixo *rank*. Logo, apesar de não ter sido realizada uma análise de

composição química das cinzas geradas, pode-se notar (por meio de parâmetros físico-químicos já apresentados) que a amostra de Charqueadas camada I1F foi a que apresentou um maior teor percentual de cinzas, indicando dessa forma uma maior quantidade de matéria mineral presente. Acrescido a isso, pode-se dizer que provavelmente houve influência positiva do efeito catalítico nessa amostra.

Outro parâmetro que pode ter influenciado os resultados de reatividade é a história térmica do *char* (pirólise). Em relação à pirólise, então, um dos fatores que podem afetar na reatividade é o teor de voláteis, que no caso das amostras analisadas foi inferior para a amostra de Charqueadas camada I1F, detentora da maior reatividade. Segundo Machado (2009), uma maior liberação de matéria volátil durante a pirólise torna a estrutura do carvão mais aromática e estável, e por sua vez diminui sua reatividade. Esse fato foi percebido na amostra da jazida de Butiá-Leão que detinha o maior teor de voláteis dentre as demais amostras potenciais.

Assim, pode-se dizer que a reatividade da amostra C4 é 1,12 vezes maior do que a amostra B3 e 1,09 vezes maior que a amostra D3. Correlacionando aos dados obtidos por Machado (2009) (Tabela 5.16) tem-se que a amostra de maior reatividade desse estudo é: 1,27 vezes maior que CC; 1,75 vezes maior que BC; 3,50 vezes maior que ICA e, 4,67 vezes maior que ICB.

Tabela 5.16. Reatividade de carvões encontrados em literatura.

| Carvão | Reatividade (min⁻¹) |
|--|---------------------------------------|
| CC (carvão vegetal cedido pela Usina Siderúrgica Usiminas de Minas Gerais) | 0,22 |
| BC (carvão obtido na Mina do Leão e cedido pela Companhia Riograndense de Mineração) | 0,16 |
| ICA (carvão de origem australiana cedido pela Usiminas) | 0,08 |
| ICB (carvão de origem australiana cedido pela Usiminas) | 0,06 |

Fonte: MACHADO, 2009.

Da mesma maneira, é importante ressaltar que a reatividade é influenciada por diversos parâmetros, podendo ser ele instrumentais ou característicos da amostra. A Tabela 5.17 mostra, então, alguns parâmetros físico-químicos desses

carvões apresentados no trabalho de Machado (2009). Desse modo, observou-se que os resultados de carbono total, carbono fixo, assim como de poder calorífico foram bem superiores aos resultados dos carvões desse estudo, ao contrário do teor de cinzas.

Tabela 5.17. Propriedades físico-químicas dos carvões encontrados em literatura.

| Amostra | BC | CC | ICA | ICB |
|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Carbono total (bsic), % | 74,7 | 83,7 | 86,4 | 89,8 |
| Hidrogênio (bsic), % | 5,0 | 3,1 | 4,9 | 4,3 |
| Nitrogênio (bsic), % | 1,4 | 1,1 | 2,1 | 2,0 |
| Enxofre total (bsic), % | 1,0 | 0,1 | 0,6 | 0,5 |
| Oxigênio (bsic), % | 17,9 | 12,0 | 6,0 | 3,5 |
| Matéria volátil (bsic), % | 38,7 | 21,8 | 27,7 | 18,5 |
| Carbono fixo (bsic), % | 61,3 | 78,2 | 72,3 | 81,5 |
| Cinza (b.s), % | 15,7 | 4,6 | 9,5 | 10,3 |
| Poder calorífico superior (kcal/kg) | 6.110 | 7.165 | 7.545 | 7.635 |

(b.s)=base seca

(bsic)=base seca isenta de cinzas

%=g/100g.

Fonte: MACHADO, 2009.

A reatividade desses carvões apresentados (na granulometria de 200 *mesh*) foi obtida, segundo Machado (2009), por meio de uma termobalança da NETZCH modelo STA 409 utilizando na etapa de gaseificação o CO₂ como gás reagente. Conforme, comentado anteriormente, há uma discussão entre a escolha do ar e do CO₂ no ensaio de reatividade, pois a reação entre o carbono e o ar é exotérmica. Dessa maneira, não é recomendável utilizá-lo em amostras muito reativas, isso porque pode ocorrer um aumento de temperatura, tornando o ensaio pouco controlável e não reprodutível. Ao contrário do CO₂, que reage endotermicamente com o carbono e é recomendável para a avaliação da reatividade de carvões altamente reativos em termobalança (GOMES, 2004).

Nesse estudo, a utilização do ar como gás reagente não apresentou nenhum problema de reprodutibilidade, além disso, cabe novamente salientar que a reação de oxidação parcial do carvão, ou seja, reação do ar com o carbono, também é considerada uma reação importante na gaseificação, logo os experimentos que forem realizados para a obtenção da reatividade refletirão as características da própria reação de gaseificação (YOON et al., 2007).

Acrescido a isso, cabe ponderar novamente que a jazida de Charqueadas camada I1F foi a detentora da maior reatividade se comparada também a camada I2B da mesma jazida. Porém, ressalta-se que na ocorrência do processo de UCG haverá uma interação entre elas e as demais camadas existentes nessa jazida e, isso não foi considerado nesse estudo. Assim, levou-se em conta apenas os critérios geológicos e experimentais para a escolha da amostra potencial à aplicação de UCG de maneira isolada, mas salienta-se a importância da realização de análises que ponderem essa interação e encontrem valores médios satisfatórios ao UCG.

5.5. Tabela ANOVA

Os resultados da análise de variância (ANOVA) estão representados na Tabela 5.18. Nessa, pode-se afirmar com 95% de confiança que a jazida e a granulometria utilizada nos ensaios tem influência direta na reatividade dos carvões.

Tabela 5.18. Tabela ANOVA

| Fonte de Variação | Soma dos Quadrados (SQ) | Graus de Liberdade (GL) | Média dos Quadrados (MQ) | Teste F | Significância-p |
|--------------------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|----------|-----------------|
| Constante | 2,188004 | 1 | 2,188004 | 15288,87 | 0 |
| Jazida | 0,002903 | 2 | 0,001451 | 10,14 | 0,000642 |
| Granulometria | 0,002735 | 1 | 0,002735 | 19,11 | 0,000205 |
| Temperatura | 0,000177 | 1 | 0,000177 | 1,23 | 0,277512 |
| Jazida*Granulometria | 0,002095 | 2 | 0,001047 | 7,32 | 0,003298 |
| Jazida*Temperatura | 0,000327 | 2 | 0,000164 | 1,14 | 0,335442 |
| Granulometria* Temperatura | 0,000406 | 1 | 0,000406 | 2,83 | 0,105212 |
| Jazida*Granulometria* Temperatura | 0,000145 | 2 | 0,000073 | 0,51 | 0,608545 |
| Erro | 0,003435 | 24 | 0,000143 | | |

A partir da Figura 5.12 pode-se observar com maior clareza que a reatividade varia de acordo com a origem da amostra, ou seja, amostras de carvões de diferentes jazidas e diferentes camadas obtiveram valores de reatividades distintos.

Da mesma maneira, conforme já notado e comentado anteriormente, a granulometria influenciou diretamente na reatividade, sendo essa variação mais acentuada na jazida de Charqueadas camada I1F. Todas as amostras analisadas obtiveram maiores reatividades quando em menor granulometria, no caso 200 mesh.

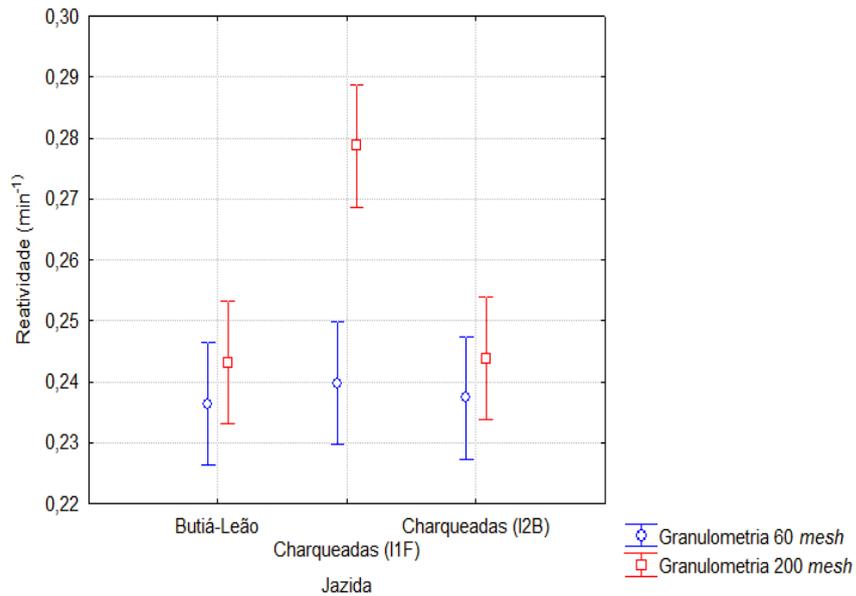


Figura 5.12. Influência da granulometria na reatividade.

Analisando a Tabela 5.18 e observando a Figura 5.13 é possível afirmar que as temperaturas de reação testadas não exerceram influência significativa na reatividade dos carvões. Assim, a reatividade foi influenciada apenas pela jazida e camada escolhida e pela granulometria.

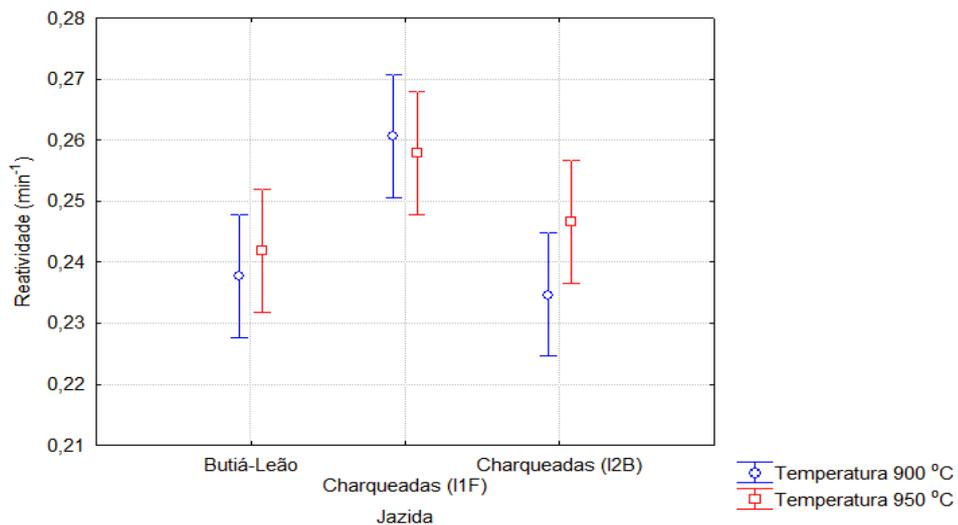


Figura 5.13. Influência da temperatura de reação na reatividade.

5.6. Variação Entálpica

As amostras das jazidas de Butiá-Leão e de Charqueadas (camadas I1F e I2B) também foram avaliadas em relação as suas curvas de fluxo de calor geradas durante o ensaio de reatividade. A Figura 5.14 mostra o comportamento da amostra C4 de Charqueadas (camada I1F) que foi a amostra que apresentou a maior reatividade, se comparada às demais. Nessa figura pode-se notar que houve a formação de um pico exotérmico, sendo esse fenômeno também notado para todas as amostras analisadas. A variação de entalpia (ΔH), então, deu-se de maneira exotérmica, podendo estar associada ao fenômeno físico de adsorção e aos fenômenos químicos de decomposição, oxidação/redução em atmosfera gasosa e reações catalíticas.

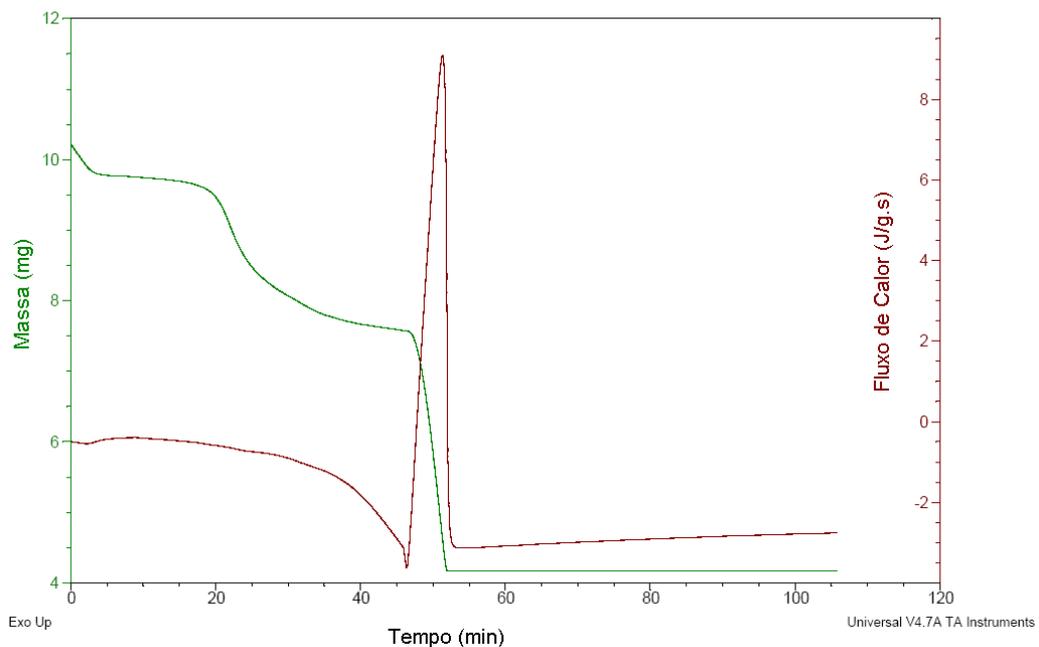


Figura 5.14. Fluxo de calor para uma das triplicatas da amostra C4 de Charqueadas (camada I1F).

Na Tabela 5.19 estão apresentados as variações médias de entalpia e seus desvios padrões para todas as amostras analisadas. A amostra B1 (60 *mesh*) submetida à temperatura de reação de 950°C foi a que obteve o maior ΔH para a jazida de Butiá-Leão. Na jazida de Charqueadas, camada I1F, a amostra com maior variação de entalpia foi a C1 (60 *mesh*/950°C). Em relação à mesma jazida, mas na camada I2B, as amostras D2 (60 *mesh*/900°C) e D4 (200 *mesh*/900°C) foram as que apresentaram as maiores variações entálpicas. A partir dos valores de desvios

padrões apresentados pode-se verificar que praticamente não houve influência significativa da temperatura e da granulometria nos resultados de variação de entalpia.

Tabela 5.19. Variação de entalpia das amostras analisadas da jazida de Butiá-Leão e Charqueadas (camada I1F e I2B).

| Amostra | Variação de entalpia (J/g) | Desvio Padrão (J/g) |
|---------|----------------------------|---------------------|
| B1 | 11.067,33 | 407,54 |
| B2 | 10.244,67 | 1472,21 |
| B3 | 10.247,00 | 537,15 |
| B4 | 9.804,33 | 586,09 |
| C1 | 10.308,00 | 728,00 |
| C2 | 9.615,33 | 1346,45 |
| C3 | 8.755,33 | 1192,35 |
| C4 | 8.144,67 | 841,12 |
| D1 | 9.635,67 | 1594,21 |
| D2 | 10.142,00 | 1116,80 |
| D3 | 9.727,33 | 1517,79 |
| D4 | 9.793,00 | 545,16 |

Assim, de modo comparativo, avaliou-se a reatividade média das amostras frente as suas variações entálpicas médias, como mostra a Figura 5.15 para a jazida de Butiá-Leão. A amostra B1 que apresentou a maior variação de entalpia dentre as amostras analisadas foi a que também apresentou o menor valor de reatividade nos ensaios.

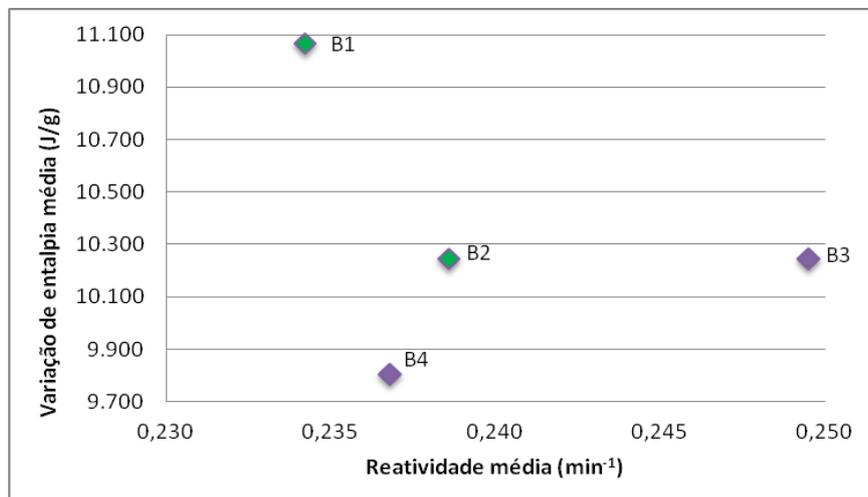


Figura 5.15. Reatividade x Variação de entalpia (amostra da jazida de Butiá-Leão).

Na Figura 5.16 pode-se observar a mesma comparação só que para a jazida de Charqueadas, camada I1F. A amostra C1 foi a que apresentou o maior valor de ΔH e, ao mesmo tempo foi a amostra menos reativa dessa jazida.

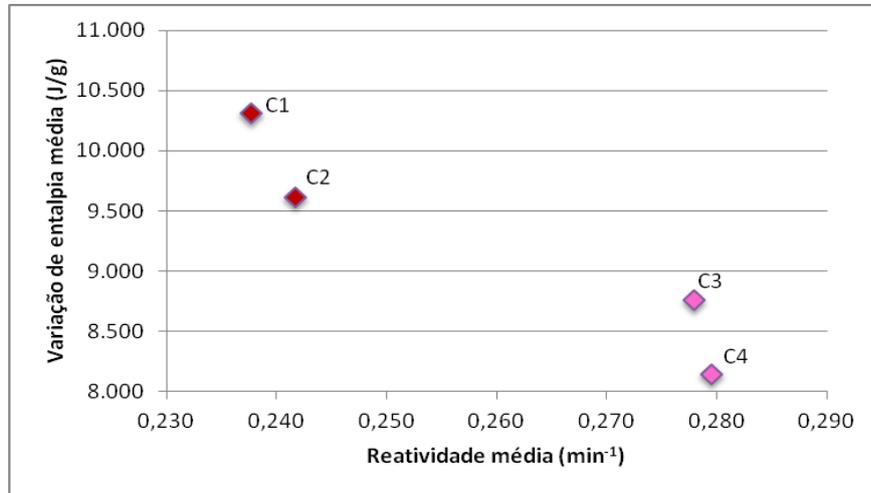


Figura 5.16. Reatividade x Variação de entalpia (amostra da jazida de Charqueadas – camada I1F).

Na jazida de Charqueadas, para a amostra retirada da camada I2B, pode-se avaliar também por meio da Figura 5.17 um comparativo dos resultados de reatividade com os de ΔH . As amostras D2 (60 *mesh*) e D4 (200 *mesh*) submetidas à temperatura de reação de 900°C foram as que apresentaram os maiores valores de ΔH e as menores reatividades dessa jazida.

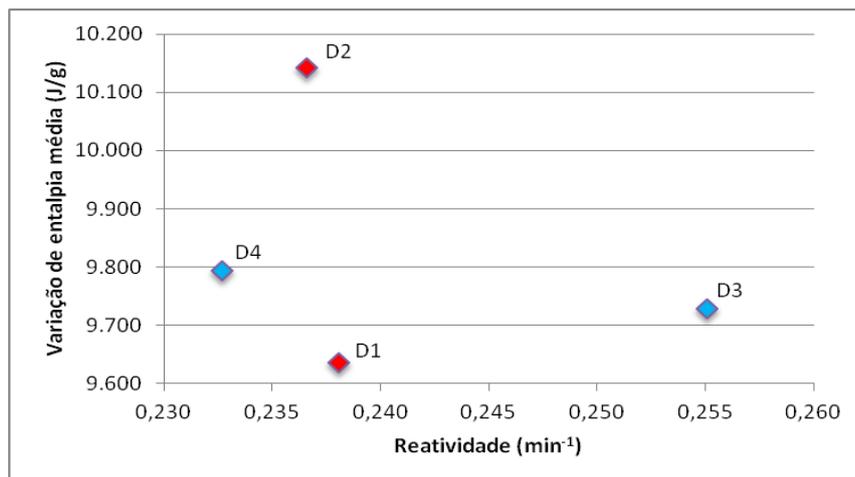


Figura 5.17. Reatividade x Variação de entalpia (amostra da jazida de Charqueadas – camada I2B).

Desse modo, observou-se que para praticamente todas as amostras analisadas o comportamento foi o mesmo, ou seja, em elevadas variações médias de entalpia, pode-se observar baixas reatividades. Isso porque, quanto maior o ΔH

maior será a energia necessária para que a reação ocorra. Assim, em amostras mais reativas, observa-se a necessidade de menos energia para transformar reagente em produtos.

6. CONCLUSÕES

A partir da avaliação do potencial das principais jazidas sul-brasileiras para a gaseificação *in situ* foi possível verificar que há grandes possibilidades para a aplicação dessa nova tecnologia no Brasil, principalmente no que diz respeito a condições geológicas e físico-químicas necessárias para sua ocorrência. Na primeira etapa, na qual se realizou a seleção das jazidas por meio de informações geológicas específicas (quantidade de recursos disponíveis, profundidade e espessuras médias da camada), concluiu-se que as jazidas de Butiá-Leão e de Charqueadas (camadas I1F e I2B) detinham características mais propensas à metodologia de UCG. Desse modo, pode-se dizer que essas jazidas contêm grandes reservas de carvão, com profundidades acima de 60 m, sendo a maior parte de suas camadas encontradas acima de 200 m e espessuras próximas ou superiores a 2m.

A jazida de Butiá-Leão apresentou um menor teor de cinzas que as demais, apesar de que todas as jazidas apresentaram valores inferiores a 50%, valor limite, para que o gás produzido não tenha um poder calorífico relativamente baixo. Porém, levando-se em conta o percentual de carbono e oxigênio e o conteúdo energético observou-se que a camada I1F de Charqueadas quando comparada às demais apresentou o comportamento de um carvão de baixo *rank*, sendo esse preferido para a gaseificação *in situ* de carvão. Em relação ao teor de nitrogênio, a jazida de Charqueadas camada I2B obteve o maior valor, apontando que a mesma poderá ter um maior potencial de formação de óxidos de N₂.

Em relação às granulometrias testadas no ensaio de reatividade, 60 e 200 *mesh*, concluiu-se que, conforme afirma Pohlmann (2010), a reatividade aumenta com a diminuição das partículas. Evidência disso é o resultado de reatividade das

amostras testadas que ficaram superiores na granulometria de 200 *mesh*. Da mesma maneira, por meio da avaliação estatística pode-se afirmar com 95% de confiança que a influência da granulometria é significativa na reatividade dos carvões.

No entanto, com o mesmo grau de confiança é possível afirmar que as temperaturas testadas no ensaio de reatividade não foram significativamente influentes nos resultados obtidos, provavelmente por deterem valores muito próximos (900 e 950°C). Logo, a reatividade foi influenciada apenas pela granulometria e pela jazida/camada de origem da amostra. Além disso, observou-se a influência direta do *rank* na reatividade.

Avaliando-se as conversões dos carvões selecionados concluiu-se que para todas as jazidas a conversão foi mais rápida para as amostras de 200 *mesh* submetidas à temperatura de reação de 900°C. Levando-se em consideração a temperatura, é importante ressaltar que o equipamento leva mais tempo para atingir a temperatura de 950°C a uma taxa de 20°C/min, assim a influência na conversão deu-se apenas pela granulometria, embora que para algumas amostras a diferença foi praticamente inexistente.

Analisando as variações médias de entalpia concluiu-se que as mesmas estão de acordo com os resultados de reatividade apresentados. Isso porque se observou que em maiores variações entálpicas encontravam-se as menores reatividades, haja vista que quanto maior o ΔH , maior é a energia necessária para que a reação ocorra. Assim, observou-se que carvões mais reativos gastam menos energia para transformar reagente em produtos.

Ponderando que as jazidas selecionadas apresentam condições geológicas favoráveis ao UCG, utilizaram-se as propriedades composicionais de cada carvão como último critério de seleção. Os parâmetros analisados pelas análises imediata, elementar e de poder calorífico apontaram as jazidas de Butiá-Leão e a de Charqueadas camada I1F como as mais propensas ao UCG, levando desse modo a utilização do resultado do teste de reatividade como critério para a escolha final.

Assim, o presente trabalho conclui que a jazida sul-brasileira que detém as propriedades mais adequadas, dentre as estudadas, para a aplicação do método UCG, é a jazida de Charqueadas camada I1F. Essa jazida foi indicada por apresentar, conforme análise realizada, o carvão com maior reatividade, além de parâmetros como teor de cinzas, umidade e enxofre favoráveis ao método. A jazida também se destacou das demais pelo fato de seu carvão ser aparentemente de baixo *rank*, além de apresentar valores de recursos totais de carvão e profundidade e espessura médias da camada ideais ao UCG.

7. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Este estudo delinea como proposta para trabalhos futuros avaliar o potencial para a gaseificação *in situ* em outras jazidas sul-brasileiras como o caso da Sul-Catarinense, camada Bonito, que apresentou também condições geológicas favoráveis ao UCG. Outra proposta é realizar o ensaio de reatividade utilizando o CO₂ como gás reagente ao invés do ar, avaliando dessa forma se há alteração em termos de valores de reatividade.

Da mesma maneira, seria interessante avaliar o efeito da matéria mineral do carvão no teste de reatividade, pois como visto em literatura, a presença de sílica e alumina podem diminuir a taxa de reação, enquanto cálcio, magnésio, ferro e espécies alcalinas podem aumentar. Igualmente, torna-se necessário analisar a interação das camadas de carvão da jazida selecionada, ou seja, Charqueadas, no processo UCG.

Mais uma sugestão seria determinar a composição do gás de síntese produzido no ensaio de reatividade, que simula a reação de gaseificação, definindo assim, para cada amostra de carvão qual a rota química mais atraente para o mercado brasileiro. Além disso, é igualmente interessante desenvolver modelagens numéricas capazes de determinar os parâmetros cinéticos envolvidos no processo de gaseificação *in situ*.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACIOLI, José de Lima. **Fontes de Energia**. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1994. 138 p.

ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. Carvão Mineral. Brasília, 2008. 3. ed. Disponível em:
<www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas_par3_cap9.pdf>. Acesso em: 3 novembro 2010.

AQUINO, Aline Sabino. **Análise de Rotas Alternativas para Seqüestro Químico de CO₂: Produção de Metanol, Gás de Síntese e Acido Acético**. Rio de Janeiro. 2008. 75p. Monografia (Graduação em Engenharia Química). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Preparação de Amostra de Carvão Mineral para Análise e Ensaio: NBR 8292. 1983.

BACHU, Stefan. Sequestration of CO₂ in geological media: criteria and approach for site selection in response to climate change. **Energy Conversion & Management**, v. 41, p. 953-970, 2000.

BASTIANI, Gustavo A. et al. Geological Synthesis of the Coal Basins in the Southern Brazil and their Potentiality to the Underground Coal Gasification. **Relatório**. Rio Grande do Sul, [1986].

BERNAL, Cláudia et al. Influência de alguns parâmetros experimentais nos resultados de análises calorimétricas diferenciais – DSC. **Química Nova**, v. 25, p. 849-855, 2002. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-40422002000500023&script=sci_arttext>. Acesso em: 10 abril 2012.

BIALECKA, Barbara. Analysis of Criteria for UCG Siting and Operation. **Acta Montanistica Slovaca**, v. 14, n° 4, p. 298-305, 2009.

BOURG, Hubert de Mestier Du. **Future Prospective of DME**. Amsterdam, 2006. 23rd World Gas Conference. Disponível em: <<http://www.igu.org/html/wgc2006/pdf/paper/add10696.pdf>>. Acesso em: 10 março 2010.

BURTON, Elizabeth; FRIEDMANN, Julio; UPADHYE, Ravi. **Best Practices in Underground Coal Gasification**. Lawrence Livermore National Laboratory, Califórnia, 2006. Disponível em: <<http://www.purdue.edu/discoverypark/energy/assets/pdfs/cctr/BestPracticesinUCG-draft.pdf>>. Acesso em: 27 agosto 2010.

CAMARGO, André Moreira de. **Inventário do ciclo de vida do metanol para as condições brasileiras**. São Paulo. 2007. 117p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, Brasil.

CANADELL, Josep G. et al. Contributions to Accelerating Atmospheric CO₂ Growth from Economic Activity, Carbon Intensity, and Efficiency of Natural Sinks. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 104, p. 18866-18870, 2007. Disponível em: <<http://www.pnas.org/content/104/47/18866.full.pdf+html>>. Acesso em: 7 novembro 2011.

CANO, Telma Monreal. In: **Economia Mineral do Brasil**. Mineração de Energia – Carvão Mineral. Porto Alegre: DNPM, 2009. p. 51-69. Disponível em: <https://sistemas.dnmp.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=3970>. Acesso em: 1 dezembro 2011.

CHAIKEN, Robert F.; MARTIN, Joseph W. In: **SME Mining Engineering Handbook**. In Situ Gasification and Combustion of Coal. California, 1992, v. 2, p. 1954-1970.

COLLOT, Anne-Gaëlle. Matching Gasification Technologies to Coal Properties. **International Journal of Coal Geology**, v. 65, p.191– 212, 2006.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Matriz energética: cenários, oportunidades e desafios CNI**. Brasília : CNI, 2007. 82 p. : il. Disponível em: <<http://www.cni.org.br/portal/data/files/8A9015D015A0F71F0115AE4B9A37466D/Matriz%20Energ%C3%A9tica.pdf>>. Acesso em: 26 julho 2010.

DAGGUPATI, Sateesh et al. Compartment Modeling for Flow Characterization of Underground Coal Gasification Cavity. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 50, p. 277-290, 2011.

EARTH SYSTEM RESEARCH LABORATORY. **Annual Greenhouse Gas Index 2008**. 2009. Disponível em: <http://www.esrl.noaa.gov/news/quarterly/summer2009/2008_greenhouse_gas_index.html>. Acesso em: 10 novembro 2011.

EARTH SYSTEM RESEARCH LABORATORY. **Trends in Atmospheric Carbon Dioxide**. 2011. Disponível em: <<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/mlo.html>>. Acesso em: 30 março 2012.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Brasil). **Balanzo Energético Nacional 2011: Ano base 2010**. Rio de Janeiro: EPE, 2011. 266 p. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2011.pdf>. Acesso em: 24 novembro 2011.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Brasil). **Plano Nacional de Energia 2030**. Geração Termelétrica – Carvão Mineral. Brasília: EPE, 2007. 145 p.

Disponível em:

<http://www.epe.gov.br/PNE/20080512_6.pdf>. Acesso em: 24 novembro 2011.

ESKOM. **Eskom's Underground Coal Gasification Project**, 2008. Disponível em:

<http://ec.europa.eu/energy/international/bilateral_cooperation/doc/south_africa/eskom.pdf>. Acesso em: 20 dezembro 2011.

FAIRLEY, Peter. Exploiting China's Coal While It's Still Underground. **Technology Review**, 2011. Disponível em:

<<http://www.technologyreview.com/energy/37999/?mod=chfeatured#>>. Acesso em: 20 outubro 2011.

FERNANDES, Iolanda Dill ; MERGEL, Norma M. Duarte ; SÁNCHEZ, Josete C. D. In: **Meio ambiente e carvão: impactos da exploração e utilização**. Amostragem e caracterização físico-química. Porto Alegre: FEPAM, 2002. p.175-210.

FERREIRA FILHO, José de Castro. **Sistema para determinação de penalidades para desvios de especificações em contratos de compra de carvões siderúrgicos**. Rio de Janeiro. 2007. 104p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brasil. Disponível em: <http://www2.dbd.pucRio.br/pergamum/tesesabertas/0511101_07_cap_02.pdf>.

Acesso em: 31 agosto 2010.

FOSTER, Maria das Graças Silva; ARAÚJO, Symone Christine de S.; SILVA, Mário Jorge. In: **Seminários Temáticos para a 3ª Conferência Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação**. Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil. Brasília, 2005, v. 1, p. 795-820. Disponível em:

<http://www.cgee.org.br/arquivos/p_20_2.pdf>. Acesso em: 3 março 2011.

FRIEDMANN, Julio. In: **Coal Without Carbon: An Investment Plan for Federal Action**. Accelerating Development of Underground Coal Gasification: Priorities and Challenges for U.S. Research and Development. Boston, 2009, p. 1-16.

GAS TECH. **Viability of Underground Coal Gasification in the “Deep Coals” of the Powder River Basin, Wyoming**. Wyoming Business Council: Business and Industry Division State Energy Office. Wyoming, 2007.

GEROSA, Tatiana Magalhães. **O estudo da utilização do gás natural como insumo para a indústria química e petroquímica: modelagem de uma planta gás-química**. São Paulo. 2007. 155p. Dissertação (Mestrado em Energia). Universidade de São Paulo, Brasil.

GOMES, Aramis J. Pereira et. al. Carvão Fóssil. **Estudos Avançados**, São Paulo v. 12, nº.33, Maio/Ago. 1998. Disponível em:
<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S010340141998000200006>
Acesso em: 9 novembro 2010.

GOMES, Aramis J. Pereira; CRUZ, Paulo Roberto; BORGES, Lindemberg Pinheiro. In: **Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil : texto, mapas & SIG**. Recursos Minerais Energéticos: Carvão e Urânio. Brasília: CPRM, 2003. p. 577-628.

GOMES, Maria de L. Ilha. **Avaliação da viabilidade técnica da utilização de misturas do carvão Faxinal com importados para injeção em altos-fornos**. Rio Grande do Sul. 2004. 111p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

HEEMANN, Roberto et al. **Produção de Gás (CBM/ECBM/UCG) Associado ao Armazenamento Geológico de CO₂ (CCGS) em Bacias Carboníferas Brasileiras**, 2009. Disponível em: <<http://www.ecoclima.org.br:80>>. Acesso em: 30 agosto 2010.

HETHERINGTON, James; THAMBIMUTHU, Kelly. In-Situ Gasification, Enhanced Methane Recovery and CO₂ Storage in Deep Coal Seams. **Greenhouse Gas Control Technologies**, v. 1, p. 709-716, 2003.

INDIANA UNIVERSITY. School of Public and Environmental Affairs. **Viability of Underground Coal Gasification with Carbon Capture and Storage in Indiana**, 2011. Disponível em:

<<http://www.indiana.edu/~cree/pdf/Viability%20of%20Underground%20Coal%20Gasification%20Report.pdf>>. Acesso em: 3 janeiro 2012.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Cambridge, 2007.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage**. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Cambridge, 2005.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **CO₂ Emissions from Fuel Combustion: Highlights**, 2011a. Disponível em:

<<http://www.iea.org/co2highlights/co2highlights.pdf>>. Acesso em: 9 novembro 2011.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **International Energy Outlook**, 2011b. Disponível em: <[http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484\(2011\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484(2011).pdf)>. Acesso em: 7 novembro 2011.

KEMPKA, T. et al. CO₂SINUS: CO₂ Storage in *in situ* gasified coal seams. In: **1º Simpósio Brasileiro de Geração Não-Convencional de Energia a partir de Carvão e Hidratos de Gás e 2º Workshop de Produção Regional de Combustíveis Limpos a partir do Carvão no Rio Grande do Sul**. 2010, Porto Alegre.

KETZER, J. Marcelo; IGLESIAS, Rodrigo; EINLOFT, Sandra. Reducing Greenhouse Gas Emissions with CO₂ Capture and Geological Storage. **Springer Science+Business Media, LLC**, v. 41, p. 1- 37, 2011.

KHADSE, Anil et al. Underground Coal Gasification: A New Clean Coal Utilization Technique for India. **Energy**, v. 32, p. 2061-2071, 2007.

LAUBACH, S. E. et al. Characteristics and origins of coal cleat: A review. **International Journal of Coal Geology**, v. 35, p. 175–207, 1998.

LEVINE, Duane G.; SCHLOSBERG, Richard H.; SILBERNAGEL, Bernard G. Understanding the chemistry and physics of coal structure (A Review). **Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA**, v. 79, p. 3365-3370, 1982.

Disponível em:

<<http://www.pnas.org/content/79/10/3365.full.pdf+html>>. Acesso em: 21 julho 2010.

LICKS, Letícia A. dos Santos. **Avaliação do Processo de Captura de Dióxido de Carbono por Absorção Química Visando a Aplicação em Termelétricas a Carvão no Brasil**. Porto Alegre. 2008. 96p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais). Faculdade de Engenharia Química, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Brasil.

LIMA, Paulo César Ribeiro. **Fábrica de Fertilizantes Nitrogenados e Produção de Etanol no Norte Fluminense**. Câmara dos Deputados. Brasília, 2007. Disponível em:<http://bd.camara.gov.br/bd/bitstream/handle/bdcamara/1341/fabrica_fertilizantes_lima.pdf?sequence=1>. Acesso em: 1 março 2011.

MACHADO, Janaína G. Maria da Silva. **Estudo de reatividade e combustão de carvões minerais, carvão vegetal e misturas**. Rio Grande do Sul. 2009. 212p. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

MASTALERZ, Maria et al. **Site Evaluation of Subsidence Risk, Hydrology, and Characterization of Indiana Coals for Underground Coal Gasification (UCG).**

Center for Coal Technology Research, 2011. Disponível em:

<http://www.purdue.edu/discoverypark/energy/assets/pdfs/cctr/researchReports/IGS-March2011_finalReport/FINAL%20REPORT.pdf>. Acesso em: 4 janeiro 2011.

MAZZOTTI, Marco; PINI, Ronny; STORTI, Giuseppe. Enhanced Coalbed Methane Recovery. **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 47, p. 619-627, 2009.

METHANOL INSTITUTE. **DME: An Emerging Global Fuel.** 2011. Disponível em:<<http://www.methanol.org/Energy/Transportation-Fuel/DME-Emerging-Global-Fuel.aspx>>. Acesso em: 10 março 2011.

NATIONAL ENERGY TECHNOLOGY LABORATORY - NETL. [2010]. Disponível em:<http://www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/gasification/gasifipedia/4-gasifiers/4-1-4-6_underground.html>. Acesso em: 23 novembro 2010.

NUNES, Keila G. P.; RECH, René L.; MARCÍLIO, Nilson R. **Avaliação preliminar do comportamento de *char* do carvão do Leão em termobalança para determinação da reatividade ao CO₂.** In: X Oktoberfórum, Porto Alegre: Seminário do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, UFRGS, 2011, p.1-6.

POHLMANN, Juliana G. **Avaliação da reatividade ao CO₂ de *chars* obtidos em atmosfera convencional (O₂/N₂) e de oxi-combustão (O₂/CO₂) com vistas à aplicação no alto-forno.** Rio Grande do Sul. 2010. 99p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

RAMOS, André Luis Dantas et al. Atual Estágio de Desenvolvimento da Tecnologia GTL e Perspectivas para o Brasil. **Química Nova**, v. XY, p. 1-13, 2011. Disponível em: <<http://quimicanova.sbq.org.br/qn/No%20Prelo/RV/RV10822.pdf>>. Acesso em: 21 setembro 2011.

REDMAN, Eric; FENERTY, Kelly; FOWLER, Mike. In: **Coal Without Carbon: An Investment Plan for Federal Action**. Mobilizing Next Generation Coal Gasification Technology for Carbon Capture and Sequestration. Boston, 2009, p. 17- 36.

REDIVO, Rosimeri Venâncio. **Caracterização Tecnológica do Carvão das Camadas Barro Branco e Bonito para fins Energéticos na Região de Criciúma – SC**. São Paulo. 2002. 95p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, Brasil.

RIGOTTI, Nilo Antônio. In: **Meio ambiente e carvão: impactos da exploração e utilização**. Recuperação de Áreas Degradadas: Estudo de Caso. Porto Alegre: FEPAM, 2002. p.99-113.

SCHIFINO, José. **Determinação da reatividade do carvão utilizado no processo de redução direta da aços finos Piratini**. Rio Grande do Sul. 1977. 77p. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Materiais). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

SHAFIROVICH, Evgeny; VARMA, Arvind. Underground Coal Gasification: A Brief Review of Current Status. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 48, p. 7865-7875, 2009.

SHU-QIN, Liu et al. Groundwater Pollution from Underground Coal Gasification. **Journal of China University of Mining & Technology**, v. 17, p. 0467-0472, 2007.

SILVA, Elton C. da; PAOLA, Maria Valéria R. V. de; MATOS, Jivaldo do R. Análise térmica aplicada à cosmetologia. **Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas**, v. 43, n. 3, p. 347- 356 2007.

SOUZA, Malen Cristi dos S. de et al. **DME, o Combustível do Futuro?** Instituto Nacional de Tecnologia, Rio de Janeiro, [2006]. Disponível em: <http://biblio.int.gov.br/phi82/INT_DOCELE/SIMEA.pdf>. Acesso em: 15 setembro 2011.

STACH, E. et al. In: **Coal Petrology**. Fundamentals of coal petrology. Berlin, 1982, p. 5-218.

SURY, Martin et al. **Review of Environmental Issues of Underground Coal Gasification**. Birmingham: WS Atkins Consultants Ltd, 2004. 144p.

UCG ASSOCIATION. [2012a]. Disponível em:

<http://www.ucgassociation.org/index.php?option=com_content&view=article&id=70&Itemid=219>. Acesso em: 13 janeiro 2012.

UCG ASSOCIATION. [2012b]. Disponível em:

<http://www.ucgassociation.org/index.php?option=com_content&view=article&id=72&Itemid=221>. Acesso em: 13 janeiro 2012.

WALTER, Katie. Fire in the Hole. **Science & Technology Review**. Lawrence Livermore National Laboratory, California, 2007. Disponível em: <<https://www.llnl.gov/str/April07/Friedmann.html>>. Acesso em: 22 fevereiro 2011.

WESTBLADE, Dierdre. **Underground Coal Gasification Projects**. Hungria: CSA Global, 2011. 70p.

WORLD COAL INSTITUTE. **Coal Meeting the Climate Challenge: Technology to Reduce Greenhouse Gas Emissions**. United Kingdom, 2007. Disponível em:

<[http://www.worldcoal.org/bin/pdf/original_pdf_file/coal_climate_change_css_report\(03_06_2009\).pdf](http://www.worldcoal.org/bin/pdf/original_pdf_file/coal_climate_change_css_report(03_06_2009).pdf)>. Acesso em: 27 setembro 2010.

YOON, Sang Jun et al. Thermogravimetric study of coal and petroleum coke for co-gasification. **Korean Journal of Chemical Engineering**, v. 24, p.512-517, 2007.

ZAMZOW, Kendra L. **Underground Coal Gasification: history, environmental issues, and the proposed project at Beluga, Alaska**. Center for Science in Public Participation, 2010. Acesso em:

<<http://www.groundtruthtrekking.org/Documents/UCG/UCG-KZamzow-2010.pdf>>.

Acesso em: 7 fevereiro 2012.

ZIELENIEWSKI, M.; BRENT, A. C. Evaluating the costs and achievable benefits of extending technologies for uneconomical coal resources in South Africa: the case of underground coal gasification. **Journal of Energy in Southern Africa**, v. 19, p. 21-31, 2008.