

José Ricardo Lemes de Almeida

**ARMAZENAMENTO DE DIÓXIDO DE CARBONO EM CAMADAS DE
CARVÃO NA BACIA DO PARANÁ: DESENVOLVIMENTOS E
PERSPECTIVAS FUTURAS NO BRASIL**

Universidade Fernando Pessoa

Porto, 2019

José Ricardo Lemes de Almeida

**ARMAZENAMENTO DE DIÓXIDO DE CARBONO EM CAMADAS DE
CARVÃO NA BACIA DO PARANÁ: DESENVOLVIMENTOS E
PERSPECTIVAS FUTURAS NO BRASIL**

Universidade Fernando Pessoa

Porto, 2019

José Ricardo Lemes de Almeida

**ARMAZENAMENTO DE DIÓXIDO DE CARBONO EM CAMADAS DE
CARVÃO NA BACIA DO PARANÁ: DESENVOLVIMENTOS E
PERSPECTIVAS FUTURAS NO BRASIL**

Atesto a originalidade do trabalho

Tese apresentada à Universidade Fernando Pessoa como parte dos requisitos para obtenção do grau de Doutor em Ciências da Terra (Especialidade: Risco Geológico, Gases de Estufa e Sequestração Geológica de CO₂), sob a orientação do Professor Doutor Manuel João Lemos de Sousa e coorientação da Doutora Cristina Fernanda Alves Rodrigues e do Doutor Edmilson Moutinho dos Santos (Instituto de Energia e Meio Ambiente – IEE USP).

ÍNDICE

ÍNDICE	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	X
ÍNDICE DE TABELAS	XIV
ÍNDICE DE ANEXOS	XVI
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	XVII
RESUMO	XXI
ABSTRACT	XXIII
AGRADECIMENTOS	XXV
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
Objetivos.....	7
CAPÍTULO 2 – MUDANÇAS CLIMÁTICAS: AS TECNOLOGIAS CCS COMO SOLUÇÃO NA SUA MITIGAÇÃO.....	9
CAPÍTULO 3 – TECNOLOGIAS CCS	19
3.1. Captação de CO ₂	21
3.2. Transporte de CO ₂	26
3.3. Armazenamento de CO ₂	27
3.4. Utilização de CO ₂	33
3.5. Armazenamento de CO ₂ em Camadas de Carvão	35
3.6. Aplicações das Tecnologias CCS	40
3.6.1. Contexto Mundial	41
3.6.2. Contexto Brasileiro	47
CAPÍTULO 4 – O CARVÃO NO MUNDO E NO BRASIL	53
4.1. No Mundo.....	53

4.1.1. Demanda	55
4.1.2. Oferta	59
4.2. Contexto Brasil	62
4.2.1. Demanda do Carvão Mineral Doméstico.....	64
4.2.2. Reservas e Oferta do Carvão Mineral Doméstico	68
4.3. Perspectivas Futuras	74
CAPÍTULO 5 – ENQUADRAMENTO REGIONAL DA BACIA DO PARANÁ.....	77
5.1. Introdução.....	77
5.2. Localização.....	77
5.3. Caracterização Geológica.....	79
5.3.1. Estratigrafia.....	79
5.3.2. Formação dos Ambientes Depositionais.....	83
5.4. Carvão gonduânico de Santa Catarina.....	85
CAPÍTULO 6 – MATERIAL E TÉCNICAS DE ANÁLISES	89
6.1. Introdução.....	89
6.2. Amostragem	89
6.3. Técnicas de análise	94
Análises Químicas	94
Análise Imediata	94
Análise Elementar.....	95
Fluorescência de Raios-X.....	95
Ensaio Físico-Químico e Geoquímicos	95
Poder Calorífico Superior	95
Carbono Orgânico Total (COT).....	96
Pirólise (Rock Eval).....	96
Estudos Petroológicos	97
Determinação da Composição Petrográfica.....	97

Avaliação Óptica da Maturação	98
Estudo Palinológico	99
Determinação das Isotérmicas de Sorção	100
6.4 Resultados Analíticos em Diferentes Bases	102
CAPÍTULO 7 – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	103
7.1. Introdução	103
7.2. Resultados.....	104
Análises Químicas	104
Ensaio Físico-Químico e Geoquímico	106
Estudos Petrológicos.....	107
Estudo Palinológico	110
7.3. Classificação dos carvões segundo a Norma ASTM D388-15 e a Norma ISO 11760:2005	112
7.4. Determinação e Interpretação das Isotérmicas de Langmuir.....	116
CAPÍTULO 8 – CONCLUSÕES	121
CAPÍTULO 9 - TRABALHOS FUTUROS	125
REFERÊNCIAS	127

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução histórica e previsões do balanço energético global (Rodrigues 2018).	1
Figura 2 - Relação entre energia, população e PIB mundiais, The Institute of Energy Economics, Japan (IEEJ 2016).	2
Figura 3 - Balanço energético mundial em 1990, 2015 e 2040 (Sokolov 2016).	3
Figura 4 - Emissões totais no Brasil por setor (2000-2016) (SEEG 2018).	6
Figura 5 - Ciclos de Milankovitch: obliquidade ou inclinação (T), mudanças na excentricidade (E) e precessão (P). (Solomon et al. 2007).	9
Figura 6 - Gráfico das glaciações em relação a variação de temperatura global com milhares de anos (Rodrigues e Lemos de Sousa 2019).	10
Figura 7 - Correlação entre duração cíclica, em milhares de anos, com a variação de temperatura. Os Datums, linha vermelha, representam as variações abruptas que dividem as glaciações das interglaciações (Rodrigues e Lemos de Sousa 2019).	11
Figura 8 - Variação da temperatura em relação a irradiação solar no período de 40 anos (Rodrigues e Lemos de Sousa 2019).	12
Figura 9 - Variação da temperatura em relação à concentração de CO ₂ no período de 800 milhares de anos (National Centers for Environmental Information - NOAA 2019).	12
Figura 10 - Esquema da técnica de captação pós-combustão (Modificado de ESRU 2019).	22
Figura 11 - Esquema da técnica de captação de CO ₂ por oxi-combustão (Modificado de ESRU 2019).	23
Figura 12 - Esquema da técnica de captação de CO ₂ pré-combustão (Modificado de ESRU 2019).	25

Figura 13 – Diminuição das emissões de CO ₂ – estado da arte (Modificado de Rodrigues et al. 2015).	28
Figura 14 – Variação da densidade do CO ₂ em função da profundidade, assumindo pressão hidrostática e gradiente geotérmico de 25°C/km e temperatura superficial de 15°C. A densidade do dióxido de carbono aumenta significativamente a aproximadamente 800 m de profundidade, quando o CO ₂ passa para o estado supercrítico. Os cubos representam o volume relativo ocupado pelo CO ₂ . Em profundidades inferiores a 1,5 km, a densidade mantém-se praticamente constante (Modificado de Metz et al. 2005).	31
Figura 15 – A segurança de armazenamento depende da combinação de diversos mecanismos de aprisionamento (Modificado de Metz et al. 2005).	32
Figura 16 – Potenciais rotas de utilização do CO ₂ (Modificado de Rodrigues et al. 2015).	34
Figura 17 – Representação esquemática do sistema de fraturas (<i>cleat system</i>) e da matriz do carvão (ilustrado por meio de blocos), e da direção de fluxo dos fluidos presentes no sistema (Busch e Gensterblum 2011).	38
Figura 18 – Capacidade de armazenamento de um reservatório de carvão (reservatório não convencional) versus reservatório convencional (Modificado de Rodrigues e Lemos de Sousa 2008).	39
Figura 19 - Projetos CCS no mundo (Global CCS Institute 2019b).	46
Figura 20 – Bacias sedimentares brasileiras classificadas de acordo com o potencial de armazenamento de CO ₂ (Ketzer et al. 2015).	50
Figura 21 – Localização de depósitos de carvão mineral nos Estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul (Kalkreuth et al. 2008).	51
Figura 22 – Consumo mundial de energia primária por ano. Modificado de BP 2018.	56
Figura 23 – Consumo mundial de carvão por utilização final em dois períodos. Os valores não especificados são relacionados com a indústria, transporte entre outros (valores em Mtec) (Modificado de IEA 2018b).	57
Figura 24 – Consumo mundial de carvão (Mtec) (IEA 2018a).	57

Figura 25 – Composição da energia primária em 2016-2017, representando as principais fontes primárias (petróleo, carvão, gás natural, energia nuclear e energias renováveis) e quatro níveis de consumo: Mundo, OCDE, União Europeia e Brasil.	59
Figura 26 – Foto da Mina Lauro Muller, Santa Catarina, Brasil, onde a extração do carvão é realizada pela construção de túneis.	60
Figura 27 – Produção mundial de carvão por região (IEA 2018a).	61
Figura 28 – Consumo de energia no Brasil por fonte, entre 1970 e 2009. Sendo (a) índices de fontes de conteúdo com baixas emissões de dióxido de carbono e (b) fontes de alta emissões de dióxido de carbono. (Modificado de Freitas e Kaneko 2011).	62
Figura 29 – Matriz elétrica brasileira (EPE 2018b).	63
Figura 30 – Vendas de carvão por setor de consumo brasileiro para o ano de 2008. Fonte relatórios estatísticos da Associação Brasileira de Carvão Mineral (ABCM 2017).	65
Figura 31 – Consumo brasileiro de carvão. (CGEE 2012).	68
Figura 32 – Localização das principais jazidas de carvão do Brasil, destacando os estados de São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul (Corrêa da Silva 1989).	71
Figura 33 – Mapa da localização da Bacia do Paraná (Silva et al. 2006).	78
Figura 34 – Bacia do Paraná dividida, estratigraficamente, nas supersequências Rio Ivaí, Paraná, Gondwana I, Gondwana II, Gondwana III e Bauru (Milani et al. 2004).	80
Figura 35 – Coluna estratigráfica da Bacia do Paraná (Milani et al. 2007).	81
Figura 36 – Estratigrafia da Sequência Gondwana I (Santos et al. 2006).	82
Figura 37 – Locais de deposição que deram origem aos depósitos de carvão no Permiano do Sul do Brasil (Marques-Toigo e Corrêa da Silva 1984).	84
Figura 38 – Mapa com a localização geográfica das amostras coletadas (Pereira et al. 2019).	90
Figura 39 – Afloramento do ponto CR1.	90
Figura 40 – a) Foto do afloramento do ponto CR4; b) escavadeira retirando a camada intemperizada do afloramento.	91
Figura 41 – Lavra subterrânea do ponto CR5.	92

Figura 42 - Amostragem do ponto CR6.	92
Figura 43 - Tabela relacionando as análises de reflectância de vitrinite (%Ra), Índice de Alteração Térmica (IAT) e Fluorescência com o grau de incarbonização da matéria orgânica.	98
Figura 44 - Isotermas de sorção realizadas nas amostras CR2, CR5 e CR7.	117
Figura 45 - Isotermas de sorção realizadas nas amostras CR1, CR3, CR4 e CR6.	118

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Características de alguns importantes parâmetros geológicos em reservatórios convencionais e não convencionais (Modificado de Rodrigues et al. 2015).....	36
Tabela 2 – Projetos de CCS de larga escala no mundo atualmente em operação (Global CCS Institute 2019b).	44
Tabela 3 – Usinas termelétricas a carvão operantes no Brasil (ANEEL, 2019).	66
Tabela 4 – Reserva de carvão no Sul do Brasil. DNPM (2016), Branco (2014) e Tolmasquim (2016).	70
Tabela 5 – Características dos carvões brasileiros (SATC 2014 e Tolmasquim 2016).	73
Tabela 6 – Subdivisão da Supersequência Gondwana I.....	83
Tabela 7 – Dados das amostras coletadas.	93
Tabela 8 – Resultados das Análises Imediatas das camadas Bonito e Barro Branco (Formação Rio Bonito).	104
Tabela 9 – Resultados das Análises Elementares das camadas Bonito e Barro Branco.	105
Tabela 10 – Resultados da análise de Fluorescência de raios-X para as camadas Bonito e Barro Branco.	106
Tabela 11 – Valores do Poder Calorífico Superior.	106
Tabela 12 – Resultados das análises de COT e Pirólise (Rock Eval) das camadas Bonito e Barro Branco.	107
Tabela 13 – Quantidade de macerais para as camadas Bonito e Barro Branco.	109
Tabela 14 – Resultados das análises ópticas de maturação das camadas Bonito e Barro Branco.	110

Tabela 15 – Resultado da análise dos grupos de palinomorfos das camadas Bonito e Barro Branco, em frequência relativa de grupos de palinomorfos nas amostras estudadas (em %).	111
Tabela 16 – Classificação das amostras Tal-Qual de carvão de acordo com a Norma ASTM.	113
Tabela 17 – Classificação das amostras Tal-Qual de carvão de acordo com a Norma ISO.	114
Tabela 18 – Classificação das amostras Lavada de carvão de acordo com a Norma ASTM.	115
Tabela 19 – Classificação das amostras Lavada de carvão de acordo com a Norma ISO.	116
Tabela 20 – Resultados de sorção/dessorção de gás para as amostras das camadas Bonito e Barro Branco, a pressão de 400 psi.....	117

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 – Material amostrado Tal-Qual – Relatórios de Análises Imediatas/Elementares e Poder Calorífico

Anexo 2 – Material amostrado lavado na fração <1,35 – Relatórios de Análises Imediatas/Elementares e Poder Calorífico

Anexo 3 – Material amostrado Tal-Qual – Relatórios da determinação da Análise Química das cinzas por espectrometria de fluorescência de raios X e espectrometria de absorção atômica

Anexo 4 – Material amostrado lavado na fração <1,35 – Relatórios da determinação da Análise Química das cinzas por espectrometria de fluorescência de raios X e espectrometria de absorção atômica

Anexo 5 – Material amostrado Tal-Qual – Relatórios da Análise Petrográfica: Poder Refletor da vitrinite e Composição Petrográfica

Anexo 6 – Material amostrado Tal-Qual – Relatórios da Geoquímica Orgânica: COT (Carbono Orgânico Total) e Pirólise (Rock-Eval)

Anexo 7 – Resultados dos estudos Palinológicos

Anexo 8 – Material amostrado Tal-Qual – Relatórios dos Ensaios de Isotérmicas de Sorção

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABCM	Associação Brasileira de Carvão Mineral
AGGG	<i>Advisory Group on Greenhouse Gases</i> (Grupo Consultivo sobre Gases com Efeito de Estufa)
BECCS	<i>Bio-Energy with Carbon Capture and Storage</i> (Bio-energia com captação e armazenamento de dióxido de carbono)
BEN	Balanco Energético Nacional
BP	<i>British Petroleum</i>
CBM	<i>Coal Bed Methane</i> (Metano do Carvão em Camada)
CCS	<i>Carbon Capture and Storage</i> (Captação e Armazenamento de Dióxido de carbono)
CCUS	<i>Carbon Capture, Utilization and Storage</i> (Captação, Utilização e Armazenamento de Dióxido de carbono)
CEPAC	Centro de Excelência em Pesquisa e Inovação em Petróleo, Recursos Minerais e Armazenamento de Carbono
CIMA	Centro de Investigação Marinha e Ambiental
CECMEE	Comissão Especial do Carvão Mineral e da Energia Eólica
COP	<i>Conference of Parties</i> (Conferência das Partes)
COT	Carbono Orgânico Total
CQNUAC	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Alterações Climáticas
CSLF	<i>Carbon Sequestration Leadership Forum</i> (Fórum de Liderança de Sequestro de Dióxido de carbono)
EASAC	<i>European Academies Science Advisory Council</i> (Conselho Consultivo Europeu para as Ciências das Academias)
ECBM	<i>Enhanced Coal Bed Methane Recovery</i> (Recuperação Avançada de Metano do Carvão em Camada)
EGR	<i>Enhanced Gas Recovery</i> (Recuperação Avançada de Gás)
EIA	<i>United States Energy Information Administration</i> (Administração de Informações sobre Energia dos Estados Unidos)
EOR	<i>Enhanced Oil Recovery</i> (Recuperação Avançada de Petróleo)
EPE	Empresa de Pesquisa Energética

ESRU	<i>Energy Systems Research Unit</i> (Unidade de Pesquisa de Sistemas de Energia)
EUA	Estados Unidos da América
FPSO	<i>Floating Production, Storage and Offloading</i> (Unidades Flutuantes de Armazenamento e Transferência)
GARP	<i>Global Atmospheric Research Program</i> (Programa de Pesquisas Atmosféricas Globais)
GCCSI	<i>Global CCS Institute</i> (Instituto Global de Carbon Capture Storage)
GEE	Gases com Efeito de Estufa
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GNL	Gás Natural Liquefeito
HVBC	<i>High Volatile Bituminous Coal</i> (Carvão Betuminoso Altamente Volátil)
ICCP	<i>International Committee for Coal and Organic Petrology</i> (Comitê Internacional para Carvão e Petrologia Orgânica)
ICMS	Imposto sobre Operações relativas à Circulação de Mercadorias e Prestação de Serviços de Transporte Interestadual e Intermunicipal e de Comunicação
IAT	Índice de Alteração Térmica
IEA	<i>International Energy Agency</i> (Agência Internacional de Energia)
IEAGHG	<i>International Energy Agency Greenhouse Gas R&D Programme</i> (Programa de P&D sobre Gases do Efeito Estufa da Agência Internacional de Energia)
INDC	<i>Intended Nationally Determined Contributions</i> (Contribuições Pretendidas Nacionalmente Determinadas)
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas)
IPR	Instituto do Petróleo e dos Recursos Naturais
LAEC	Laboratório de Análises e Ensaio de Carvão
LNEG	Laboratório Nacional de Energia e Geologia
OCDE	Organização de Cooperação e Desenvolvimento Econômico
ONU	Organização das Nações Unidas
PDE	Plano Decenal de Expansão de Energia
PIB	Produto Interno Bruto
PR	Paraná
PUCRS	Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
RCGI	<i>Research Center for Gas Innovation</i> (Centro de Pesquisa em Inovação de Gás)
RS	Rio Grande do Sul

SATC	Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina
SC	Santa Catarina
SIN	Sistema Interligado Nacional
TAI	<i>Thermic Alteration Index</i> (Índice de Alteração Térmica)
UERJ	Universidade Estadual do Rio de Janeiro
UF	Unidade de Federação
UFP	Universidade Fernando Pessoa
UH	Umidade Higroscópica
UNEP	<i>United Nations Environment Programme</i> (Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente)
WMO	<i>World Meteorological Organization</i> (Organização Meteorológica Mundial)

RESUMO

Armazenamento de Dióxido de carbono em Camadas de Carvão na Bacia do Paraná: Desenvolvimentos e Perspectivas Futuras no Brasil

JOSÉ RICARDO LEMES DE ALMEIDA

(Tese de doutoramento sob orientação do Professor Doutor Manuel João Lemos de Sousa e coorientação da Doutora Cristina Fernanda Alves Rodrigues e do Doutor Edmilson Montinho dos Santos - IEE USP)

O presente trabalho discute o cenário mundial sobre o aquecimento global e seus efeitos políticos na adoção de tecnologias de mitigação de emissão de gases com efeito de estufa.

A crescente atenção com os efeitos das mudanças climáticas, especialmente a partir da década de 1990, tem gerado demandas por parte dos governos e blocos econômicos no sentido de limitar as emissões de gases com efeito de estufa, especialmente o dióxido de carbono. Sendo o setor energético responsável por parte significativa dessas emissões, as novas tecnologias de mitigação e/ou baixas emissões são incluídas no contexto dessa transição energética. Nesse sentido, tanto a Organização das Nações Unidas (ONU), no Acordo de Paris, em 2015, quanto a Comissão Europeia, nos documentos *European 2020 Energy and Environmental Plan (2007)*; *Energy Roadmap 2050 (2011)*; *2030 Energy Strategy (2014)*, orientam a adoção de tecnologias de captação e armazenamento de CO₂ (CCS) para o cumprimento da meta de limitar o aumento da temperatura média global em 1,5°C em relação aos níveis pré-industriais.

A sequestração geológica de dióxido de carbono (CO₂) pode representar um armazenamento eficiente e seguro a longo prazo deste gás com efeito de estufa. Quando aplicada ao carvão, a injeção de CO₂ pode também favorecer a extração de metano da camada de carvão.

Dentro do cenário exposto, o presente trabalho objetivou contribuir com o estudo das características do carvão brasileiro da Bacia do Paraná, mais especificamente da Mina de Santa Catarina, camadas Bonito e Barro Branco, Formação Rio Bonito, na região de Criciúma, visando o estudo de sua potencial utilização como reservatório geológico de CO₂. Essa área foi escolhida devido à importância histórica do carvão na região e da necessidade de averiguar a viabilidade desse recurso para uma finalidade adicional no contexto da transição energética. Desta maneira, acredita-se que a determinação desse potencial abre um novo caminho de aproveitamento deste recurso fóssil, hoje praticamente exclusivo para fins termelétricos.

Para estimar o potencial de armazenamento de CO₂, a caracterização das amostras é baseada em dados de geoquímica orgânica, petrologia, petrografia, palinologia e isotermas de sorção, obtidos a partir de sete amostras de carvão.

Os resultados obtidos indicam que os carvões da Formação de Rio Bonito, das camadas Barro Branco e Bonito, são adequados para o armazenamento de CO₂. As amostras Tal-Qual analisadas são classificadas como:

- Classificação ASTM D 388-15

As amostras CR-5 e CR-7 como Carvão betuminoso medianamente volátil e, todas as restantes, como Carvão betuminoso altamente volátil A.

- Classificação ISO 11760:2005

Todas as amostras como: Grau de carbonificação – Carvão betuminoso C; Composição Petrográfica – Vitrinite variável (entre alta a baixa); Categoria – Cinzas altas (seis amostras) e moderadamente altas (amostra CR-6).

Além disso, dentre as amostras estudadas, a maior capacidade de armazenamento de CO₂ é atribuída à amostra CR6, da camada de Barro Branco, com 275 scf/ton (7,79 m³/t) de CO₂ armazenado a 400 psi. Esses resultados indicam que as tecnologias CCS podem fazer parte da estratégia do Brasil para reduzir sua contribuição nas emissões de gases com efeito de estufa.

ABSTRACT

Carbon Dioxide Storage on Paraná's Basin Coal Seams: Developments and Future Perspectives in Brazil

JOSÉ RICARDO LEMES DE ALMEIDA

(PhD thesis supervised by Prof. Dr. Manuel João Lemos de Sousa and co-supervised by Doutora Cristina Fernanda Alves Rodrigues and Doutor Edmilson Moutinho dos Santos - IEE USP)

This thesis discusses the world scenario about global warming and its political effects on the adoption of greenhouse gas mitigation technologies.

Increasing attention to the effects of climate change, especially since the 1990s, has led to demands from governments and economic blocs to limit greenhouse gas emissions, especially carbon dioxide. As the energy sector is responsible for a significant part of these emissions, new mitigation and / or low emission technologies are included in the context of this energy transition. In this regard, both the United Nations (UN) in the Paris Agreement in 2015 and the European Commission in the European 2020 Energy and Environmental Plan (2007) documents; Energy Roadmap 2050 (2011); 2030 Energy Strategy (2014), guide the adoption of CO₂ capture and storage (CCS) technologies to meet the goal of limiting the global average temperature increase by 1.5°C from pre-industrial levels.

Geological sequestration of carbon dioxide (CO₂) can represent an efficient and safe long-term storage of this greenhouse gas. When applied to coals, CO₂ injection may also enhance the coalbed methane production.

Within the exposed scenario, the present work aimed to contribute to the knowledge of the characteristics of the Brazilian coal from the Paraná Basin, specifically

from the Santa Catarina Mine, Bonito and Barro Branco layers, Rio Bonito Formation, in the Criciúma region, aiming the study of its potential use as a geological reservoir of CO₂. This area was chosen because of the historical importance of coal in the region and the need to ascertain the viability of this resource for an additional purpose in the context of the energy transition. In this way, it is believed that the determination of this potential use opens a new path of this fossil resource, today almost exclusively for thermoelectric purposes.

To estimate the CO₂ storage potential, the characterization of the samples is based on organic geochemistry, petrology, petrography, palynology and sorption isotherms' data obtained from seven coal samples.

The results obtained indicate that the Rio Bonito Formation coals, from Barro Branco and Bonito layers are adequate to CO₂ storage. The run-of-mine coal samples are classified as follows:

- Classification ASTM D 388-15

Sample CR-5 and CR-7 as medium volatile bituminous coal and all the samples as high volatile A bituminous coal.

- Classification ISO 11760:2005

All samples as: Rank – Bituminous C; Petrographic Composition – Vitrinite with great variability between high and low; Grade – high and moderately ash (six samples) and high ash (CR-6 sample).

Additionally, among the studied samples with significant CO₂ storage capacity, the sample CR6, from Barro Branco layer, is the one of largest potential, with 275 scf/ton (7.79 m³/t) of CO₂ stored at 400 psi. These results indicate that CCS technologies may integrate the Brazil's strategy to reduce its contribution to greenhouse gas emissions.

AGRADECIMENTOS

Adentrar no mundo do carvão e das tecnologias de captura e armazenamento foi, sem a menor dúvida, um grande desafio nos últimos quatro anos. Essa caminhada e a elaboração dessa tese de doutoramento não seriam possíveis sem a orientação, parceria e ajuda de diversas pessoas e instituições, para as quais deixo os meus mais profundos e sinceros agradecimentos.

Em primeiro lugar, agradeço imensamente ao meu orientador, Professor Manuel João Lemos de Sousa, da Universidade Fernando Pessoa, que abriu para mim as portas de um novo conjunto de conhecimentos e experiências na área de Ciências da Terra.

Pelo incansável apoio, pelas viagens e pelo tempo em conjunto, agradeço também à Professora Cristina Rodrigues, minha coorientadora. Sem a sua participação dificilmente essa tese teria a forma e a profundidade apresentadas.

Agradeço também ao meu coorientador Professor Edmilson Moutinho dos Santos, da Universidade de São Paulo, que não só me estimulou para iniciar o doutoramento em Portugal, como também me acompanhou durante todo o processo, com sugestões, conselhos e revisões.

Tão importante quanto o apoio acadêmico recebido pelas Universidade Fernando Pessoa e Universidade de São Paulo, foi o apoio do Colégio Bandeirantes. Na figura do diretor presidente e educador Mauro de Salles Aguiar, com seu olhar sempre encorajador e estimulante, agradeço toda a ajuda proveniente do Colégio, que embarcou comigo nessa nova jornada. Aos diretores Eduardo Tambor, Emerson Pereira, Estela Zanini, Helena Aguiar, Mayra Ivanoff Lora e Pedro Fregoneze, também agradeço o apoio e incentivo.

O desenvolvimento dessa tese, em especial a parte experimental, contou com a participação e aproximação de uma série de instituições e profissionais, sem os quais as etapas de coleta de amostras e de análises não seriam possíveis. Às empresas de mineração do Estado de Santa Catarina, Carbonífera Belluno Ltda., Indústria Carbonífera

Rio Deserto Ltda., Urussanga Minérios Ltda., Carbonífera Catarinense Ltda. e Carbonífera Metropolitana S/A, muito obrigado. Meus mais profundos agradecimentos ao Colombo Tassinari do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo (IEE-USP); ao Fernando Luiz Zancan e à Luciane Garavaglia da SATC (Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina); ao Marcus Ade do Laboratório de Estratigrafia Química e Geoquímica Orgânica da UERJ (Universidade Estadual do Rio de Janeiro); à Carla Araújo da UERJ; ao Paulo Fernandes do Centro de Investigação Marinha e Ambiental da Universidade do Algarve; à Zélia Pereira do Laboratório Nacional de Energia e Geologia em S. Mamede de Infesta e à Gisela Marta Oliveira e à Patrícia Moreira da Universidade Fernando Pessoa. À Patrícia Matai da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo pelo incentivo.

Meu agradecimento também ao Alberto Komoguchi, à Beatriz Araújo, ao Franco Ramunno, à Haline Rocha e ao Vitor Emanuel por me ajudarem na organização do material e me acompanharem nessa jornada.

À D. Maria Manuela Tavares que deu o seu inestimável contributo na organização da bibliografia e respectiva lista de referências.

Este estudo não seria possível se não fosse pela grande compreensão, no sentido mais amplo e profundo da palavra, de toda equipe com a qual trabalhei nesses anos no Colégio Bandeirantes, professores, estagiários e funcionários, em especial, Alexandre Magno, Carolina Zambrana, Elisabeth Pontes, Elizabeth Zink, Luciane Aguiar, Mariana Lorenzin, Mariana Marangoni, Maria Fernanda Moreira, Meire Bartolo, Renato Villar, Vanderiza Rodrigues. Muitíssimo obrigado!!!

Por fim, mas não menos importantes, ficam os meus agradecimentos à minha família e a meus amigos!

E finalmente a todos aqueles de “grande alma” que viajaram comigo, dividiram as dores e as lágrimas, e puderam compartilhar da alegria da vitória.

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

No cenário energético mundial, a fonte de energia primária dominante alterou-se ao longo do século XX. No início desse século, o carvão respondia por mais da metade do consumo energético mundial. Já a partir da segunda metade do século XX, o petróleo assumiu a posição dominante e, mais recentemente, houve uma ascensão “tímida” da importância do gás natural, sendo evidente que, no século XXI, ocorrerá o desenvolvimento de novas fontes de energia primária. A Figura 1 apresenta a evolução do consumo de energia primária nos últimos dois séculos (Rodrigues 2018).

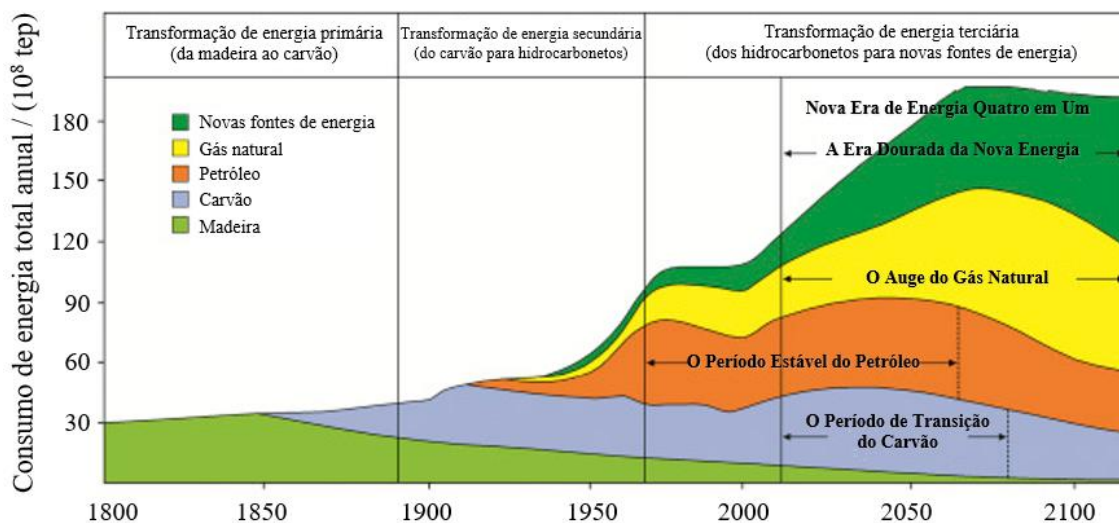


Figura 1 – Evolução histórica e previsões do balanço energético global (Rodrigues 2018).

Como pode ser visto na Figura 1, no século XX, houve um aumento significativo do consumo energético global, saltando de pouco mais de 30×10^8 tep/ano no início do século XX para mais de 120×10^8 tep/ano no início do século XXI. Esse aumento do consumo energético apresenta uma relação direta com o aumento da população como também de sua qualidade de vida. Embora se preveja, entre 2014 e 2040, um aumento da

população mundial de 1,6 bilhão¹ de pessoas, tanto o PIB (Produto Interno Bruto) quanto o consumo de energia devem dobrar nesse mesmo período (Figura 2).

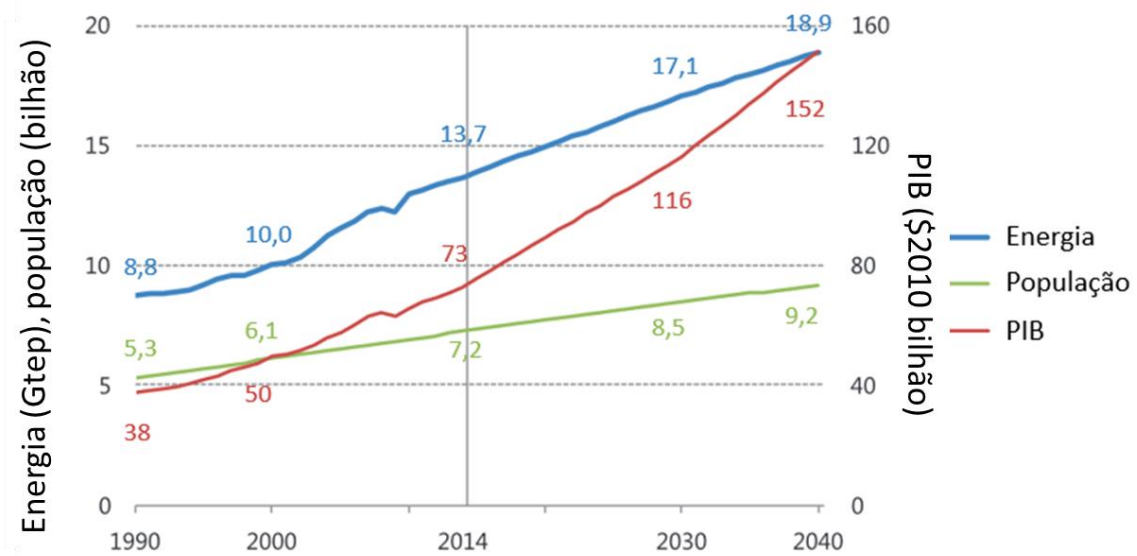


Figura 2 –Relação entre energia, população e PIB mundiais, The Institute of Energy Economics, Japan (IEEJ 2016).

O cenário apresentado é suportado por alterações no setor industrial, melhoramento na urbanização e na conservação de energia, principalmente nos países da OCDE (Organização de Cooperação e Desenvolvimento Econômico). No entanto, o consumo de energia mundial crescerá rapidamente nas economias emergentes como China e Índia, países esses responsáveis por metade desse aumento (BP 2018).

Recentemente, esse aumento implicou a definição de uma estratégia energética por parte das Organizações das Nações Unidas (ONU) extremamente agressiva. Na realidade, como exposto nesse cenário, que implica uma necessidade de crescimento da oferta de energia primária, a estratégia energética definida envolve garantir segurança, competitividade e energia sustentável, sendo essas três as componentes da estratégia climática da ONU. Nesse sentido, foram propostas três estratégias para a garantia desses itens: *European 2020 Energy and Environmental Plan* (European Commission 2007); *Energy Roadmap 2050* (European Commission 2011); *2030 Energy Strategy* (European Commission 2014).

¹ Neste trabalho será adotada a unidade bilhão que se refere a 10⁹.

Essas estratégias se fazem necessárias à medida em que é observada a tendência de crescimento bruto da utilização de combustíveis fósseis, especialmente o petróleo. O cenário exposto confirma a dependência mundial no petróleo pelo restante do século XXI. Sendo assim, a crescente complexidade de exploração de novas reservas de petróleo (Rodrigues 2018), as quais demandam tecnologias mais dispendiosas em prospecção/pesquisa e exploração, aumentando o preço dessa fonte energética e viabilizando alternativas, tende a um limite técnico e econômico.

Como mencionado, apesar dessas dificuldades, os combustíveis fósseis terão um papel importante no balanço energético mundial, respondendo por, aproximadamente, 75% da matriz energética mundial na projeção até 2040 (Figura 3). O carvão, mesmo que nas projeções tenha uma queda de participação como fonte de energia primária, ainda terá um papel significativo, por consequência dos países que são dependentes de seu uso, principalmente a China e a Índia. As energias nucleares, bem como as energias renováveis juntamente com o gás natural ganharão uma projeção de crescimento até 2040, saltando de 38%, em 1990, para 49% em 2040 (Figura 3) (Rodrigues 2018).

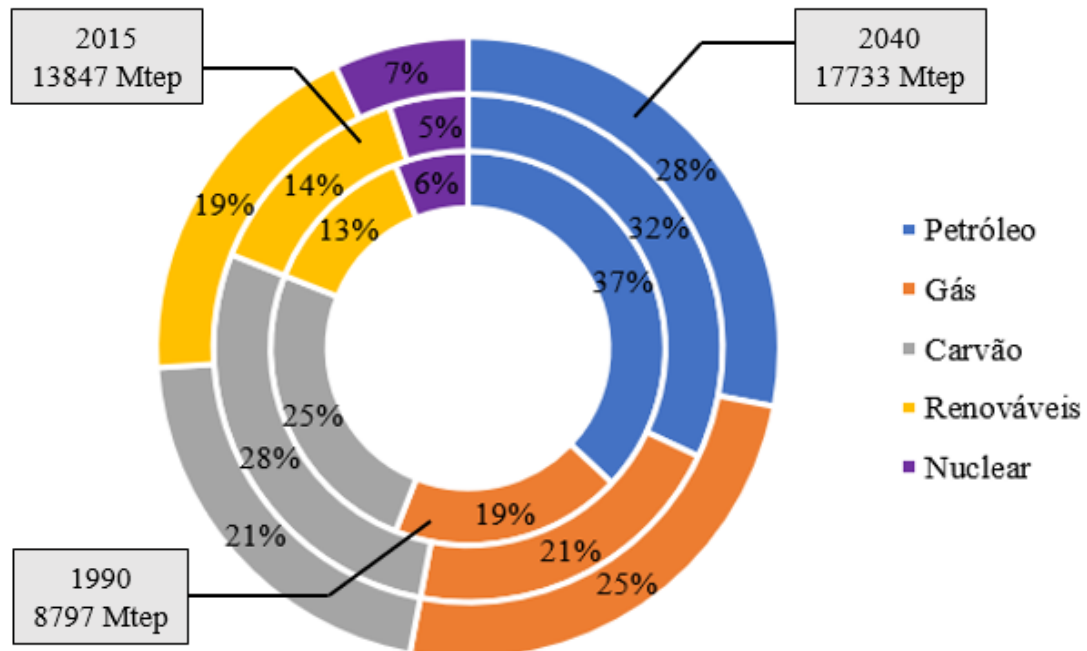


Figura 3 – Balanço energético mundial em 1990, 2015 e 2040 (Sokolov 2016).

Nesta óptica de análise da evolução histórica do setor energético, e tendo em conta a utilização da energia primária, bem como os métodos de produção e sua utilização,

podemos constatar que: (i) as energias primárias diminuirão suas taxas de emissões de CO₂; (ii) métodos de produção simples serão substituídos por métodos tecnologicamente mais avançados e (iii) a substituição de diferentes recursos energéticos, implicando na utilização de energia transformada (Rodrigues 2018).

Assim, atualmente, as emissões de CO₂ decorrentes da utilização dessas fontes primárias geram dificuldades para que o setor energético colabore para que os níveis de emissões estabelecidos no Acordo de Paris (documento da ONU com metas para redução das ameaças das mudanças climáticas) sejam atingidos (United Nations 2015).

Como Estados Unidos da América (EUA) e China, não conseguem encontrar vantagens econômicas para essas soluções, este último responsável por cerca de 30% do consumo primário de energia, não são signatários do Acordo de Paris. (Rodrigues 2018).

Essas dificuldades, relacionadas com a redução das emissões de CO₂, decorrem de um conjunto de incertezas e desafios (Rodrigues 2018):

- As políticas internacionais não são suficientes para alcançar as metas relacionadas com os problemas ambientais;
- Resistência à mudança, seja de instituições, de países ou das próprias comunidades;
- As prioridades no fornecimento de energia segura e sustentável;
- O aumento da demanda energética decorrente do desenvolvimento social e econômico;
- As questões de financiamento e acessibilidade à produção de energia;
- A viabilidade econômica dos projetos ambientais; e
- O não cumprimento dos compromissos estabelecidos no Acordo de Paris não pune formalmente os países signatários.

Uma das metas do Acordo de Paris, encontrada no seu artigo 2º da Convenção, visa fortalecer a resposta global à mudança do clima, no contexto do desenvolvimento sustentável e dos esforços de erradicação da pobreza, incluindo limitar o aumento da temperatura global a 1,5°C em relação aos níveis pré-industriais com a finalidade de reduzir os riscos de impactos da mudança climática. Esta meta só será atingida com a

utilização de métodos de mitigação de emissões de gases com efeito de estufa, tais como tecnologias avançadas de CCS (*carbon capture and storage*, ou captação e armazenamento de dióxido de carbono). O Acordo de Paris deixa claro que as tecnologias CCS são a única alternativa para que as metas de redução das emissões de CO₂ sejam atingidas (United Nations 2015).

O Brasil, como signatário do Acordo de Paris, reconhece a gravidade e urgência em resolver ou mitigar as questões climáticas, visto que a responsabilidade humana desse fenômeno já faz parte de um consenso científico (SEEG 2018). No advento das negociações envolvidas no Acordo, podemos ressaltar que, ainda durante o governo de Dilma Rousseff, o Brasil se comprometeu com a redução das suas emissões em 37% até 2025 (2005 como ano base), com indicativo desta redução comprometeu-se em reduzir as emissões de dióxido de carbono em 43% até 2030. Além disso, o país se propôs a eliminar o desmatamento ilegal na Amazônia até 2030, a reflorestar 12 milhão de hectare e recuperar 15 milhão de pastagens degradadas. No setor energético, a meta principal foi o aumento da participação das energias renováveis na Oferta Primária de Energia para 45% até 2030 (valor correspondente a 41,2% em 2015, segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE 2018a)), mas também o de assegurar de 28% a 30% de energias renováveis não-hidrelétricas (solar, eólica, biomassa e etanol) e de aumentar a participação dessas energias para 23% na geração de eletricidade no país. Essas metas foram ratificadas no governo do presidente Michel Temer, em 2016, e, logo em seguida, o país viu suas emissões aumentarem, em parte por conta do desmatamento e da agropecuária (Figura 4).

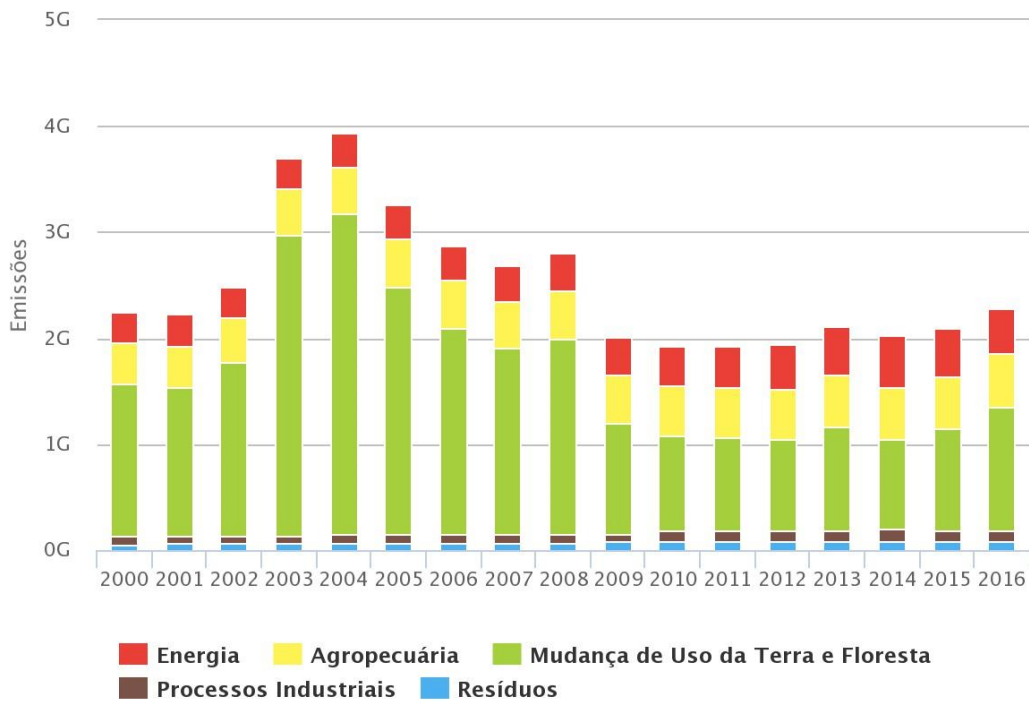


Figura 4 – Emissões totais no Brasil por setor (2000-2016) (SEEG 2018).

As INDCs (*Intended National Determined Contribution* – Contribuições Pretendidas Determinadas Nacionalmente) brasileiras foram recebidas com críticas pela comunidade internacional e pelos especialistas pela sua falta de ambição, especialmente contra o combate ao desmatamento, maior fonte de emissões no país, e que se limitou a zerar o desmatamento da Amazônia dentro de 15 anos, um prazo incompatível com a urgência necessária de ações. O país, que sempre se apresentou como uma liderança nas negociações, adotou uma postura conservadora em relação ao compromisso ambiental entre 2011 e 2015. Um exemplo é o Novo Código Florestal (Projeto de Lei nº 1.876/99) (Brasil 2011) aprovado em 2012 que substituiu o Código Florestal anterior e passou a permitir uma forma de desmatamento legal, algo que limita ainda mais a ações contra o desmatamento já a partir de uma meta bastante aquém do ideal (SEEG 2018).

Apesar das dificuldades enfrentadas, o Acordo de Paris tem sido uma nova governança climática mundial baseada na colaboração internacional. O Brasil se coloca a partir de 2019, um grande desafio de superação da crise política institucional, mas com a necessidade de reorientar as decisões políticas para uma agenda climática que seja capaz de encontrar um novo caminho de desenvolvimento sustentável a longo prazo.

Dentro do cenário exposto, considerando as estratégias estabelecidas pelas Nações Unidas, baseadas em segurança energética, competitividade e energias sustentáveis, e também considerando as metas estabelecidas no Acordo de Paris, tem-se um cenário no qual a aplicação em larga escala das tecnologias de captação e armazenamento de carbono se faz imprescindível para a redução das emissões de CO₂.

Objetivos

O objetivo principal do trabalho foi analisar as mudanças climáticas sob a óptica científica, tanto numa perspectiva global como local, e fazendo um levantamento histórico das resoluções de acordos das Nações Unidas entre os países para a mitigação de gases com efeito de estufa, buscando tecnologias alternativas em relação à segurança energética e o mínimo de impacto ambiental.

Pretende-se, neste trabalho, iniciar estudos destas tecnologias no Brasil, guiando entidades competentes nesta rota de adoção de tecnologias limpas de carvão, uma vez que o mundo conta com diversas instituições desenvolvendo pesquisas na busca do domínio desta tecnologia.

Esta pesquisa busca determinar, por meio de métodos analíticos, que incluem análises de caracterização petrológica, geoquímica e palinológica do carvão, o potencial de armazenamento de dióxido de carbono do carvão das camadas Barro Branco e Bonito, da Formação Rio Bonito, da Bacia Carbonífera do Sul-Catarinense, na região sul do Brasil. A determinação desse potencial abre um novo caminho de aproveitamento deste recurso fóssil, hoje explorado nas camadas estudadas para apenas fins termelétricos.

Adicionalmente, pretende-se analisar o potencial desse recurso para auxiliar o Brasil no cumprimento das metas estabelecidas pelo país no Acordo de Paris, por meio de uma eventual adoção das tecnologias CCS, que também podem influenciar o debate sobre perspectivas futuras para a indústria do carvão no Brasil.

CAPÍTULO 2 – MUDANÇAS CLIMÁTICAS: AS TECNOLOGIAS CCS COMO SOLUÇÃO NA SUA MITIGAÇÃO

Mudanças climáticas são alterações a longo prazo em condições meteorológicas identificadas por mudanças em temperaturas, precipitações, ventos e outros indicadores. As mudanças podem envolver alterações nas condições médias ou alterações na variabilidade, incluindo, por exemplo, maior incidência de eventos extremos (Solomon et al. 2007). No entanto deve-se tomar cuidado, pois o que se entende por alterações climáticas pode estar, na realidade, relacionada com a escala de abordagem, isto é, se esta análise for realizada a uma escala de milhão de anos pode ser distinta de uma análise efectuada a uma escala de apenas algumas dezenas de anos.

Faz-se ainda notar que, atualmente, as referidas alterações climáticas estão predominantemente associadas a alterações ocorridas ao nível da temperatura média do planeta terra, a qual é controlada pelos ciclos de Milankovitch (Figura 5). Esses ciclos descrevem a influência dos três movimentos do planeta terra, nomeadamente translacional, rotacional e de precessão, nas variações dos períodos de alta intensidade de radiação solar que, por sua vez, irão influenciar o desenvolvimento das eras glaciais.

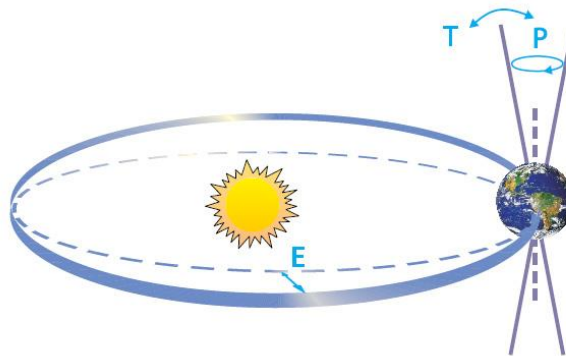


Figura 5 – Ciclos de Milankovitch: obliquidade ou inclinação (T), mudanças na excentricidade (E) e precessão (P). (Solomon et al. 2007).

Essas variações caracterizam o que se conhece como mudanças climáticas cíclicas, sendo estas regionais ou globais, pois a temperatura média do planeta é controlada pelo equilíbrio do balanço energético do planeta. Assim sendo, ao analisar a temperatura média do planeta a uma escala de 450 mil anos, observa-se que os picos de alta temperatura e as glaciações do planeta Terra se repetem de forma cíclica, como se pode observar na Figura 6, na qual se identificam quatro ciclos de glaciação. Estes ciclos são divididos em eventos de períodos de aquecimento, que variam entre 10 a 30 mil anos, enquanto os períodos glaciais até 100 mil anos (Figura 6). Os ciclos são representados, na Figura 6, de I a V, sendo, V o mais antigo, e o I o mais recente.

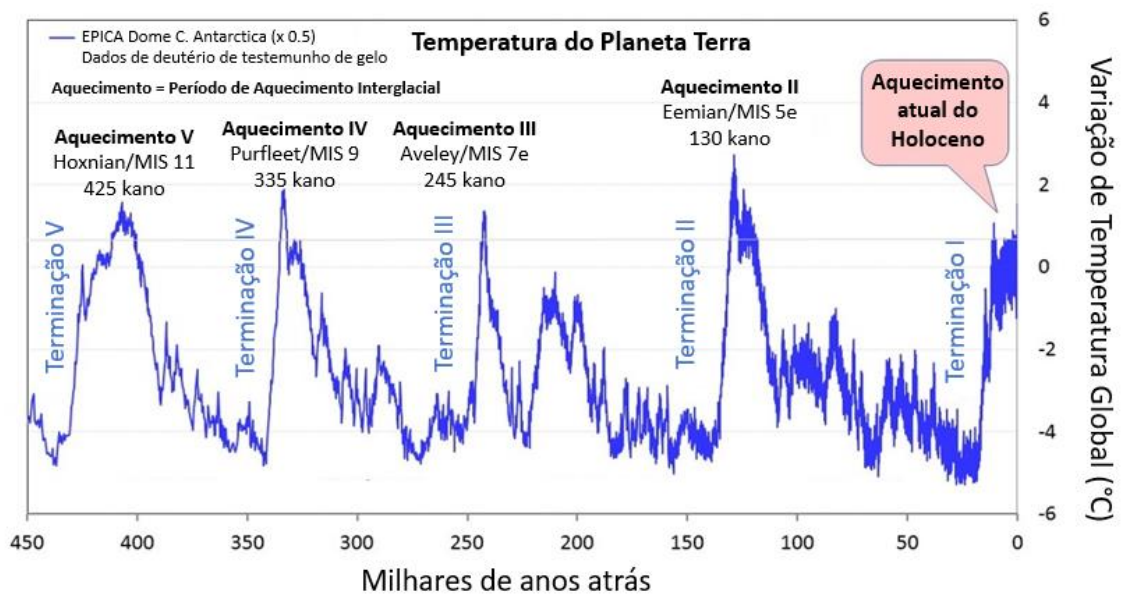


Figura 6 – Gráfico das glaciações em relação a variação de temperatura global com milhares de anos (Rodrigues e Lemos de Sousa 2019).

Os períodos de glaciação possuem um padrão cíclico, mas não são uniformes: o ciclo V teve duração de 89 mil anos, o ciclo IV durou 93 mil anos, ciclo III, 113 mil anos, e o ciclo II, 119 mil anos, o ciclo I é o ciclo atual (Figura 7). Na Figura 7, destaca-se em azul, os períodos glaciais, e em vermelho, os períodos interglaciais. Os períodos glaciais variam de 35 a 60 mil anos, em relação aos ciclos V e II, respectivamente, sendo assim, o ciclo II 34% mais longo que o ciclo V (Rodrigues e Lemos de Sousa 2019). O terceiro ciclo se destaca por ter passado por um período interglacial passando por um curto período glacial e seguido por um segundo período de aquecimento. O ciclo V possui o período de aquecimento mais longo enquanto o ciclo III, o período mais curto de

aquecimento, mesmo assim, a média de temperaturas altas para ambos os ciclos não diferem de 1°C.

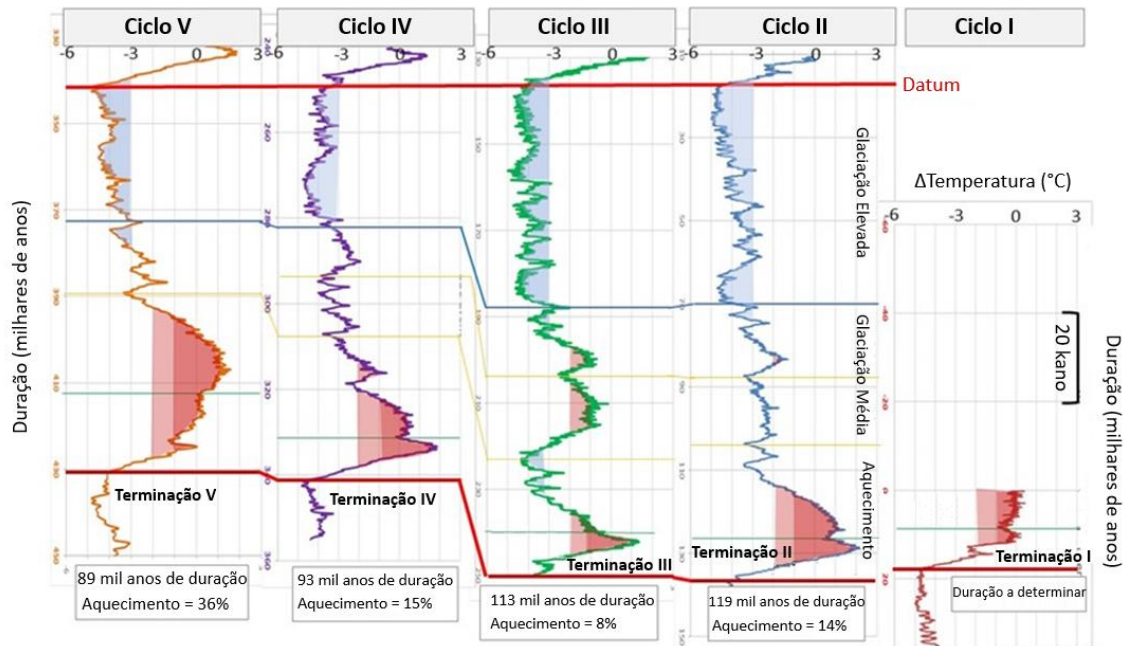


Figura 7 – Correlação entre duração cíclica, em milhares de anos, com a variação de temperatura. Os Datums, linha vermelha, representam as variações abruptas que dividem as glaciações das interglaciações (Rodrigues e Lemos de Sousa 2019).

Se esta análise for realizada numa escala menor, como por exemplo nos últimos 40 anos (Figura 8), é possível verificar que a intensidade das irradiações solares se mantém praticamente constante, porém a temperatura média global cresceu nesse período. O aumento da temperatura global. Assim sendo, se a abordagem de análise de 40 anos for enquadrada na análise dos 450 mil anos, pode-se concluir que o planeta está atualmente em uma fase de aquecimento, embora este aquecimento seja esperado na perspectiva cíclica defendida por Milankovitch.

Dessa forma, conclui-se que o mesmo conjunto de dados pode ser utilizado em discursos totalmente diferentes: um dos cenários, e o mais comum, utiliza a referida análise para justificar a ocorrência do aquecimento global com as atividades humanas, já um segundo cenário utiliza os dados em análise para descrever a dinâmica climática característica do planeta Terra, independentemente da ação humana.

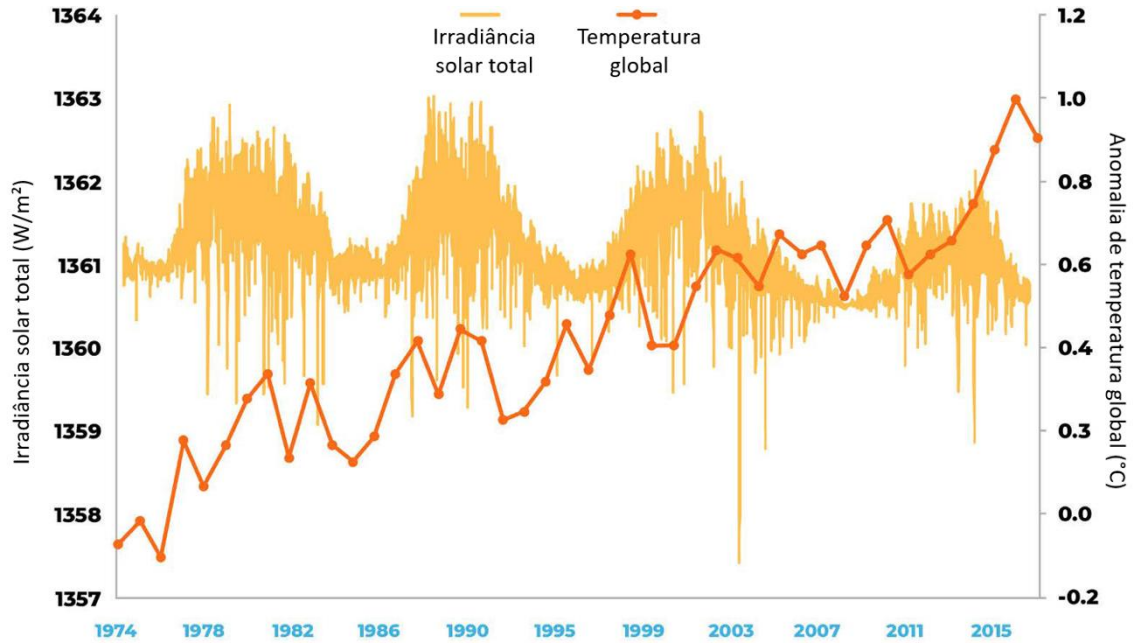


Figura 8 – Variação da temperatura em relação a irradiação solar no período de 40 anos (Rodrigues e Lemos de Sousa 2019).

No entanto, é um fato que a variação da temperatura, e ainda de acordo com a teoria de Milankovitch, encontra-se intimamente relacionada com as variações ocorridas com as emissões de CO_2 . O gráfico da Figura 9 comprova esta dependência que na realidade demonstra que o aumento e a diminuição da temperatura se encontram dependentes do aumento e da diminuição das emissões de CO_2 .

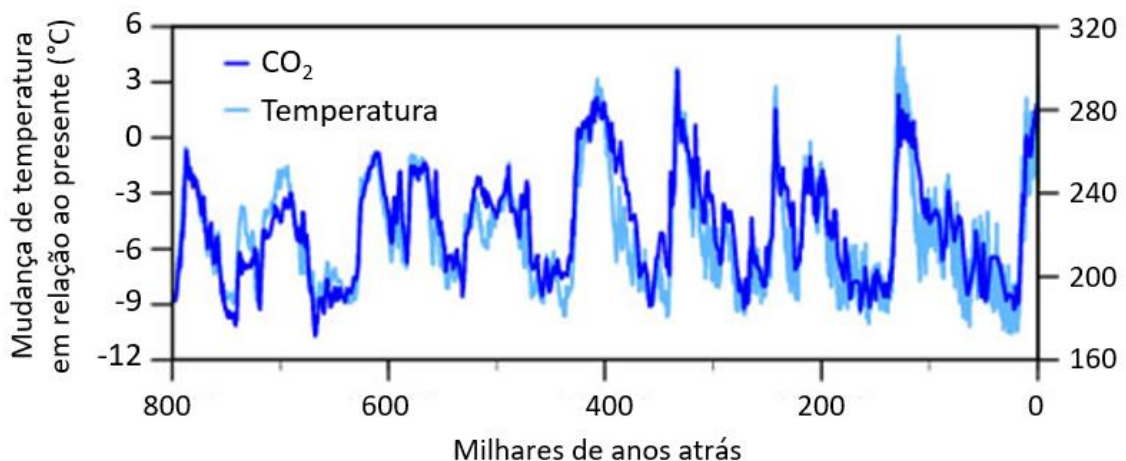


Figura 9 – Variação da temperatura em relação à concentração de CO_2 no período de 800 milhares de anos (National Centers for Environmental Information - NOAA 2019).

Nesta perspectiva, pode então ser afirmado que as alterações climáticas estão intimamente ligadas com os GEE (Gases com Efeito de Estufa), entre eles o CO_2 . Os

oceanos são os maiores emissores de CO₂, juntamente com a respiração de animais e plantas e a decomposição de matéria orgânica. Além das fontes citadas, erupções vulcânicas e incêndios florestais também contribuem para as emissões naturais de dióxido de carbono. No que toca às emissões originadas pela atividade humana, as maiores contribuições são provenientes das alterações no uso da terra, da queima de combustíveis fósseis, de atividades industriais e do desmatamento (Le Quéré et al. 2012). Destas emissões originadas da atividade humana, 87% são provenientes da queima de combustíveis fósseis, 9% de alterações no uso da terra e desmatamento e 4% de processos industriais, como a indústria cimenteira (Le Quéré et al. 2012). A análise dessa divisão das contribuições antropogênicas para as emissões dos GEE, reitera que 87% é proveniente da queima de combustíveis fósseis para a geração de energia, permite que organismos internacionais, como o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas da ONU (IPCC) defendam estratégias de planejamento energético considerando opções de mitigação dessas emissões (Le Quéré et al. 2012).

O IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change* - Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas) foi criado, em 1988 por duas agências: UNEP (*United Nations Environment Programme* - Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente) e o WMO (*World Meteorological Organization* - Organização Meteorológica Mundial), substituindo os programas anteriores com finalidade mais limitada, como *Global Atmospheric Research Program* (GARP – Programa de Pesquisas Atmosféricas Globais) e *Advisory Group on Greenhouse Gases* (AGGG – Grupo Consultivo sobre Gases com Efeito de Estufa). Entre suas funções está o fornecimento de informações atualizadas e confiáveis sobre mudanças climáticas. O Painel foi criado num contexto de crescimento do conhecimento científico sobre as mudanças climáticas, o qual deveria responder a quatro desafios (Neto 2010):

- (i) identificar as incertezas sobre as mudanças climáticas e seus impactos, e elaborar um plano para superá-las;
- (ii) avaliar as implicações políticas das mudanças climáticas e das estratégias de resposta;
- (iii) revisar as políticas nacionais e internacionais relacionadas com os GEE; e

- (iv) avaliar a questão dos GEE sob todos os aspectos, para que governos e organizações intergovernamentais possam levá-los em conta em seus programas ambientais e projetos de pesquisa e desenvolvimento.

O IPCC concluiu, no seu 5º relatório, que há uma probabilidade 95% de que as atividades humanas nos últimos 50 anos tenham contribuído para o aumento da temperatura média do planeta (Rhein et al. 2013).

De acordo com os desafios propostos pelo IPCC, a mitigação das mudanças climáticas pode estar relacionada com a redução dos GEE, e tal como já referido, deverá ser considerada uma estratégia climática a incorporação da questão dos GEE em projetos de desenvolvimento governamentais.

Uma das primeiras iniciativas que teve a finalidade de tratar as questões ambientais de forma global foi o Protocolo de Kyoto, assinado em 1997. Esse protocolo foi uma tentativa de estabelecer compromissos de redução de emissões entre os países membros das Nações Unidas, mas, no entanto, os Estados Unidos não foram signatários. Posteriormente, tentativas como o *road map* de Bali em 2007 e o de Copenhague em 2009 também se mostraram constituírem grandes insucessos.

Nesta perspectiva de dependência energética em relação ao setor dos combustíveis fósseis, a comissão das Nações Unidas definiu uma estratégia energética mundial, a qual defende o tripé segurança energética, competitividade e energia sustentável, e que, implicitamente, deveria ser suportado por uma estratégia climática. As comissões de trabalho estabeleceram um conjunto de medidas que sofreram uma série de atualizações que culminaram em programas de trabalho, nomeadamente:

- European 2020 Energy and Environmental Plan (European Commission 2007):
 - O incremento de 20% na eficiência energética;
 - Incremento de 20% nas energias renováveis;
 - Redução de 20% nas emissões de CO₂, através da adoção de tecnologias de emissões zero.

- Energy Roadmap 2050 (European Commission 2011):
 - Redução nas emissões dos GEE em 80 a 95% até 2050 (em comparação aos níveis de 1990) e assim promover descarbonização dos sistemas energéticos;
 - Garantir oferta segura e eficiente de energia;
 - Aumentar a participação das energias renováveis;
 - Aumentar a participação da energia nuclear;
 - Promover a implementação das tecnologias de captação e armazenamento de CO₂.
- 2030 Energy Strategy (European Commission 2014):
 - Essa iniciativa visa ajudar a União Europeia a desenvolver sistemas energéticos mais competitivos, seguros e sustentáveis e a atingir as metas de redução de emissões até 2050:
 - Redução nas emissões dos GEE em 40% (em comparação aos níveis de 1990);
 - Pelo menos 27% de participação das energias renováveis no consumo
 - Pelo menos 27% de eficiência energética em comparação ao cenário padrão.

A comissão das Nações Unidas, preocupada com o não cumprimento das metas climáticas apresentadas nas medidas das estratégias energéticas (European 2020 Energy and Environmental Plan, Energy Roadmap 2050, 2030 Energy Strategy), propôs a realização da Conferência de Paris em novembro de 2015. A conferência de Paris, intitulada Quadro das Nações Unidas sobre Alterações Climáticas (CQNUAC), teve como principal objetivo a temática da necessidade de controlar o aumento da temperatura média global, além de atingir o objetivo das emissões zero dos GEE (United Nations 2015) até à metade do século XXI (Rodrigues 2018).

As Nações Unidas, por meio do Acordo de Paris, em 2015, estabeleceram três metas para a redução das ameaças das mudanças climáticas (United Nations 2015):

- i) Manter o aumento da temperatura média global abaixo de 2°C em relação aos níveis pré-industriais, e empenhar-se para limitar esse aumento da

temperatura a 1,5°C em relação aos níveis pré-industriais, reconhecendo que isso reduziria significativamente os riscos e os impactos das mudanças do clima;

- ii) Aumentar a capacidade de adaptação aos impactos negativos das mudanças do clima e promover a resiliência às mudanças do clima e um desenvolvimento das estratégias da redução das emissões dos gases com efeito de estufa, de uma maneira que não ameace a produção de alimentos;
- iii) Tornar os fluxos financeiros compatíveis com uma trajetória rumo a um desenvolvimento da redução dos gases com efeito de estufa e resiliente às mudanças do clima.

A Conferência de Katowice (COP24 – *24th Conference of Parties*, 24^a Conferência das Partes), em 2018, novamente desenvolvida com a temática central das alterações climáticas teve como principais objetivos enfatizar e promover a implementação das metas já estabelecidas no Acordo de Paris.

Chegamos a um ponto que para o cumprimento de todas as metas climáticas estabelecidas na Conferência de Paris, as tecnologias CCS representam uma ferramenta indispensável na mitigação das emissões de CO₂. As tecnologias CCS já vinham sendo consideradas, nomeadamente nas estratégias energéticas de European 2020 Energy and Environmental Plan, Energy Roadmap 2050, 2030 Energy Strategy, como uma solução alternativa à mitigação das emissões de CO₂. Porém, dado o seu estágio de maturação baixo e custos operacionais elevadíssimos foram, até então, vistas como uma alternativa pouco viável.

Diante das necessidades impostas pelo Acordo de Paris, passou-se a investir e a considerar as tecnologias CCS (IEA 2011; McCoy 2014) como soluções tecnológicas viáveis para reduzir as emissões dos gases com efeito de estufa como estratégia de mitigação das mudanças climáticas. Para o efeito, o *European Academies Science Advisory Council* (EASAC - Conselho Consultivo Europeu para as Ciências das Academias) criou um grupo de trabalho, em outubro de 2011, para examinar os desafios que devem ser abordados para garantir as tecnologias CCS como uma estratégia viável para mitigar as alterações climáticas e, conseqüentemente, tal contribuição poderia ser

aplicada na Europa até 2050 (European Academies Science Advisory Council (EASAC) 2013).

O novo cenário das tecnologias CCS enfrenta o desafio global na sua implantação que passa por um desafio ambiental e econômico. O desafio ambiental requer uma estratégia inovadora que possa garantir a sustentabilidade a longo prazo (Barros et al. 2012; Lemos de Sousa et al. 2009).

No entanto, neste cenário das questões das mudanças climáticas deve-se considerar os interesses das empresas exploradoras de recursos fósseis, como as petrolíferas, as quais buscam influenciar a criação de políticas públicas na regulação das emissões dos gases com efeito de estufa. Essa influência em forma de lobby supera, em volume de recursos, os investimentos feitos pelas organizações ambientais e pelo setor das energias renováveis. Em outro sentido, as mesmas empresas de recursos fósseis investem em pesquisas em tecnologias de captação e armazenamento de carbono com seu orçamento de pesquisa, por imposição contratual nos países nos quais atuam (Brulle 2018). Essa estratégia, aparentemente contraditória, permite a esses agentes influenciar o processo de adoção de tecnologias de captação e armazenamento de dióxido de carbono assim como controlam o seu desenvolvimento, aumentando dessa maneira a dependência das regiões nas quais operam.

CAPÍTULO 3 – TECNOLOGIAS CCS

Dada a relevância das tecnologias CCS no abatimento das emissões de dióxido de carbono para o cumprimento das metas dos acordos climáticos, esse capítulo dedica-se a descrever essas tecnologias, caracterizando os processos de captação, transporte e armazenamento. A seguir, é feito um breve histórico da evolução dessas tecnologias, num contexto mundial e, por fim, no contexto brasileiro.

As tecnologias de captação e armazenamento de dióxido de carbono (CCS) reduzem as emissões dos gases com efeito de estufa por meio da captação de dióxido de carbono gerado em grandes fontes pontuais antes de ser liberado para a atmosfera. Esse gás é posteriormente transportado para armazenamento em um local seguro (EASAC 2013) ou para utilização em aplicações como de recuperação avançada de petróleo (EOR – *enhanced oil recovery*, recuperação avançada de petróleo), como forma de favorecer o desenvolvimento de tecnologias de captação de CO₂ (IEA 2016).

As tecnologias CCS são consideradas, hoje, essenciais para se atingir as metas de redução das emissões de dióxido de carbono. Já em seu Segundo Relatório de Avaliação, em 1995, o IPCC considerava as CCS como uma tecnologia promissora. Em 2005, esse órgão produziu o Relatório Especial sobre Captação e Armazenamento de Carbono (Metz et al. 2005), reconhecendo sua importância na mitigação das emissões de CO₂. Quase uma década depois, no Quinto Relatório de Avaliação, esse mesmo órgão reportou que muitos modelos climáticos, com uso limitado de tecnologias CCS, não conseguiam alcançar as concentrações de CO₂ na atmosfera necessárias para limitar o aumento de temperatura a 2 °C (IPCC 2014).

A Agência Internacional de Energia (IEA – *International Energy Agency*), em seu cenário em que limita o aumento de temperatura a 2 °C, as tecnologias CCS são responsáveis por 94 Gt da redução das emissões de CO₂ até 2050, o que corresponde a

12% das metas para o setor de energia (IEA 2016). Em um cenário sem CSS, para se atingir a meta dos 2 °C, seriam necessários investimentos adicionais no setor de geração de energia de 3,5 trilhões de dólares para o desenvolvimento de tecnologias renováveis, e a geração de energia usando carvão precisaria ser completamente eliminada (EASAC 2013). Para além do setor de energia, as tecnologias CCS representam uma das únicas soluções capazes de promover uma redução significativa das emissões de CO₂ inerentes aos processos de produção de ferro, aço e cimento nas indústrias (EASAC 2013).

Apesar de sua importância, o atual ritmo de desenvolvimento das tecnologias CCS não é suficiente para atingir as metas do Acordo Climático de Paris (IEA 2016). Os desafios na implantação das tecnologias CCS se devem à viabilidade econômica e dificuldades de aceitação do público, o que restringe as possíveis localizações e taxas de desenvolvimento das infraestruturas de transporte e armazenamento, uma vez que ainda há uma descrença na opinião pública sobre a segurança quanto ao armazenamento permanente do CO₂ nos sítios escolhidos (EASAC 2013).

Devido aos atrasos e dificuldades na implantação do CCS na Europa, somente as estimativas inferiores, inicialmente previstas na diretiva da Comissão Europeia e mais recentemente no Roadmap 2050, podem ser alcançadas. Nesse contexto, a contribuição das tecnologias CCS somente surtirão efeito em aplicações com justaposições de fontes e sumidouros e aceitação pública favorável (EASAC 2013).

De um ponto de vista energético, somente é favorável focar o desenvolvimento de tecnologias CCS em situações nas quais a matriz energética é pautada de usinas termoelétricas, que apresentem forte dependência com a utilização de combustíveis fósseis. As implantações dessas tecnologias poderiam contribuir para o desenvolvimento de tecnologias emissões zero (EASAC 2013).

Estudos realizados pelo IPCC (Metz et al. 2005) e pela IEA (2010) apontaram a necessidade de desenvolvimento substancial de tecnologias CCS, associadas à geração de energia elétrica por combustíveis fósseis e aos processos industriais para minimizar os custos previstos para alcançar os objetivos de redução das emissões dos gases com efeito de estufa. O *Roadmap CCS* (IEA 2011) antecipou que 100 projetos teriam sido implantados até 2020, e 3400 projetos até 2050 de forma a alcançar uma redução de 50%

nas emissões de gases com efeito de estufa nas estimativas mais otimistas. Nesse cenário mais otimista, o CCS responderia por 20% das reduções necessárias. Apesar de essas previsões serem estimadas pelo mundo desenvolvido, 2/3 de todas as instalações das CCS seriam desenvolvidas na China, na Índia e em países em desenvolvimento em 2050 (EASAC 2013).

Assim, o uso de estratégias baseadas em tecnologias CCS vem sendo considerada uma abordagem promissora e que pode ajudar a reduzir as emissões de CO₂ (Tang et al. 2014). As tecnologias CCS incluem, de forma generalizada, as seguintes necessidades (Barros et al. 2012):

- Captação de CO₂: separação do CO₂ de outros gases, sua concentração, compressão quando necessária para redução do volume e acomodação do fluido;
- Transporte do CO₂ através de dutos, por navio ou por caminhão, da unidade de produção ao local de utilização ou armazenamento;
- Armazenamento do CO₂;
- Utilização do CO₂.

3.1. Captação de CO₂

Os desafios associados à captação de dióxido de carbono não estão relacionados, apenas, com as grandes quantidades envolvidas (da ordem de 180 a 400 t de CO₂/hora para uma usina termoeletrica gerando 500 Megawatts de eletricidade), mas também com a baixa concentração do dióxido de carbono nos gases efluentes (de cerca de 4% nos gases de exaustão de usinas que utilizam gás natural até cerca de 33% nos gases de exaustão em indústrias de produção de cimento) (EASAC 2013).

Desenvolvimentos nas técnicas de captação de dióxido de carbono têm sido alcançados nos últimos anos, porém a velocidades distintas. A captação pós-combustão baseada em solventes está emergindo como a técnica de captação mais promissora, apesar de todas as técnicas de captação poderem ser beneficiadas a partir de desenvolvimentos para redução de custos e para aumento da eficiência energética. Técnicas emergentes,

como a baseada no ciclo de CO₂ supercrítico, podem oferecer vantagens para captação de CO₂ de centrais de gás natural (IEA 2016).

Dentre as principais técnicas desenvolvidas para a captação de CO₂, destacam-se a pós-combustão, a oxi-combustão e a pré-combustão (EASAC 2013; IEA 2016).

A técnica de captação de CO₂ pós-combustão (Figura 10) minimiza as modificações necessárias no processo de combustão e foca no problema de separar grandes quantidades de CO₂ diluído após a combustão, por meio da instalação de um sistema de separação para tratar os gases de exaustão (EASAC 2013). Essa técnica pode ser utilizada em centrais de geração de energia atualmente em uso e apresenta baixos riscos, uma vez que é aplicada há mais de 60 anos (ESRU 2019). Dentre as técnicas de captação de CO₂, é atualmente a opção mais desenvolvida e, desde 2014, na unidade 3 da represa Boundary (EUA), está instalada uma usina comercial de geração de energia que emprega a pós-combustão para captação de até 1 Mtpa de CO₂ (IEA 2016). Por outro lado, os equipamentos utilizados são relativamente grandes e a técnica é custosa, tanto em termos de energia quanto em termos de investimento financeiro (ESRU 2019).

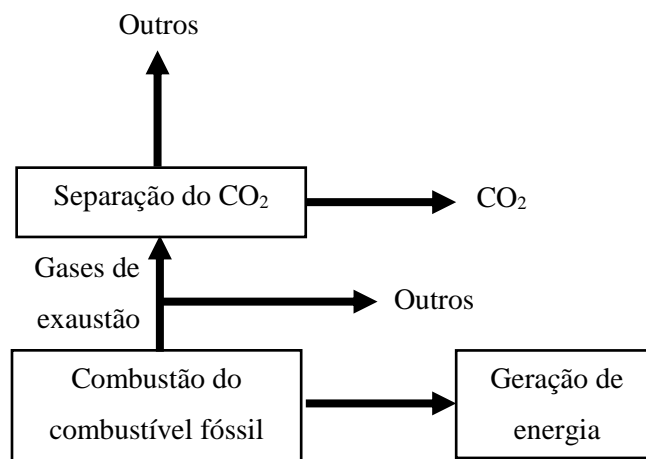


Figura 10 – Esquema da técnica de captação pós-combustão (Modificado de ESRU 2019).

Em suma, as vantagens da tecnologia pós-combustão são (ESRU 2019; Global CCS Institute 2019a):

- Baixo custo de adaptação das usinas termelétricas atuais devido à compatibilidade com as tecnologias de geração de eletricidade mais comuns;

- Baixo risco, pois essa tecnologia vem sendo aplicada há mais de 6 décadas, sendo atualmente utilizada na indústria alimentícia;
- Expectativa de ganhos futuros em eficiência devido ao desenvolvimento contínuo de materiais para as centrais ultra supercríticas e desenvolvimento de solventes e equipamentos de captação mais eficientes.

As principais desvantagens e desafios da tecnologia de pós-combustão são (ESRU 2019; Global CCS Institute 2019a):

- Necessidade de espaço para grandes equipamentos;
- Alta demanda de água, especialmente em centrais resfriadas a água.

A técnica de captação de CO_2 por oxi-combustão (Figura 11) envolve a redução do volume dos gases de exaustão e, conseqüente, aumento da concentração de CO_2 nesses gases por meio da substituição do ar por gás oxigênio no processo de combustão (EASAC 2013). Como os gases de exaustão são reciclados (como apresentado na Figura 11), utilizando o próprio CO_2 como meio de expansão (ao invés do ar), pode não ser necessário realizar a dessulfurização dos gases de exaustão. Por outro lado, o custo para produção de gás oxigênio é elevado e há ainda a necessidade de recircular grandes quantidades de gases de exaustão (ESRU 2019). Essa técnica já foi testada com sucesso em escalas relativamente pequenas (até cerca de 30 MW), porém, atualmente, não há projetos em desenvolvimento para demonstração dessa técnica em larga escala (IEA 2016).

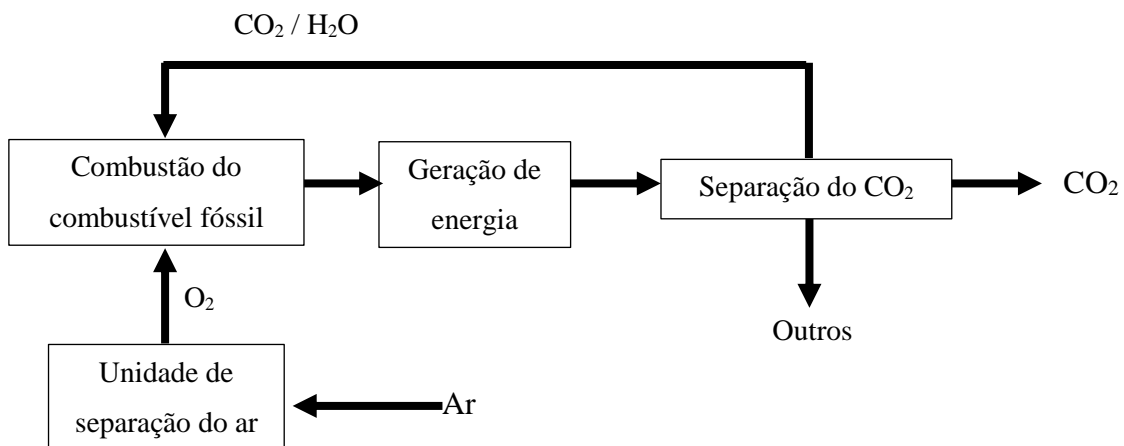


Figura 11 – Esquema da técnica de captação de CO_2 por oxi-combustão (Modificado de ESRU 2019).

Segundo a Unidade de Pesquisa de Sistemas de Energia (ESRU – *Energy Systems Research Unit*) (ESRU 2019) e o Global CCS Institute (2019a), as vantagens da tecnologia de captação oxi-combustão são:

- Queimadores utilizados são convencionais;
- Os equipamentos adicionais são familiares para os operadores e os técnicos responsáveis por usinas de energia;
- Pode evitar necessidade de dessulfurização completa do gás, pois permite armazenamento de SO_x e NO₂ junto com CO₂;
- A separação do CO₂ é realizada em volumes menores de gases de exaustão, uma vez que não há presença de N₂ (retirado previamente do ar);
- A recirculação dos gases de exaustão pode aumentar a eficiência em relação a usinas que não utilizam captação de CO₂;
- Com base nas informações e tecnologias disponíveis atualmente, estima-se que a tecnologia de captação oxi-combustão deve ser no mínimo tão competitiva quanto outros processos de captação (pós- e pré-combustão) e deve possuir uma ligeira vantagem em termos de custo-benefício.

Já os principais desafios da tecnologia de captação oxi-combustão são (ESRU 2019; Global CCS Institute 2019a):

- Não é possível incorporar a tecnologia de captação oxi-combustão em uma usina já existente. Uma usina de oxi-combustão é uma usina integrada e a tecnologia de captação oxi-combustão necessita total integração ao restante da usina. Assim, essa tecnologia pode ser mais custosa que as captações pré e pós-combustão para usinas já em operação.
- As operações de separação do ar e de separação do CO₂ implicam na redução de 25% na quantidade de energia liberada pela usina, quando comparada com uma usina a ar e que não realiza separação do CO₂.
- Necessidade de espaço para as unidades de separação do ar e separação do CO₂.

A técnica de captação pré-combustão (Figura 12) reduz a produção de CO₂ na combustão pela substituição do combustível rico em carbono por um fluxo de gases

contendo gás hidrogênio (que produz água na queima). Nessa técnica, o CO₂ é separado antes do processo de queima, após a etapa de gaseificação, onde apresenta maior concentração (EASAC 2013). Comparativamente às outras técnicas, na técnica de captação pré-combustão, as concentrações de CO₂ são geralmente maiores, assim como as pressões, o que favorece o processo de separação de CO₂. Por outro lado, há necessidade de converter o combustível para H₂, o que geralmente envolve mudanças mais radicais nos projetos das usinas (ESRU 2019).

Nessa técnica são utilizados equipamentos e tecnologias já estabelecidos para produção do gás de síntese (seja a partir da reforma e oxidação parcial ou gaseificação do combustível sólido) e para separação do H₂ / CO₂ resultante da reforma do vapor de água. Além disso, sistemas de solventes como Selexol e Rectisol são utilizados para captação de gases na indústria química há décadas. Em virtude disso, a técnica de captação pré-combustão é bastante promissora e pode ser aplicada num curto prazo em indústrias responsáveis por elevadas emissões de CO₂, incluindo a química e a siderúrgica (IEA 2016).

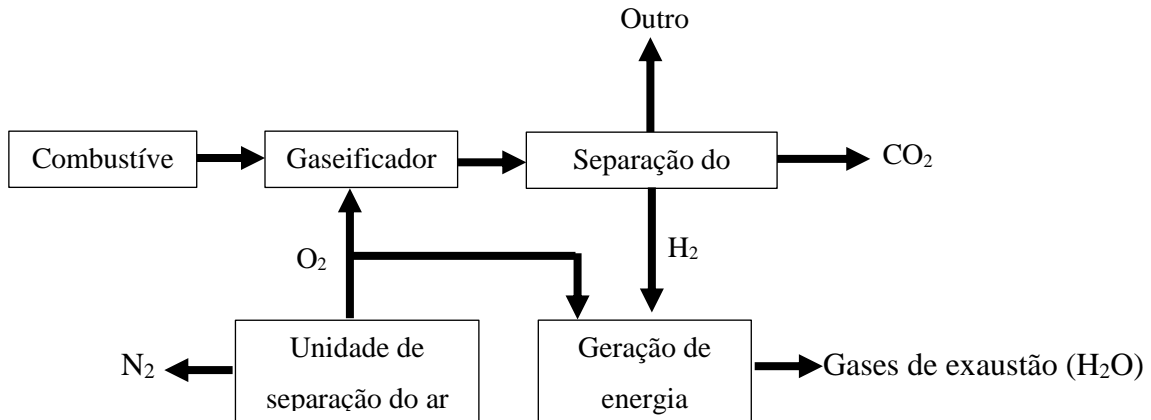


Figura 12 – Esquema da técnica de captação de CO₂ pré-combustão (Modificado de ESRU 2019).

Em suma, segundo ESRU (2019) e Global CCS Institute (2019a), as vantagens da tecnologia de captação pré-combustão são:

- A pré-combustão utilizando reação de mudança água-gás e a remoção de CO₂ com processos de remoção de ácidos e gases é praticada mundialmente de forma comercial;

- A utilização de CO₂ sob pressão incorre em uma perda energética menor, aproximadamente 20%, do que a atual tecnologia de pós-combustão, cuja perda é de 30%;
- Concentração superior à tecnologia de pós-combustão;
- Demanda de água do processo é menor em comparação com a tecnologia de pós-combustão;
- O desenvolvimento de turbinas a gás mais eficientes resultará em ganho de eficiência de futuras centrais a ciclo combinado.

A tecnologia captação de pré-combustão também apresenta os seguintes desafios (ESRU 2019, Global CCS Institute 2019a):

- Necessidade de processamento do combustível, com oxidação parcial e conversão do gás combustível em H₂ e CO₂;
- Requer mudanças radicais no projeto da central;
- Turbinas a gás em ciclo combinado não são difundidas mundialmente nesse setor.

3.2. Transporte de CO₂

As três principais opções para transporte de CO₂ em grande escala são por dutos, navios ou caminhões. Para o transporte em largas distâncias e grandes quantidades, os dutos são as soluções adotadas, sendo o transporte marítimo tipicamente utilizado em menor escala (Metz et al. 2005). Apesar da maior parte do transporte de CO₂, entre o local de captação e o local de armazenado, ser realizado por dutos, o transporte por navios pode ser favorecido em algumas circunstâncias (EASAC 2013):

- Locais de armazenamento remotos (de difícil acesso) e/ou *offshore*;
- Locais de armazenamento *offshore* que apresentam baixas taxas de injeção (predominantemente associadas a baixas permeabilidades de estruturas geológicas);
- Durante a fase inicial de implementação de tecnologias CCS, as quais implicam flexibilidade na execução dos projetos.

Já o transporte terrestre oferece poucas vantagens, uma vez que os custos associados aumentariam significativamente, sendo uma opção considerada somente em fases iniciais de projetos de investigação e demonstração à pequena escala (Metz et al. 2005).

O transporte de CO₂ pode ser realizado em três estados: gasoso, líquido ou sólido. Em termos comerciais, o CO₂ é transportado nos estados gasoso e líquido. Quando o gás é transportado em condições próximas da atmosférica, ele ocupa um volume bastante grande, o que leva à necessidade de instalações de grandes dimensões. Dessa forma, para ser transportado por dutos, o gás é comprimido para ocupar menor volume. O volume ocupado pode ser ainda mais reduzido se o dióxido de carbono for liquefeito. A liquefação é uma tecnologia bastante desenvolvida para transporte de gases em navios (com no GLP – gás liquefeito de petróleo – e no GNL – gás natural liquefeito) e pode ser transferida para a liquefação do dióxido de carbono (Metz et al. 2005).

3.3. Armazenamento de CO₂

De forma generalizada, é possível mencionar duas possibilidades distintas relacionadas ao armazenamento de CO₂, que são a fixação biológica e a sequestração geológica, como mostrado na Figura 13 (Rodrigues et al. 2015).

A fixação biológica consiste no armazenamento do CO₂ a partir do reflorestamento em larga escala, na qual os vegetais fixam o CO₂ por meio de sua capacidade fotossintética, biossintetizando-o na forma de carboidratos e armazenando-o na sua parede celular (Renner 2004; Rivkin e Legendre 2001). No ambiente terrestre, os ecossistemas florestais armazenam carbono ao se produzir lignina e outros compostos poliméricos (Fan et al. 1998). Outra possibilidade é o emprego de técnicas que envolvam organismos vivos (ciclo biogeoquímico do carbono). Estas alternativas, apesar de se mostrarem tecnologicamente possíveis, são vistas hoje como uma rota inviável economicamente, em virtude das diferentes composições dos gases de combustão produzidos a partir de processos industriais, que possuem tanto dióxido de carbono, como também de SO_x e NO_x (Koorneef et al. 2012; Rodrigues et al. 2015).

Atualmente, a sequestração geológica apresenta-se como a alternativa com maior capacidade de armazenamento de gás (Freund e Ormerod 1997; Pires et al. 2011), sendo possível armazenar até diversas dezenas de milhão de toneladas de CO₂ por meio de mecanismos físicos e químicos (Leung et al. 2014). Entre as possibilidades geológicas para armazenamento consideradas viáveis tanto tecnicamente quanto economicamente, destacam-se os reservatórios de petróleo e gás despressurizados, aquíferos salinos, camadas de carvão, folhelho e carbonatação mineral (armazenamento na forma mineral em rochas ultrabásicas) (Rodrigues et al. 2015).

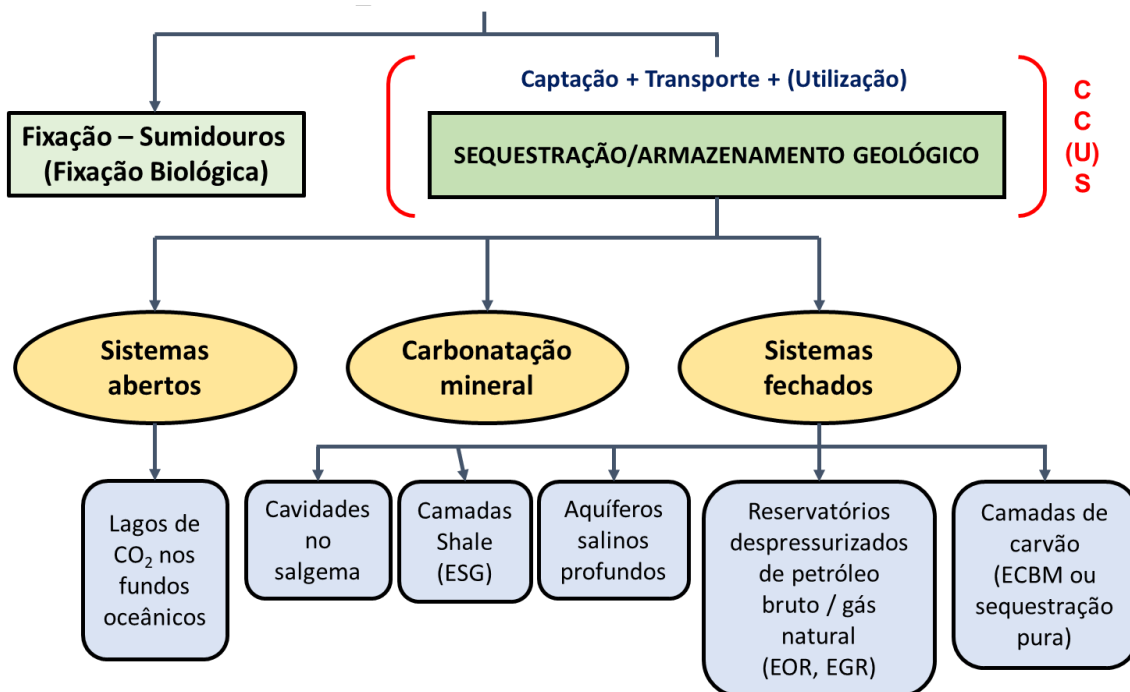


Figura 13 – Diminuição das emissões de CO₂ – estado da arte (Modificado de Rodrigues et al. 2015).

O armazenamento geológico de CO₂ pode ser realizado em reservatórios geológicos de configuração convencional e não convencional (Bachu et al. 2009). Reservatórios geológicos convencionais considerados favoráveis ao armazenamento de CO₂, como aquíferos salinos e reservatórios despressurizados de petróleo e/ou gás natural, devem apresentar as seguintes características: (i) capacidade suficiente para armazenar grandes volumes de CO₂; (ii) “injetividade” adequada para permitir a injeção de carbono no interior da formação geológica; (iii) confinamento, ou seja, configuração geológica com

trapas que retenham o CO₂ durante o período de tempo desejado, para que sejam evitados vazamentos (Bachu et al. 2009; Bachu, 2007).

Além dos critérios mencionados, há especificidades para o armazenamento em reservatórios não convencionais, como camadas de folhelho enriquecidas em matéria orgânica: (i) apresentar estruturas simples (i.e. o reservatório deve ser minimamente fraturado e/ou deformado); (ii) ser confinado (i.e. necessita da presença de camada selante/capeadora sobreposta para prevenir o vazamento ascendente de CO₂ que não foi adsorvido na formação); (iii) possuir permeabilidade adequada; (iv) apresentar baixa saturação em água, pois litologias com baixa saturação em água (baixo teor de humidade) são preferíveis para o armazenamento de carbono (Bachu et al. 2009; Bachu, 2007).

Estudos indicam que, apesar da baixa permeabilidade que as caracteriza como reservatórios não convencionais, rochas enriquecidas em matéria orgânica como folhelhos negros e carvões, podem armazenar grandes quantidades de CO₂ por meio da adsorção à matéria orgânica presente (Rodrigues et al. 2016). Poucos estudos se referem a essa temática no Brasil. Segundo Weniger et al (2010), a capacidade de sorção de dióxido de carbono e de metano em rochas como carvão e folhelhos é correlacionada ao teor de carbono orgânico total (COT). Os autores também afirmam que a capacidade de sorção para estes fluidos é maior em carvões e folhelhos carbonosos. Estudos desenvolvidos pelos autores indicam que cerca de 13,8Gt de CO₂ poderia ser armazenado nos depósitos dessas litologias em Santa Terezinha (SC) – local de amostragem do estudo citado – podendo atingir 15,4Gt, no caso de produção do metano presente (Weniger et al. 2010).

No caso dos aquíferos salinos, o armazenamento depende das condições de solubilidade do CO₂ em água, bem como da composição desta. Nestes reservatórios, os poros da rocha já estão preenchidos por água, sendo o CO₂ armazenado por dissolução (Van der Meer, 1993). No entanto, parte do CO₂ injetado que não for dissolvida competirá pelo espaço subterrâneo com a água ali presente, gerando seu potencial de deslocamento. Nesse sentido, embora aquíferos salinos profundos sejam considerados de elevado potencial para a sequestração, estes oferecem maior risco por serem mais suscetíveis à sobrepressão durante a injeção de CO₂ e, conseqüentemente, à migração do CO₂ e vazamentos (Barros et al. 2012).

Considerando os custos associados, o armazenamento geológico de CO₂ por carbonatação mineral, cavidades de sal, e em aquíferos salinos, não apresentam compensação aos custos de injeção por não apresentarem produção associada de hidrocarbonetos. Apesar de potenciais reservatórios de CO₂, estes estão associados à sequestração pura de CO₂, sem retorno econômico no processo, enquanto o armazenamento em reservatórios despressurizados de hidrocarbonetos e camadas de folhelho e carvão pode ter produção associada de hidrocarbonetos. Essa produção pode viabilizar economicamente a implementação das tecnologias de CCS (Almeida et al. 2017).

A viabilidade da implantação dessa tecnologia depende também da integração de aspectos econômicos e ambientais. Locais muito distantes das fontes de emissões de CO₂, ou que estejam associados a elevado nível de incerteza técnica, se tornam inviáveis ao armazenamento. De modo geral, a seleção de locais para armazenamento deve considerar, além dos critérios intrínsecos já mencionados, condições extrínsecas (Bachu, 2007), tcomo: (i) proximidade entre fontes emissoras e locais de armazenamento; (ii) adequado nível de infraestrutura para captura e transporte de CO₂; (iii) poços existentes, para injeção e monitoramento de possíveis vazamentos; (iv) estratégias de produção e/ou injeção; (v) direito de exploração sobre o solo/subsolo; (vi) proximidades de ocupações populacionais, e (vii) custos e viabilidade econômica.

Em países onde reservatórios de hidrocarbonetos são pouco acessíveis, estratos de carvão se apresentam como uma alternativa eficaz ao armazenamento geológico de CO₂. Nesses reservatórios não convencionais, a permeabilidade reduzida, bem como o fato de carvão adsorver preferencialmente o CO₂ a outros gases, aumentam a segurança da sequestração. Além disso, estas características possibilitam que o armazenamento seja realizado em menores profundidades com menor risco de vazamento (Barros et al. 2012).

Formações geológicas para armazenamento de CO₂ são geralmente selecionadas por terem condições de pressão e temperatura nas quais o CO₂ encontra-se no estado supercrítico ou, em alguns casos, líquido, necessitando, portanto, de menor volume para armazenamento do que na fase gasosa para uma determinada quantidade de gás. Dada a relação entre a densidade do CO₂ e os parâmetros de pressão e temperatura, ilustrada na Figura 14, isto significa que uma profundidade mínima de 800 m é necessária para armazenar CO₂ em aquíferos salinos e em reservatórios de óleo e gás despressurizados.

A profundidade exata dependerá da temperatura na superfície, do gradiente local de temperatura e das condições de formação da rocha (EASAC 2013).

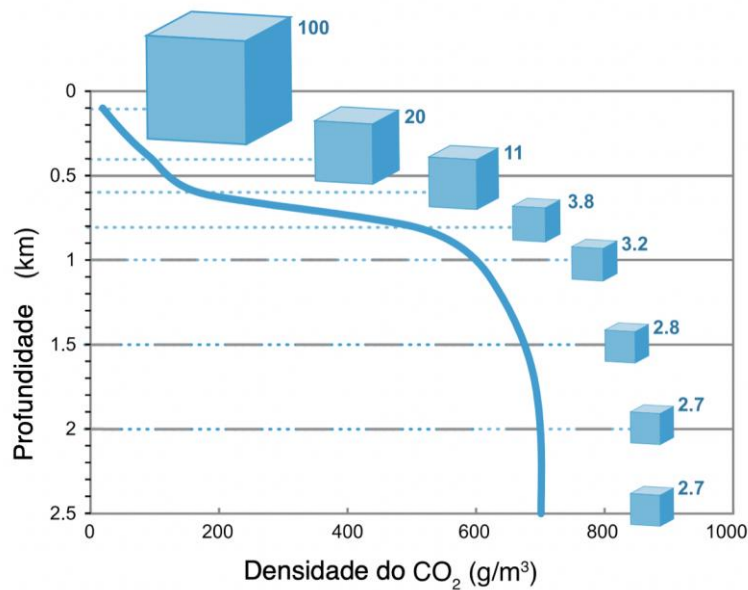


Figura 14 – Variação da densidade do CO₂ em função da profundidade, assumindo pressão hidrostática e gradiente geotérmico de 25°C/km e temperatura superficial de 15°C. A densidade do dióxido de carbono aumenta significativamente a aproximadamente 800 m de profundidade, quando o CO₂ passa para o estado supercrítico. Os cubos representam o volume relativo ocupado pelo CO₂. Em profundidades inferiores a 1,5 km, a densidade mantém-se praticamente constante (Modificado de Metz et al. 2005).

Uma vez injetado em aquíferos salinos e reservatórios de óleo despressurizados, o CO₂ irá se espalhar lateralmente, ao mesmo tempo em que sobe, uma vez que é mais leve que a água, que está presente em ambos os tipos de estruturas. Esse tipo de movimento de ascensão ocorre até que o CO₂ encontre uma camada selante com baixa permeabilidade (rocha de cobertura). Esse armazenamento promovido pela camada de baixa permeabilidade é chamado de aprisionamento estrutural ou estratigráfico, dependendo das condições de formação da rocha. Durante a movimentação do CO₂ dentro da formação rochosa, forças capilares aprisionam uma fração do CO₂ nos poros das rochas. Isto é chamado de aprisionamento residual (EASAC 2013).

Parte do CO₂ supercrítico dissolverá na água presente na formação rochosa (aprisionamento por dissolução). A dissolução do CO₂ tornará a solução mais densa, provocando a sua decantação. Ela também promove a acidificação da solução, o que pode causar reações químicas com as rochas circundantes, levando à dissolução de minerais instáveis e, potencialmente, à precipitação de materiais carbonatados em outras partes da

estrutura. Como resultado, parte do CO₂ pode ser incorporado na fase mineral (aprisionamento mineral) (EASAC 2013).

No armazenamento por carbonatação mineral, o dióxido de carbono é injetado em fraturas de rochas. Devido à carbonatação dos minerais ricos em silicatos, o carbono do dióxido de carbono reagiria com a composição da rocha formando novos minerais, dessa forma, fixando o CO₂ na estrutura de novos minerais formados a partir da sequestração. No entanto, este processo é demorado e possui altos custos associados, como ilustrado na Figura 15 (Lemos de Sousa et al. 2012).

A Figura 15 representa a contribuição desses mecanismos de aprisionamento em função do tempo, de acordo com o Metz et al. (2005). Trata-se de uma representação esquemática e as formas e escalas de tempo de cada uma das regiões neste diagrama de aprisionamento dependem das características da formação em questão.

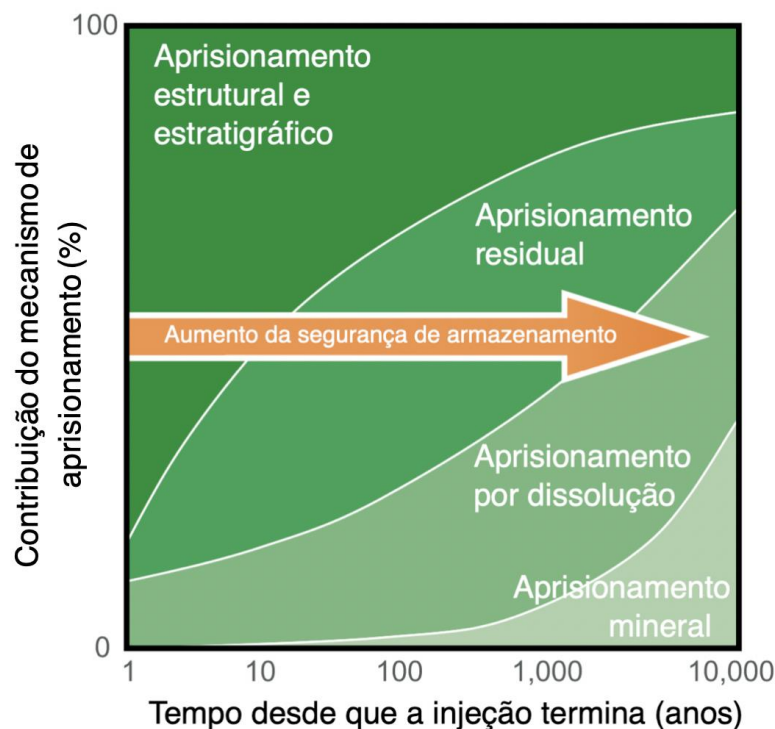


Figura 15 – A segurança de armazenamento depende da combinação de diversos mecanismos de aprisionamento (Modificado de Metz et al. 2005).

Os locais escolhidos para a sequestração geológica devem ser cuidadosamente escolhidos. Requisitos gerais para o armazenamento geológico do CO₂ incluem

apropriada porosidade, espessura e permeabilidade da rocha reservatório, capacidade selante da rocha de cobertura e um ambiente geológico estável (Leung et al. 2014). De forma geral, a porosidade da formação deve ser suficientemente elevada para garantir uma relação favorável entre o volume de gás carbônico armazenado e o volume da rocha, isto é, para garantir uma elevada área superficial. Já a permeabilidade deve ser suficiente elevada para que a injeção de CO₂ possa ser realizada em pressões que não danifiquem a rocha reservatório nem a rocha de cobertura. Entretanto, a rocha de cobertura deve apresentar baixa permeabilidade, de forma a evitar escape de CO₂. A integridade e continuidade da rocha de cobertura é bastante importante (EASAC 2013).

Além desses critérios, aspectos econômicos relacionados com a infraestrutura e as condições sócio-políticas também afetarão a escolha do local de armazenamento. Por fim, deve-se ressaltar que, apesar de as tecnologias para sequestração geológica poderem ser derivadas de processos já existentes, principalmente baseados em recuperação avançada de petróleo (EOR), não há qualquer experiência real em escala comercial já implementada e, os efeitos a longo prazo para armazenamento de grandes quantidades de dióxido de carbono é, também, limitado (Leung et al. 2014).

3.4. Utilização de CO₂

O atual cenário das CCS, que implica na inevitabilidade de lidar com o desafio global das mudanças climáticas, requer uma estratégia ampla para garantir sustentabilidade a longo prazo (Rodrigues et al. 2015). Nesse contexto, o *Carbon Sequestration Leadership Forum* (CSFL 2011), realizado em 23/09/2011, modificou o termo CCS para CCUS (*carbon capture, utilization and storage* – captação, utilização e armazenamento de CO₂), apoiado na percepção de que seria pertinente promover demonstrações e implementar projetos de pesquisa para usar, além de apenas armazenar permanentemente o CO₂, o que ajudaria a reduzir as emissões de CO₂ pelo homem (Rodrigues et al. 2015).

Algumas rotas de utilização do CO₂ foram investigadas em cenários totalmente diferentes e são apresentadas na Figura 16, que levam ao alcance de dois objetivos principais: reduzir as emissões atmosféricas de CO₂ e promover a geração de produtos, empregos e lucros (Rodrigues et al. 2015). Essas oportunidades para a utilização do

CO₂ captado podem servir como força motriz para o desenvolvimento de tecnologias de captação e estão relacionadas com a utilização desse gás como um recurso.

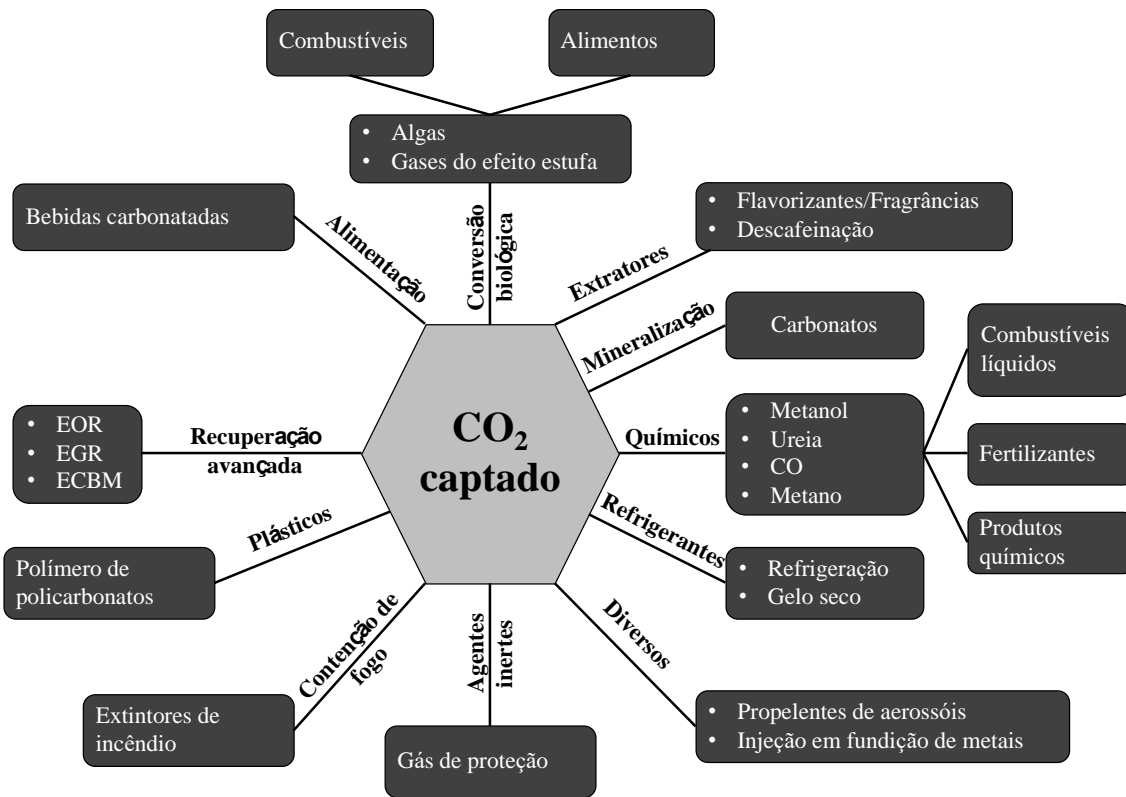


Figura 16 – Potenciais rotas de utilização do CO₂ (Modificado de Rodrigues et al. 2015).

Entre as aplicações que demandam grandes quantidades de CO₂ (da ordem de milhão de toneladas ao ano) inclui-se, por exemplo, a obtenção de bebidas gaseificadas e de produtos farmacêuticos. Entretanto, as quantidades envolvidas são relativamente pequenas sob a perspectiva de lidar com as mudanças climáticas: por exemplo, a indústria de bebidas usa aproximadamente 8 Mt CO₂ por ano, o que equivale a apenas 0,5% de todo o CO₂ que deveria ser captado e armazenado até 2030, para que o aumento de temperatura global seja inferior a 2°C (IEA 2016).

Assim, deve-se destacar que a maioria das potenciais utilizações do CO₂ apresentados na Figura 16 são, atualmente, implementados apenas em pequenas escalas, não resultando em redução real das emissões de CO₂. Por outro lado, reservatórios de óleo e gás despressurizados (cuja extração de óleo e gás pode ser aumentada por meio de técnicas de EOR e EGR – *enhanced gas recovery*, recuperação avançada de gás), camadas de carvão (cuja injeção de CO₂ pode ser utilizada para aumentar a extração de gás metano – ECBM – *enhanced coal bed methane*, recuperação avançada de metano em camadas de

carvão) e tecnologias relacionadas com o folhelho já se mostraram viáveis para o armazenamento permanente de CO₂ e, ao mesmo tempo, permitem intensificar a produção de grandes quantidades de óleo e gás, que podem ser utilizados como importantes fontes de energia (Rodrigues et al. 2015).

Para a injeção de CO₂ em reservatórios de petróleo para aumentar a recuperação de óleo (CO₂-EOR), são consumidos, atualmente, cerca de 70 Mt CO₂ anualmente, porém 2/3 dessa quantidade são provenientes de fontes naturais de dióxido de carbono. Essas quantidades poderiam ser substituídas por CO₂ captado de centrais industriais e, com a correta caracterização do local e seu monitoramento, o próprio reservatório poderia se configurar numa solução permanente para armazenamento do dióxido de carbono (IEA 2016).

3.5. Armazenamento de CO₂ em Camadas de Carvão

Os sistemas fechados destacados na Figura 13 podem ser subdivididos em duas categorias: reservatórios convencionais e reservatórios não convencionais. Os reservatórios de óleo e gás, os aquíferos salinos e a cavitação de sal são classificados, de uma forma geral, como reservatórios convencionais, enquanto as camadas de carvão e o folhelho são classificados como reservatórios não convencionais. Essa distinção é estabelecida levando-se em consideração propriedades geológicas, petrofísicas e químicas, que irão induzir capacidades distintas de armazenamento e de circulação do dióxido de carbono (Rodrigues et al. 2015).

Estas propriedades são atualmente usadas como parâmetros importantes na implementação das tecnologias CCS/CCUS, de forma a garantir a segurança do armazenamento do dióxido de carbono, tanto em relação a questões da saúde quanto a questões ambientais, a curto prazo (durante algumas décadas de monitoração de injeção e armazenamento) e a longo prazo (várias centenas a milhares de anos), a fim de se estabelecer como uma solução permanente e viável (Rodrigues et al. 2015).

O desempenho distinto do armazenamento e circulação de CO₂ em reservatórios convencionais e não convencionais é explicado pelo fato de que, na primeira categoria de reservatórios, o CO₂ é armazenado nos estados livre / absorvido e, conseqüentemente, o

processo de circulação é controlado por escoamento laminar. Já na segunda categoria de reservatórios (não convencionais), e principalmente nas camadas de carvão, o CO₂ é armazenado nos estados livre / adsorvido e dessorvido e a circulação de CO₂ obedece a dois diferentes processos: difusão e escoamento laminar (Rodrigues et al. 2015).

A Tabela 1 apresenta uma comparação entre alguns parâmetros geológicos de reservatórios convencionais e não convencionais, nos quais é importante destacar os mecanismos responsáveis pela armadilha e pela cobertura nos reservatórios não convencionais. Devido ao alto teor em matéria orgânica presente tanto nas camadas de carvão quanto no folhelho, os parâmetros geológicos, armadilha e cobertura, não têm papel relevante no processo de armazenamento nesses reservatórios, uma vez que em reservatórios ricos em matéria orgânica, o aprisionamento do CO₂ é alcançado principalmente por processos de sorção (Rodrigues et al. 2015).

Tabela 1 - Características de alguns importantes parâmetros geológicos em reservatórios convencionais e não convencionais (Modificado de Rodrigues et al. 2015).

Parâmetros geológicos	Reservatórios convencionais	Reservatórios não convencionais
Armadilha	Presente	Aprisionamento pela sorção na matéria orgânica (armadilha não é necessária)
Cobertura	Presente	Aprisionamento pela sorção na matéria orgânica (cobertura não é necessária)
Porosidade do reservatório	Alta > 10%	Baixa < 10%
Permeabilidade do reservatório	Alta > 100 mD	Baixa < 0,1 mB

Com base nas propriedades mencionadas acima, as camadas de carvão podem e devem desempenhar um papel importante na implementação de tecnologias CCS/CCUS. O elevado teor em matéria orgânica apresentado pelo carvão leva a uma elevada

capacidade de armazenamento de CO₂ de forma permanente e segura, razão pela qual esse tipo de reservatório tem sido considerado com uma das melhores soluções tecnológicas para a sequestração geológica de CO₂.

Historicamente, o carvão foi analisado e utilizado nas últimas duas décadas como reservatório de gás natural e CO₂, além de seu papel tradicional de combustível fóssil, que permite com que ele seja usado como um produto combustível em usinas de geração de energia. Entretanto, há minas de carvão com características, com destaque para alto teor em enxofre e metais pesados, que inviabilizam a exploração direta destas camadas de carvão para uso energético. Esses reservatórios são indicados para a utilização de sequestração pura de CO₂, uma vez que não seriam utilizados para a queima como combustíveis (Rodrigues et al. 2015).

Assim, neste novo cenário, o carvão deve ser estudado como uma rocha sedimentar única e altamente heterogênea em termos de composição e estrutura. Esse novo foco de estudo induz a dois sistemas distintos de porosidade: a estrutura microporosa (poros de carvão) e o sistema de fraturas (*cleat system* - rede natural de fraturas presentes no carvão) (Rodrigues et al. 2015). Esses dois sistemas distintos de porosidade são responsáveis pelos diferentes processos de armazenamento e circulação no carvão (Dinis 2010; Rodrigues 2002).

O armazenamento de CO₂ no interior da estrutura microporosa é controlado pelo processo de sorção, sendo responsável por 95-98% do armazenamento total de CO₂, enquanto a circulação é controlada por mecanismos de difusão (Dinis et al. 2010; Rodrigues e Lemos de Sousa 2002; Rodrigues et al. 2008). Já o processo de absorção é responsável pelo restante (2-5%) do armazenamento de CO₂, que ocorre na rede de fraturas naturais (Rodrigues et al. 2014), onde a circulação de CO₂ é realizada por meio de escoamento laminar.

A Figura 17 representa a circulação dos fluidos nas camadas de carvão em duas diferentes escalas: (i) escoamento laminar através do sistema de fraturas, (ii) difusão na matriz do carvão. O escoamento através da rede de fraturas do carvão (*cleat system*) decorre da variação de pressão no interior do sistema (litologia). Já a circulação de fluidos

no interior da matriz decorre da diferença em níveis de concentração de fluidos, relacionada com o processo de difusão (Busch e Gensterblum 2011).

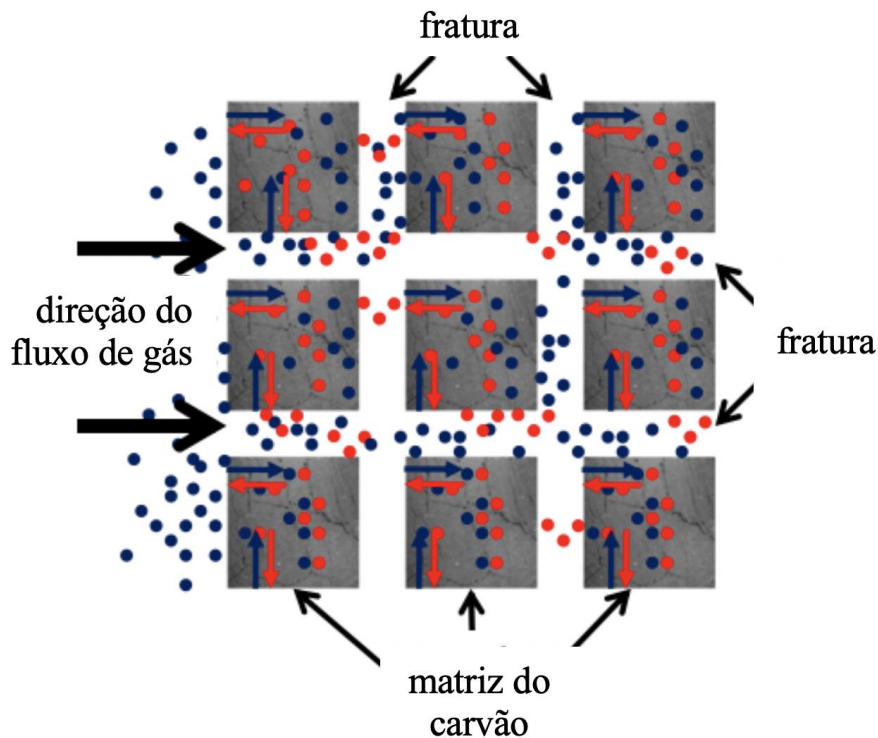


Figura 17 – Representação esquemática do sistema de fraturas (*cleat system*) e da matriz do carvão (ilustrado por meio de blocos), e da direção de fluxo dos fluidos presentes no sistema (Busch e Gensterblum 2011).

As camadas de carvão são, na prática, um meio poroso caracterizado por uma microestrutura única (Rodrigues e Lemos de Sousa 2002), que permite armazenar um volume de CO₂ superior ao do seu volume de poros. De fato, devido às propriedades adsorventes do carvão, o CO₂ é armazenado de forma heterogênea na estrutura dos poros. Isso significa que o CO₂ é armazenado principalmente nas áreas superfície interna dos poros em uma forma condensada, que é próxima do estado líquido. Por outro lado, em reservatórios convencionais, o CO₂ é armazenado de forma homogênea na rede de poros, o que significa que o volume de CO₂ armazenado depende do volume de poros disponível no reservatório (Rodrigues et al. 2015). Ou seja, o mecanismo para armazenamento em camadas de carvão é distinto, baseando-se principalmente na sorção do CO₂ na matéria orgânica do carvão. A quantidade de CO₂ que pode ser armazenada pelo carvão depende da pressão, da temperatura e das características petrográficas do carvão (por exemplo, grau de carbonificação do carvão, composição de macerais e teor em cinzas). Enquanto o aumento da pressão provoca o aumento da sorção, o aumento de temperatura provoca a

diminuição da sorção. Além disso, a porosidade e a permeabilidade do carvão geralmente decrescem com a profundidade (EASAC 2013). Segundo Hildenbrand et al. (2006), todos esses elementos implicam que a capacidade de sorção do carvão atinge um valor ótimo em torno de profundidades dos 1000 m. Para avaliar quantitativamente a capacidade de injeção de CO₂, são realizados estudos de pressão crítica de dessorção deste gás por meio da determinação das isotérmicas de Langmuir (Lemos et al. 2012).

Portanto, é possível concluir que a estrutura porosa do carvão deve ser analisada de maneira totalmente diferente da estrutura porosa dos reservatórios convencionais, já que, no caso das camadas de carvão, poros menores implicam maiores áreas de superfície internas e conseqüentemente maior capacidade de armazenamento. Já no caso de reservatórios convencionais, a maior capacidade de armazenamento é alcançada em reservatórios caracterizados por poros maiores, o que implica maiores volumes vazios (Rodrigues et al. 2015). A Figura 18 apresenta, de forma esquemática, a distinção entre camadas de carvão e os reservatórios convencionais, quanto ao tamanho dos poros em relação à capacidade de armazenamento.

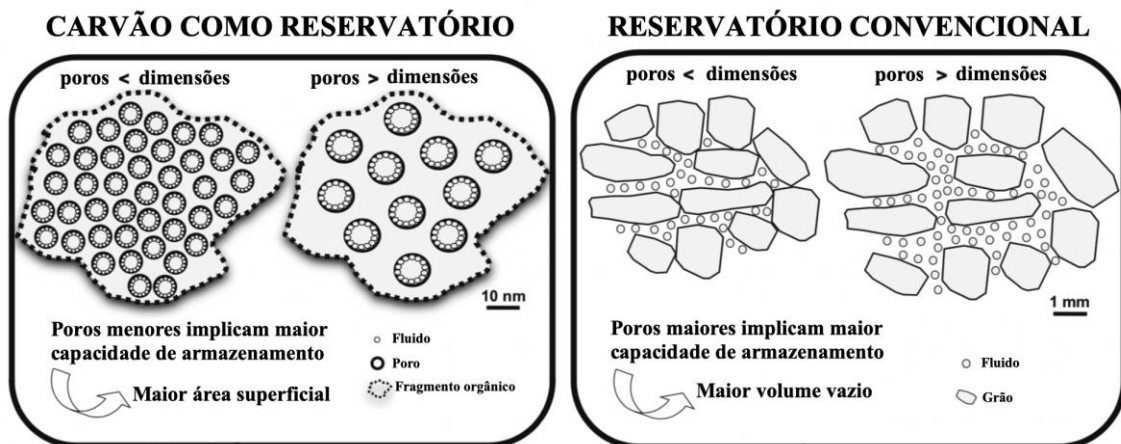


Figura 18 – Capacidade de armazenamento de um reservatório de carvão (reservatório não convencional) versus reservatório convencional (Modificado de Rodrigues e Lemos de Sousa 2008).

Deve-se ressaltar que, em ambos os casos (camadas de carvão e reservatórios convencionais), todos os processos anteriormente mencionados são inteiramente influenciados pelas condições de temperatura e pressão do reservatório, que implicam em fortes variações nas propriedades físicas e químicas do CO₂. Além disso, as capacidades de armazenamento e circulação em camadas de carvão são bastante complexas, muito além da simples medição do volume de poros e da compreensão do estado de sorção

condensado e do processo de difusão, pois tanto o armazenamento quanto os processos de circulação também dependem do tamanho dos poros (e, conseqüentemente, da composição de macerais, do teor em matéria mineral e do grau de carbonificação do carvão) e do teor em CO₂ do gás (Rodrigues et al. 2015).

O papel das camadas de carvão na implementação das tecnologias CCS/CCUS é óbvio quando se consideram as características de sorção inerentes ao carvão. No entanto, as camadas de carvão como reservatório de CO₂ apresentam algumas restrições relacionadas, principalmente, com a fase de injeção do CO₂. De fato, as camadas de carvão geralmente são caracterizadas por valores de permeabilidade baixos (Tabela 1), o que implica a aplicação de tecnologias avançadas durante o procedimento de injeção de CO₂. No entanto, esta (baixa permeabilidade) é justamente uma das razões que garantirão a permanência e a segurança do armazenamento geológico de CO₂ nas camadas de carvão. Outra restrição que deve ser considerada sempre que o carvão for apontado como solução para a sequestração geológica de CO₂ é o estudo dos efeitos de encolhimento e inchamento do carvão, que diminuem com o aumento do grau do carvão. De fato, esses efeitos são quase minimizados em carvões de grau elevado, o que coloca os antracitos em uma posição favorável em relação ao potencial para a sequestração geológica de CO₂ (Rodrigues et al. 2015).

3.6. Aplicações das Tecnologias CCS

O Painel de Mudanças Climáticas (Metz et al. 2005) trata a captura e armazenamento de CO₂ em reservatórios geológicos como um processo que consiste na separação do CO₂ emitidos por fontes relacionadas com a produção de energia de centrais industriais no transporte do CO₂ em seu armazenamento geológico retirando-o da atmosfera (Câmara et al. 2011). O CCS tem sido considerada uma opção para armazenamento geológico do dióxido de carbono. Esta tecnologia ainda requer grandes investimentos, mas acarretará vantagens competitivas para os países dentre eles o Brasil (Câmara et al. 2011). A injeção de CO₂ em reservatórios geológicos já é utilizada em alguns setores industriais como por exemplo, na indústria petrolífera, para a recuperação avançada de petróleo ou gás (EOR e EGR) com injeção de fluidos entre eles o dióxido de carbono.

O governo do Brasil se pronunciou duas vezes, junto a UNFCCC (*United Nations Framework Convention on Climate Change* - Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima), para adoção das CCS como MDL (Mecanismos de Desenvolvimento Limpo) elaborados no Protocolo de Kyoto, a primeira em 2007 e a mais atualmente em 2010 antes da realização da COP 16. desta forma, o Brasil não é contra o uso das CCS mas entende que estas tecnologias precisam de implantação e difusão incluindo a transferência das tecnologias CCS que já estão, pelo menos, em fase de demonstração sob a supervisão da UNFCCC. Assim, o Brasil entende que a aplicação de CCS em países desenvolvidos dependerá da maturidade técnica, custos de difusão e transferências de tecnologias e avaliações de questões ambientais (UNFCCC 2010).

Em 29 de Dezembro de 2009, após a realização da COP15, o governo brasileiro aprovou a Lei da Política Nacional de Mudança Climática, segundo a Lei aprovada, o Brasil adotará como compromisso nacional voluntário ações de mitigação e emissões dos gases com efeito de estufa (Brasil 2009). As atividades de CCS no Brasil tiveram o seu começo na indústria petrolífera, com a PETROBRÁS atuando neste cenário. Os primeiros testes se deram na Bacia do Recôncavo Baiano no Campo de Buracica com injeção de dióxido de carbono para recuperação avançada de petróleo (Lino 2005).

Outro setor produtivo brasileiro que também desenvolve atividade em pesquisa e desenvolvimento em CCS é a indústria de exploração de carvão representado pela Associação Beneficente da Industria Carbonífera de Santa Catarina (SATC) e Associação Brasileira de Carvão Mineral (ABCM), como também a Pontífice Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS). Espera-se que outros setores, tais como indústria de cimento e a petroquímica, também possam desenvolver tecnologias apropriadas para a diminuição de GEEs emitidos nestes setores.

3.6.1. Contexto Mundial

As tecnologias CCS descritas anteriormente são relativamente recentes. Seu marco inicial é considerado como sendo o projeto de armazenamento de CO₂ do campo de gás de Sleipner, na Noruega, em 1996. No entanto, desde a década de 1970, muito antes do desabrochar das discussões climáticas atuais, técnicas de captação e armazenamento de CO₂ já vinham sendo utilizadas em projetos de larga escala, em

conjunto com a exploração de petróleo e de gás natural. Se consideradas apenas as técnicas de captação do dióxido de carbono, os primórdios das tecnologias CCS remontam pelo menos à década de 1930, quando surge a necessidade de separação do CO₂ do gás natural como forma de cumprir as especificações para a venda e uso desse combustível fóssil (IEA 2016).

Nessa época, no entanto, embora houvesse algumas utilizações de pequena escala do CO₂ captado, quase todo o CO₂ separado era liberado na atmosfera. O primeiro uso em larga escala² ocorreu em 1972, por companhias de petróleo dos Estados Unidos. Em vez de lançar na atmosfera o dióxido de carbono captado em centrais de gás natural em Val Verde, Texas (EUA), essas empresas decidiram transportar o CO₂ por dutos até um campo de petróleo, para sua injeção, de forma a complementar as técnicas de recuperação avançada de petróleo (EOR) em uso no local. Este primeiro projeto de grande escala foi importante por ter servido de fundamento para os projetos futuros, ao ter demonstrado todos os componentes das técnicas de CCS (captação, transporte e armazenamento) e ter iniciado pesquisas sobre essas tecnologias, tanto por empresas interessadas na produção de petróleo como por instituições acadêmicas (IEA 2016).

A experiência de Val Verde convenceu outras empresas do setor de exploração de petróleo sobre a viabilidade das técnicas de EOR por meio da injeção de dióxido de carbono. Desse modo, dois grandes projetos aconteceram nos Estados Unidos: Enid Fertilizer em 1982, cuja fonte de CO₂ vinha de centrais de fertilizantes, e Shute Creek em 1986 (com dióxido de carbono de uma planta de processamento de gás natural). O foco desses projetos, no entanto, era a recuperação do petróleo, e não o armazenamento do carbono em si. O primeiro projeto cujo objetivo era o armazenamento dedicado de dióxido de carbono foi em Sleipner em 1996, sendo efetivamente usado para reduzir emissões no Mar do Norte norueguês (IEA 2016).

O projeto de Sleipner se insere no contexto mundial de baixa dos preços do gás e do petróleo de meados da década de 1980 até meados de 2000, o que não favorecia os grandes investimentos necessários a projetos de EOR com injeção de CO₂. Nessa

² Segundo o Global CSS Institute (2019a), projetos de larga escala são aqueles que envolvem a captação, transporte e armazenamento de dióxido de carbono, numa escala de pelo menos 800 kt anuais de CO₂, para usinas termelétricas a carvão, ou pelo menos 400 kt anuais de CO₂ para instalações industriais de outros tipos, incluindo usinas a gás natural.

conjuntura, em 1991, o governo norueguês introduziu uma taxa para o dióxido de carbono gerado *offshore* lançado na atmosfera, como forma de reduzir as emissões produzidas em *offshore* no país. Como a taxa incidiria sobre o dióxido de carbono separado do gás natural da reserva de Sleipner, o operador, Statoil, decidiu captar o dióxido de carbono produzido em plataformas *offshore* e injetá-lo em camadas geológicas de 700 m de profundidade, contendo arenito poroso preenchido com água salgada (IEAGHG 2014).

Usando a experiência de Sleipner, dois projetos dedicados de armazenamento de CO₂ associados ao processamento de gás natural foram desenvolvidos: In Salah, na Argélia, em 2004 e Snøhvit, na Noruega, em 2008. Ambos contam com sistemas de monitoramento abrangentes do dióxido de carbono armazenado, essenciais para aumentar a confiança sobre a permanência do CO₂ armazenado nas estruturas geológicas. As experiências pioneiras de Sleipner também serviram como guia para a Diretiva Europeia sobre armazenamento geológico de dióxido de carbono, em 2009 (IEA 2016).

Desde 2000, houve novo interesse no uso das CCS aliado às técnicas de EOR. Podem ser citados os projetos de Weyburn-Midale no Canadá, Century Plant, nos Estados Unidos, Utmaniyah, na Arábia Saudita e o projeto da Petrobras no Campo de Lula, no Brasil. A Tabela 2 lista todos os projetos de CCS em operação. O projeto CCS da Represa de Boundary, no Canadá, merece destaque por ser o primeiro projeto de larga escala em que o CO₂ é separado dos gases efluentes de uma usina termelétrica. É, também, a primeira usina a empregar a técnica de pós-combustão para a captação de CO₂ em escala comercial. Ademais, essa associação de geração de energia por combustíveis fósseis e CCS é uma das principais formas de redução de emissões no setor energético, sendo, portanto, um passo importante na direção do cumprimento das metas dos acordos climáticos (IEA 2016).

Tabela 2 – Projetos de CCS de larga escala no mundo atualmente em operação (Global CCS Institute 2019b).

Nome	País	Data de início de operação	Fonte de CO ₂	Capacidade de captação (Mtpa)
Terrell Natural Gas Processing Plant (antiga Val Verde Natural Gas Plants)	Estados Unidos	1972	Processamento de gás natural	0,4 – 0,5
Enid Fertilizer	Estados Unidos	1982	Produção de fertilizante	0,7
Shute Creek Gas Processing Plant	Estados Unidos	1986	Processamento de gás natural	7,0
Sleipner CO ₂ Storage	Noruega	1996	Processamento de gás natural	1,0
Great Plains Synfuels Plant and Weyburn-Midale	Canadá	2000	Gás natural sintético	3,0
Snøhvit CO ₂ Storage	Noruega	2008	Processamento de gás natural	0,7
Century Plant	Estados Unidos	2010	Processamento de gás natural	8,4
Air Products Steam Methane Reformer	Estados Unidos	2013	Produção de energia	1,0
Coffeyville Gasification Plant	Estados Unidos	2013	Produção de fertilizante	1,0
Lost Cabin Gas Plant	Estados Unidos	2013	Processamento de gás natural	0,9
Petrobras Santos Basin Pre-Salt Oil Field CCS	Brasil	2013	Processamento de gás natural	1,0
Boundary Dam Carbon Capture and Storage	Canadá	2014	Geração de energia	1,0
Quest	Canadá	2015	Produção de hidrogênio	1,0
Uthmaniyah CO ₂ -EOR Demonstration	Arábia Saudita	2015	Processamento de gás natural	0,8
Abu Dhabi CCS	Emirados Árabes	2016	Produção de ferro e aço	0,8
Illinois Industrial Carbon Capture and Storage	Estados Unidos	2017	Produção de etanol	1,0
Petra Nova Carbon Capture	Estados Unidos	2017	Produção de energia	1,4
CNPC Jilin Oil Field CO ₂ EOR	China	2018	Processamento de gás natural	0,60

O desenvolvimento das tecnologias CCS não se beneficiou apenas de projetos de grande escala. Um número elevado de projetos menores contribuiu e contribui de modo significativo para o entendimento das tecnologias CCS. Eles incluem: (i) sistemas de testes, que implementam os sistemas em escala de laboratório; (ii) centrais-piloto, que levam em conta todas as considerações operacionais de um projeto real, mas operam em apenas uma fração da escala comercial; e (iii) centrais de demonstração, que testam as tecnologias em escala comercial, já integradas com armazenamento geológico (IEAGHG 2014).

Esses projetos em pequena escala examinam várias técnicas de captação do CO₂ em várias indústrias, incluindo as de produção de cimento, ferro e aço. Exemplos incluem o projeto Tomakomai, no Japão, que capta e armazena o CO₂ de uma unidade de produção de hidrogênio, importante para mostrar a viabilidade das CCS no Japão; e o CO₂CRC Otway, na Austrália, o maior projeto de demonstração de armazenamento de CO₂ do mundo (IEA 2016). Um panorama geral de todos os projetos CCS no mundo (desde aqueles que se encontram em fase de concepção até aqueles implementados) encontra-se na Figura 19.

Além destes projetos, nos últimos 10 anos, centros de teste de captação de CO₂, como o Technology Centre Mongstad (Noruega), National Carbon Capture Centre e Sand Carbon Capture Test Facility (Estados Unidos da América), têm desempenhado um papel fundamental no desenvolvimento das tecnologias de captação por pós-combustão. Depois de validadas na escala de sistemas de testes, essas técnicas podem então ser aplicadas em escala comercial com maior confiabilidade. Outras técnicas de captação também se desenvolveram com o auxílio de projetos em escala menor, como os projetos piloto de Calide (Austrália), Schwarze Pumpe (Alemanha) e Lacq (França) (captação por oxi-combustão), a instalação Dakota Gasification (Estados Unidos da América) e o projeto Kemper County (Estados Unidos da América) IGCC (captação por pré-combustão). Novas técnicas também estão sendo testadas, como os ciclos de CO₂ supercrítico, *chemical looping combustion* para combustíveis sólidos, separação de CO₂ a baixas temperaturas com adsorventes sólidos e membranas poliméricas na pós-combustão (IEA 2016).

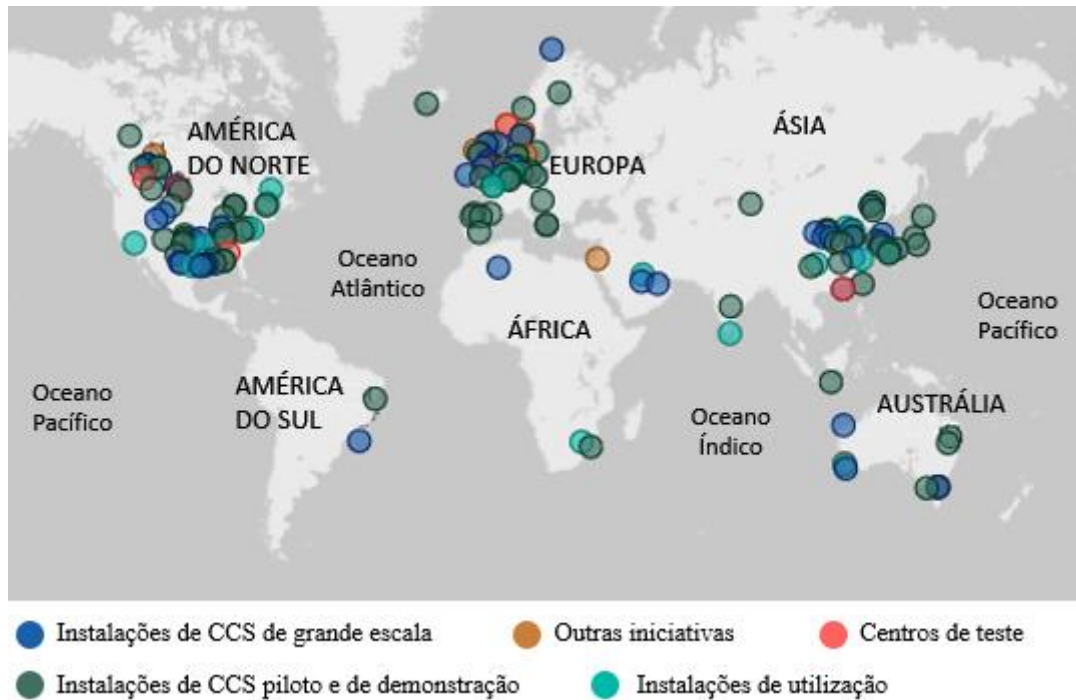


Figura 19 – Projetos CCS no mundo (Global CCS Institute 2019b).

Paralelamente à evolução dos projetos de CCS surgiram várias instituições e programas de pesquisa voltados para o estudo e promoção das tecnologias CCS. Em 1991, foi criado o IEA Greenhouse Gas R&D Programme (IEAGHG), um programa internacional de pesquisa voltado para o estudo de tecnologias que podem diminuir as emissões dos GEE produzidas por combustíveis fósseis, cujo foco atual é quase exclusivamente as tecnologias CCS. A principal instituição sobre o estudo das tecnologias CCS é o *Global CCS Institute* (GCCSI – Instituto Global de CCS), fundado em 2009, que desenvolve pesquisa sobre os desafios e o potencial das tecnologias CCS, reunindo governos, indústrias, comunidade acadêmica e sociedade civil. Podem também ser citados o *Carbon Capture Project*, criado em 2000; o *Carbon Sequestration Leadership Forum*, em 2003; CO₂CRC, em 2003; *Regional Carbon Sequestration Partnerships*, em 2003; CO₂GeoNet, em 2004; *European Technology Platform for Zero Emissions Fossil Power Plants*, em 2005; e o *Clean Energy Ministerial Carbon Capture, Use and Storage (CCUS) Action Group* em 2010 (IEAGHG 2014).

3.6.2. Contexto Brasileiro

No Brasil, as discussões sobre as tecnologias CCS tiveram início em 2006, quando pesquisadores da Universidade Fernando Pessoa (UFP), de Portugal, vieram ao país a convite da Petrobras para palestrar no CO₂: Seminário Internacional sobre Sequestro de Carbono e Mudanças Climáticas, em 2006. Em seguida, foi oferecido um Curso de Armazenamento de CO₂ em Camadas de Carvão, ministrado por esses pesquisadores na Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS) (Rodrigues e Lemos de Sousa 2018).

Isso culminou, em 2007, na criação do Centro de Excelência em Pesquisa e Inovação em Petróleo, Recursos Minerais e Armazenamento de Carbono (CEPAC), primeiro centro de pesquisa brasileiro dedicado exclusivamente à pesquisa sobre o armazenamento de CO₂. Esse centro, fruto de uma iniciativa conjunta da PUCRS (Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Brasil) com a Petrobras, foi consolidado e ampliado com a fundação do Instituto do Petróleo e dos Recursos Naturais (IPR), nessa mesma universidade, em 2014 (CEPAC 2019 e IPR 2019).

Esse interesse brasileiro no estudo das tecnologias CCS também esteve relacionado com a descoberta do pré-sal, em 2007. As descobertas de hidrocarbonetos em camadas rochosas do pré-sal, principalmente na Bacia de Santos, mas também em outras bacias adjacentes, alterou radicalmente o histórico produtivo da indústria petrolífera *offshore* brasileira. Até antes das descobertas do pré-sal, os campos petrolíferos *offshore* em rochas do pós-sal produziam óleos relativamente pesados (viscosos, com elevado teor em enxofre) e com baixo conteúdo em gases. Embora houvesse aplicação das tecnologias EOR com injeção de CO₂ desde 1987, no Campo de Buracica, em geral, a injeção de gases nos reservatórios não constituía uma estratégia dominante de recuperação secundária. Estes gases produzidos na recuperação eram utilizados em técnicas de recuperação avançada, como *gas lifting*, nas plataformas e como produto na exportação para mercados domésticos (Ferreira 2016).

Até 2008, quando se inicia a produção em grande escala do pré-sal, a quantidade de gás injetado, em relação ao total produzido, oscilou entre 1% e 3% (sendo 2005 o único ano atípico, com a injeção de gás superando os 10%). O próprio ambiente marítimo impõe

dificuldades e custos adicionais às tecnologias clássicas de EOR. Portanto, o número de aplicações continua bem inferior em campos *offshore*, quando comparados com práticas consagradas adotadas *onshore* (Ferreira 2016).

Nos projetos de desenvolvimento do pré-sal, adota-se, desde o início, a premissa de não se ventilar as elevadas produções de CO₂ associadas ao petróleo e gás natural. A opção adotada tem sido de se reinjetar correntes de gás ricas em CO₂ nos reservatórios, cujas condições têm favorecido a miscibilidade do gás injetado, favorecendo as elevadas produtividades nos poços produtores (Ferreira 2016).

Desta forma, a um mesmo tempo, graças às estratégias de desenvolvimento no pré-sal, o Brasil desponta como precursor na adoção em grande escala de projetos de EOR e de CCS em ambiente marítimo de águas profundas e elevadas distâncias das costas. De fato, o primeiro projeto de grande escala no mundo de CCS *offshore* em águas profundas com EOR por injeção de CO₂ é o da Bacia de Santos, operado pela Petrobras desde 2013. Dez sistemas de separação e injeção de CO₂ em unidades FPSO (*floating production, storage, and offloading* – unidades flutuantes de armazenamento e transferência) captam o dióxido de carbono do gás natural produzido na Bacia de Santos (5000 a 7000 metros abaixo do nível do mar), comprimindo-o e injetando-o diretamente nos campos de Lula, Sapinhoá e Lapa para fins de recuperação avançada de petróleo (Global CCS Institute 2019b, Global CCS Institute 2015).

Entre as bacias brasileiras, aquelas em que se localizam as reservas de petróleo *offshore* (Bacias de Campos e de Santos) são as que apresentam a maior prospectividade para armazenamento de CO₂ em campos de petróleo e gás (Ketzer et al. 2015). Ao considerar o volume já extraído de hidrocarbonetos, como determinante do volume injetável de CO₂, esses autores concluíram que a Bacia de Campos é a que apresenta maior potencial para armazenamento em campos petrolíferos despressurizados. Além disso, listada entre as com maior potencial, a Bacia de Santos já possui armazenamento de dióxido de carbono em grande escala. De fato, mais de 3 milhão de toneladas de CO₂ foram reinjetados para fins de recuperação avançada, apenas em 2015, nos Campos de Lula e Sapinhoá (Petrobras 2016).

Antes do desenvolvimento do pré-sal, as iniciativas brasileiras no setor do CCS, inclusive em ambientes *onshore*, eram igualmente limitadas, assim como em grande parte dos países do hemisfério sul do planeta. Ferreira (2016) aponta a realização de três projetos de injeção de CO₂, em iniciativas de EOR em campos localizados no Recôncavo da Bahia (Buracica, Rio Pojuca e Miranga). Nesses projetos, utilizaram-se os gases emitidos no Complexo Petroquímico localizado na região (Câmara et al. 2011).

Ao longo da próxima década, continua incerto o papel que o Brasil deverá exercer no emergente setor das CCS. Embora, o país seja grande produtor de aço e cimento, as discussões permanecem praticamente ausentes juntos às grandes indústrias e aos operadores do setor elétrico (inclusive geradores térmicos). Alguns avanços são registrados no plano das pesquisas e desenvolvimento tecnológico, com o intuito de se conceber e materializar projetos-piloto relevantes e com grande visibilidade (IEA 2016).

Destacam-se, entre essas iniciativas, ações em fases iniciais de concepção, promovidas pelo setor sucroalcooleiro para a incorporação de BECCS (*Bio-energy with carbon capture and storage*, bio-energia com capta e armazenamento de dióxido de carbono), em conjunto com instituições acadêmicas. Na Universidade de São Paulo, sob o patrocínio da FAPESP e da Shell, foi criado em 2016 o Research Center for Gas Innovation (RCGI), cujo programa de pesquisa voltado para os temas de abatimento de CO₂ tem como principal objetivo idealizar cavernas de sal de grandes dimensões construídas no pré-sal para armazenamento permanente de CO₂ produzidos nos campos petrolíferos *offshore* do pré-sal e que, atualmente, está sendo reinjetado nas formações rochosas (RCGI 2019).

Para além do pré-sal, o Brasil possui outras regiões que podem se beneficiar da aplicação das tecnologias CCS. Ketzer et al. (2015) realizaram um levantamento do potencial das bacias sedimentares brasileiras para armazenamento de CO₂. Essa avaliação produziu o primeiro Atlas Brasileiro de CCS, o qual classificou as bacias, segundo sua prospectividade, em alta, média ou baixa (Figura 20). As bacias de alta prospectividade para armazenamento do dióxido de carbono estão localizados na faixa litorânea do eixo Sul-Sudeste (Bacias do Paraná, de Campos e de Santos), e no Nordeste (Bacias Potiguar e do Recôncavo). Esse potencial está, principalmente, associado à alta produção de hidrocarbonetos e/ou presença de campos de petróleo e gás despressurizados e, no caso

da Bacia do Paraná, à ocorrência de formações salinas profundas e depósitos de carvão. De fato, a capacidade de armazenamento em aquíferos salinos da Bacia do Paraná foi destacada por Machado (2013) como a maior entre os possíveis reservatórios brasileiros.



Figura 20 – Bacias sedimentares brasileiras classificadas de acordo com o potencial de armazenamento de CO₂ (Ketzer et al. 2015).

Para esta pesquisa, o ponto focal constitui-se na avaliação das camadas de carvão da Bacia do Paraná e seu potencial para o armazenamento de CO₂. A determinação da capacidade dessas camadas para CCS (com ou sem CBM - *Coal Bed Methane*, Metano do Carvão em Camada) é derivada da comparação de resultados empíricos obtidos na etapa experimental desta pesquisa com aqueles encontrados na literatura (Corrêa da Silva

e Wolf 1978; Nahuys e Piatnicki 1984; Kalkreuth et al. 2010; da Costa et al 2014). As principais reservas de carvão na Bacia do Paraná encontram-se, principalmente, na Formação Rio Bonito (Kalkreuth et al. 2008), localizada nos Estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul (Figura 21).



Figura 21 – Localização de depósitos de carvão mineral nos Estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul (Kalkreuth et al. 2008).

Segundo estudos feitos por Kalkreuth et al. (2008) e Holz et al. (2010), a reserva da Bacia do Paraná que contém o maior potencial em CBM é a de Santa Terezinha, localizada a nordeste do Rio Grande do Sul. Esse potencial é explicado pela distribuição das camadas de carvão, sua extensão e espessura, profundidade e características do carvão (betuminoso altamente volátil) (Kalkreuth et al. 2008). O volume aproximado de gás metano contido nessas camadas de carvão pode chegar aos 5,5bilhão de metros cúbicos (dos Santos e Kalkreuth 2014; Kalkreuth et al. 2008; Weniger et al. 2010). Outro estudo de amostras coletadas na reserva carbonífera de Charqueadas - Santa Rita por Santarosa (2012), apresentaram baixo potencial para CBM.

O potencial de armazenamento de dióxido de carbono em camadas de carvão na Bacia do Paraná pode ser aproveitado pela presença de várias usinas termelétricas a carvão localizadas na Região Sul. Projetos-piloto chineses (Leung 2014; Li 2014; Sun 2017) já exploraram essa possibilidade, conectando técnicas de CCS às atividades de usinas termelétricas a carvão. Outras indústrias com grandes emissões de GEE que poderiam constituir-se como fontes de CO₂ para captação e armazenamento nas camadas de carvão da Bacia do Paraná são a cimentícia, siderúrgica, e de papel e celulose.

Diversos fabricantes de cimento encontram-se próximos às minas e usinas termelétricas a carvão da Região Sul para aproveitar as cinzas provenientes da queima do carvão nas usinas como insumo para as suas atividades (Santos 2017). Na indústria siderúrgica, três grandes usinas estão instaladas na região Sul (Instituto Aço Brasil 2015): as usinas de Charqueadas e Riograndense localizam-se no Rio Grande do Sul e a usina de Guaíba localiza-se no Paraná.

Há, portanto, oportunidades de integração sinérgica dessas atividades com o armazenamento de dióxido de carbono em camadas de carvão. Havendo camadas de carvão não mineráveis (ou com CBM), que se encontram nas proximidades dessas regiões, a mineração de outros carvões proveria o produto combustível para as usinas termelétricas, as quais gerariam dióxido de carbono para armazenamento e cinzas para a indústria cimenteira, que, por sua vez, emite volumes de dióxido de carbono também passíveis de sequestração e armazenados nas camadas de carvão não mineráveis (Oliveira 2016). A captação de CO₂ nessas usinas vem inclusive se tornando cada vez mais uma imposição, diante da necessidade de mitigar suas emissões dos gases com efeito de estufa em face de regulações ambientais progressivamente mais rígidas (Santos 2017).

CAPÍTULO 4 – O CARVÃO NO MUNDO E NO BRASIL

Uma das possíveis formas de exploração das reservas de carvão é a sua utilização como reservatório geológico de dióxido de carbono. Para que a discussão acerca dessa forma de exploração seja feita, se faz necessária a contextualização deste recurso no cenário energético mundial, bem como compreender o seu papel estratégico. Neste sentido, este capítulo abordará os contextos mundial e brasileiro do carvão, considerando as reservas e produção, as quais caracterizam a oferta, e a sua demanda, bem como as perspectivas futuras do carvão como recurso energético.

4.1. No Mundo

O interesse no carvão mineral³ como recurso energético não é recente. Siefertle (2001) e Dodson et al. (2014) sintetizam uma longa história carvoeira mostrando que esse combustível fóssil tem sido queimado para obtenção de energia na forma de calor desde a Idade do Bronze. Os romanos exploravam o carvão bretão desde o 2º século D.C., negociando-o pela Europa, onde era usado para aquecimento em banheiros públicos e bairros ricos das grandes cidades. Mais tarde, durante o século XII, o carvão foi insumo energético da intensa metalurgia chinesa. No século seguinte, o uso do carvão por artesões chegou a ser proibido em Londres devido à poluição provocada quando da sua combustão. Desde então as técnicas de mineração evoluíram, como é o caso da extração mineira em bancadas, permitindo que reservas mais profundas fossem exploradas. Foi durante o século XVIII, um período conhecido como a Revolução Industrial, que seus usos metalúrgicos e energéticos se disseminaram. Isso se deveu, principalmente, às máquinas que possibilitaram a conversão da energia química contida no carvão em energia

³ Muitos autores passaram a utilizar a terminologia “*mineral*” para o carvão em substituição a *fóssil*. Essa classificação moderna será priorizada nesta Tese nas referências ao carvão como recurso energético de fonte fóssil.

mecânica, como o motor a vapor de James Watt, desenvolvido entre 1767 e 1776 (Clark 2007). Os avanços da Revolução Industrial, posteriores a esse período, estiveram relacionados com a disponibilidade do carvão como combustível, pois esse produto energético era o principal produto combustível.

Ao final do século XVIII, os depósitos superficiais de carvão encontravam-se exauridos, fato esse que levou ao desenvolvimento de técnicas de exploração de depósitos mais profundos, como é o caso dos sistemas de ventilação alimentados por motores a vapor. A crescente produção neste período permitiu que novas aplicações fossem desenvolvidas para o recurso: no início do século XIX, as ruas de Baltimore, no Estados Unidos da América do Norte, foram iluminadas com gás combustível produzido a partir do carvão. No final deste século, em 1882, Thomas Edison construiu a primeira usina de geração de energia elétrica a carvão nos Estados Unidos da América do Norte (World Coal Institute 2005). Em seguida, com a utilização crescente do carvão na geração elétrica, sua importância estratégica alcançou um novo patamar. O carvão substituiu a madeira em função da escassez da mesma e devido à sua facilidade em transporte. Sendo assim, conclui-se que a evolução da cadeia produtiva do carvão está associada ao desenvolvimento de equipamentos e técnicas que viabilizaram a exploração de minas cada vez mais profundas, e também ao surgimento de alternativas no seu uso final.

Embora alternativas ao emprego termelétrico do carvão tenham sido desenvolvidas e aplicadas durante o século XX, esse recurso ainda mantém uma importante posição estratégica no cenário energético mundial, contabilizando 27,1% da energia primária e 38,4% da energia elétrica em 2018 (IEA 2018a).

Comparativamente a outros combustíveis fósseis, como petróleo e gás natural, o carvão apresenta, entre suas vantagens, a maior estabilidade de preços. Por exemplo, o preço do carvão variou entre US\$40 e US\$60 por tonelada nos mercados chinês, europeu e norte-americano, em quase a totalidade dos anos entre 2001 e 2016, exceto por dois picos (em 2008 e 2011) (BP 2017). Por outro lado, entre as desvantagens do carvão em relação aos outros dois combustíveis fósseis anteriormente citados, assinala-se que sua combustão emite maiores volumes de poluentes e dos GEE, entre eles: dióxido de enxofre, óxidos de nitrogênio, monóxido de carbono e material particulado (EIA 2013). Segundo Lemos de Sousa et al. (2012), o desenvolvimento de tecnologias limpas (ou, do

inglês, *Clean (Cleaner) Coal Technologies*), tem permitido a utilização deste produto energético em condições ambientais aceitáveis, principalmente se complementadas com as tecnologias CCUS.

Assim sendo, o carvão deve ser considerado como um importante componente dos sistemas energéticos no século XXI. No entanto, segundo World Energy Council (2019), o cenário para o carvão é incerto, pois depende dos desenvolvimentos energéticos em relação ao uso dos combustíveis fósseis mais utilizados, sendo eles o petróleo e o gás natural. O setor energético sofrerá fortes influências nos âmbitos econômico, político e social além do tecnológico. Em setembro de 2019, o *24th World Energy Congress* pretende reunir líderes mundiais relacionados com a discussão energética mundial, em Abu Dhabi. Esta reunião tem como propósito elaborar novas oportunidades de crescimento para acelerar a transição de energia, que utilizam combustíveis fósseis para a produção de energias renováveis, em uma era de inovação. A previsão deste grupo para um cenário energético em 2040, proposto por World Energy Council (2019), destaca seis tendências: (i) desaceleração do crescimento da demanda global de energia; (ii) eletrificação acelerada; (iii) maior diversidade na matriz energética global; (iv) pico de demanda global para carvão e petróleo; (v) um importante papel intermediário para o gás natural; e (vi) participação crescente de energias renováveis.

4.1.1. Demanda

Impulsionado pelo aumento da população global, que praticamente dobrou nos últimos 50 anos, de 3,713 bilhão, em 1970 (Census 2012), para 7,715 bilhão previstos, em 2019 (UNFPA 2019), e pela expectativa na melhoria da qualidade de vida da população, a demanda mundial de energia apresentou nesse período um crescimento constante, aumentando de aproximadamente 6,000 Mtep (Milhão de tonelada de petróleo equivalente), no início da década de 1970, para mais de 13,511 Mtep, em 2017, o que corresponde a um aumento de 125% (BP 2018). A Figura 22 ilustra esse quadro de evolução do consumo de energia primária no mundo.

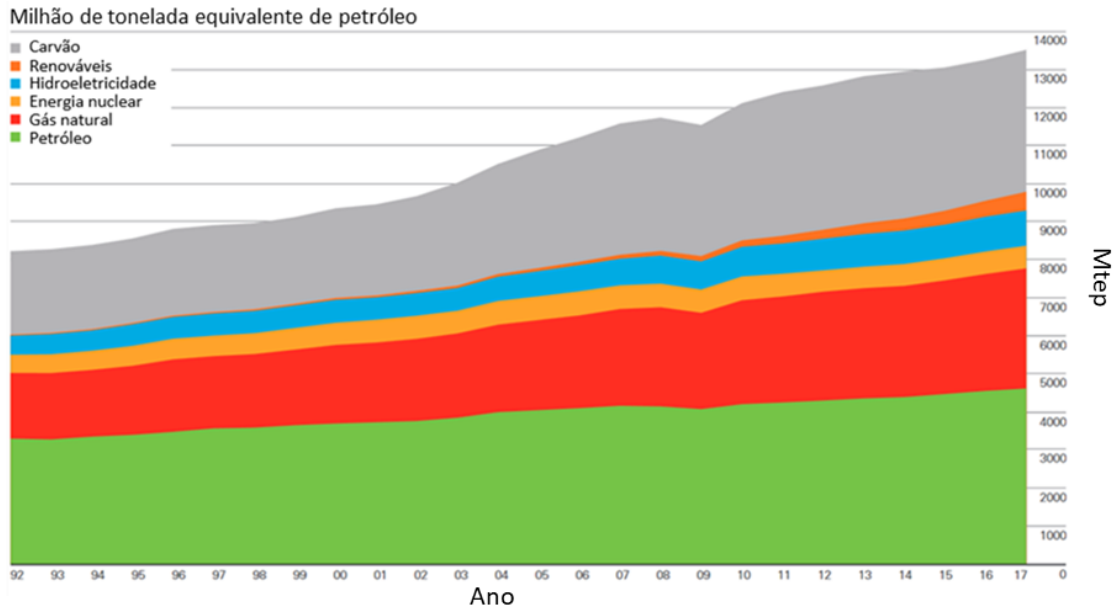


Figura 22 – Consumo mundial de energia primária por ano. Modificado de BP 2018.

Atualmente, mais de um quarto da energia primária do mundo é obtida a partir do carvão (IEA 2018a). A principal finalidade do carvão está relacionada com a geração de eletricidade em usinas termelétricas e a geração de energia térmica (calor) por meio da queima. De acordo com esta segunda finalidade, o carvão é utilizado em aplicações industriais para a geração de calor na produção de cerâmicas, fabricação de vidro e em secagem de produtos (ANEEL 2014). No mundo inteiro, grande parte do carvão produzido é usado para a geração de energia elétrica. As termelétricas localizam-se próximas às minas de extração de carvão, de modo a reduzir os custos de transporte (Tolmasquim 2016). A Figura 23 apresenta a comparação do consumo mundial de carvão por utilização final entre 1973 e 2016.

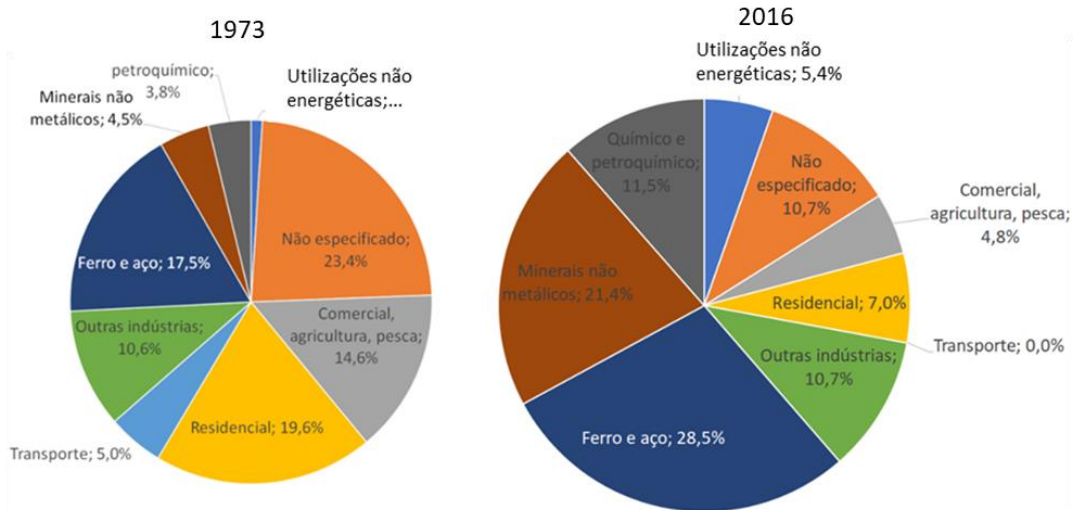


Figura 23 – Consumo mundial de carvão por utilização final em dois períodos. Os valores não especificados são relacionados com a indústria, transporte entre outros (valores em Mtec) (Modificado de IEA 2018b).

Em 2017, o consumo global de carvão, em termos de energia, aumentou 1,0% ou 50,4 milhão de tonelada de carvão equivalente (Mtec), já que o consumo da OCDE diminuiu em 8,2 Mtec (0,6%), e os países não membros da OCDE aumentaram o consumo em 58,6 Mtec (1,4%). O novo nível de consumo de carvão da OCDE, de 1257,4 Mtec, foi o nível mais baixo desde 1979 e foi 24,4% inferior ao consumo máximo de carvão dos países da OCDE de 1664,0 Mtec em 2007 (Figura 24).

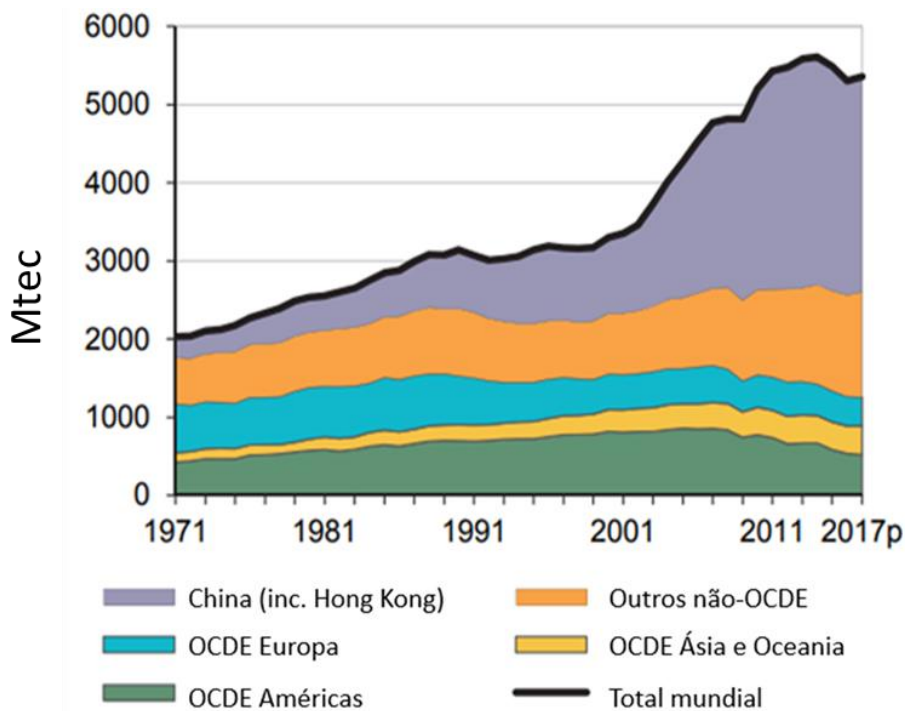


Figura 24 – Consumo mundial de carvão (Mtec) (IEA 2018a).

Apesar do discreto aumento no consumo do carvão registrado em 2017, as projeções, discutidas na introdução desta Tese, apontam para uma queda de demanda durante o século XXI, principalmente devido à substituição de usinas termelétricas a carvão por usinas a gás natural e, também, por fontes renováveis na geração de eletricidade. Este fato já se observa nos Estados Unidos da América, onde o atual declínio estrutural da industrial carvoeira está diretamente relacionado com o fechamento de usinas termelétricas a carvão e, também, por sua substituição para o gás natural (Wamsted et al. 2019).

O pico da capacidade termelétrica a carvão, nos Estados Unidos da América, foi registrado em 2011, com 318 GW instalados. Desde então, até 2019, 75 GW dessa capacidade foram removidos do parque gerador americano, e mais 18 GW devem sair até 2024 (Wamsted et al. 2019). Esta queda é explicada pela redução da produção dessas usinas, evidenciando que este tipo de usina termelétrica está ficando cada vez menos competitiva, abrindo espaço para outras fontes de energia, como o gás natural mencionado anteriormente. Partindo deste fato, a EIA (2019) projeta que essa tendência continue provocando uma queda da participação do carvão na matriz elétrica americana de 24% (média), em 2019, para 22% (média), em 2020.

Entre os principais fatores indicados para este declínio estão: (i) a disponibilidade e o baixo custo de gás natural (graças ao gás de folhelho); (ii) a redução dos custos envolvidos na geração de energia elétrica por fontes renováveis, especialmente solar e eólica; (iii) mudanças na operação de distribuição do sistema elétrico, graças à construção de novas usinas; (iv) crescente interesse corporativo em fontes renováveis e práticas de desenvolvimento sustentável; e (v) crescente preocupação com as mudanças climáticas e as emissões de dióxido de carbono (Wamsted et al. 2019).

As projeções da BP (2018) e da EIA (2019), discutidas anteriormente apresentam um cenário de transição, no qual o gás natural aumenta a sua participação na matriz energética, tanto para sustentar a nova demanda energética (oriunda do crescimento econômico e populacional), quanto substituir o carvão como parte da matriz energética. A queda da capacidade das usinas termelétricas a carvão, assim como o seu fechamento ou troca de combustível, têm impacto direto na demanda de carvão. Dessa forma, o processo de transição, em funcionamento nos EUA, pode ser compreendido como uma

tendência para o restante do planeta. Ressalta-se, porém, que o contexto regional facilitou essa transição no caso americano: a disponibilidade de gás natural proveniente das reservas de gás de folhelho atraiu investimentos para a construção de novas usinas termelétricas a gás, com ciclo combinado (Wamsted et al. 2019).

4.1.2. Oferta

Atualmente, a matriz mundial de energia primária baseia-se em combustíveis fósseis (petróleo, carvão e gás natural), que representam mais de 80% de toda a energia primária consumida no mundo. Na Figura 25, construída a partir de dados da IEA (2018b, 2019), é apresentada a distribuição do fornecimento de energia primária, entre 2016-2017, considerando, nesse comparativo, quatro níveis de consumo: o Mundo, a OCDE, a União Europeia e o Brasil.

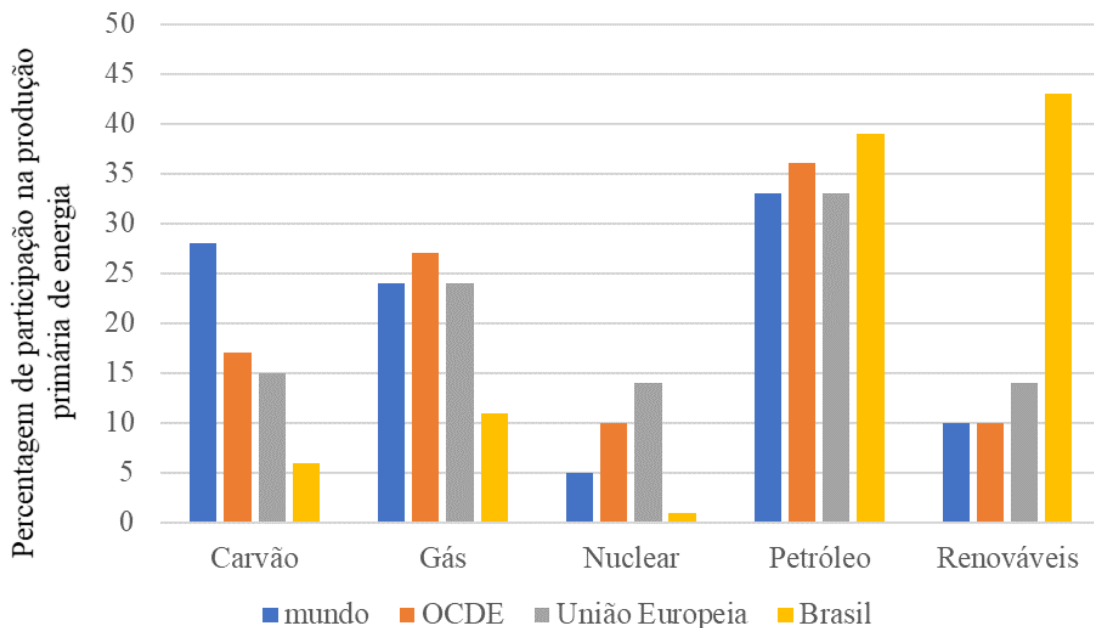


Figura 25 – Composição da energia primária em 2016-2017, representando as principais fontes primárias (petróleo, carvão, gás natural, energia nuclear e energias renováveis) e quatro níveis de consumo: Mundo, OCDE, União Europeia e Brasil.

O período representado na Figura 25 representa grandes mudanças na demanda mundial de carvão, voltada principalmente para aplicações metalúrgicas e industriais, em detrimento do uso residencial. Esse período também marcou mudanças na oferta desse recurso, onde as restrições ao consumo, decorrentes de impactos ambientais,

influenciaram a aplicação de novas tecnologias e o desenvolvimento de novas regulações, a começar pela mineração (Lemos de Sousa et al. 2012).

O processo de mineração do carvão mineral pode ser subterrâneo ou a céu aberto, dependendo da profundidade e do tipo de solo, sob o qual o material se encontra. Caso a camada de rocha ou solo sobrejacente ao depósito de carvão seja pouco espessa, ou de reologia inapropriada à perfuração de túneis – como o caso de areia e cascalho – opta-se pela mineração a céu aberto. Caso contrário, perfura-se a rocha para a construção de túneis para acessar a camada minerável, como apresentado na Figura 26 (Thompson 2005).



Figura 26 – Foto da Mina Lauro Muller, Santa Catarina, Brasil, onde a extração do carvão é realizada pela construção de túneis.

As reservas mundiais de carvão são capazes de suportar o ritmo de produção atual por mais de um século (BP 2017). Estados Unidos da América (251,5 bilhão de toneladas), China (244 bilhão de toneladas) e Rússia (160,3 bilhão de toneladas) concentram as maiores reservas mundiais. No entanto, o maior produtor é a China, desde

o ano de 1985, com uma produção total de carvão de 3376,1 bilhão de toneladas em 2017, 107,9 bilhão de toneladas 3,3% a mais que em 2016 (IEA 2018a). Os Estados Unidos da América são o 2º maior produtor de carvão do mundo. Depois de um declínio de oito anos desde 2008, a produção de carvão nos Estados Unidos da América aumentou para 702,3 bilhão de toneladas em 2017, um aumento de 6,3% comparado com os níveis de 2016.

Desde o ano 2000, a produção de carvão da China aumentou 149,2%. Já a produção total dos países da OCDE diminuiu em 14,7% em relação ao mesmo período. A queda de 185,2 bilhão de toneladas nestes países, em 2016, foi o maior declínio anual identificado. A parcela da produção de carvão da OCDE, na produção global, caiu de 56,6%, em 1971, para 23,4%, em 2017 (IEA 2018a).

A produção mundial de carvão diminuiu pela primeira no século XXI, em 2014. Esse declínio prosseguiu em 2015 e 2016 (Figura 27). No entanto, a tendência mudou em 2017, mostrando um aumento de 3,1%, equivalente a 225 bilhão de toneladas (IEA 2018a). Apesar destas mudanças, existem, atualmente, apenas dez produtores de carvão que produzem mais de 100 bilhão de toneladas/ano (IEA 2018a).

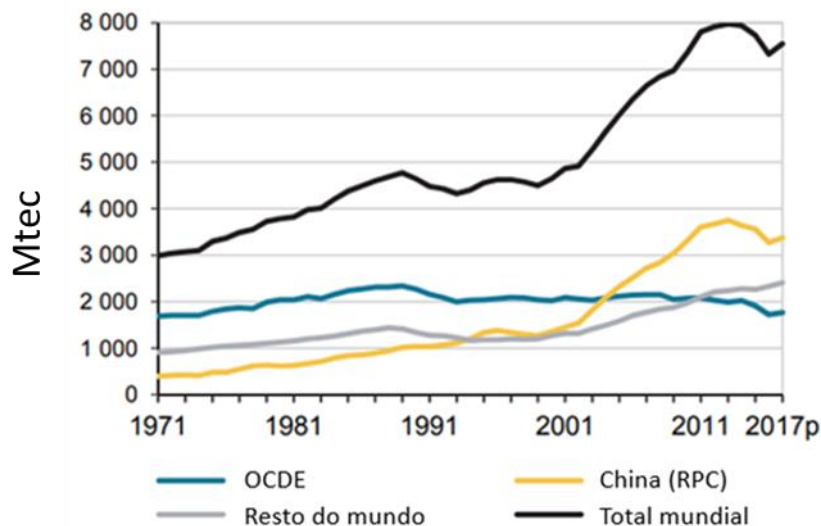


Figura 27 – Produção mundial de carvão por região (IEA 2018a).

O crescimento da produção de carvão, em cada região do planeta, tende a acompanhar o ritmo de crescimento econômico dos países consumidores da mesma região. Como a maior parte da produção é de carvão-vapor (ou térmico), isto é, carvão mineral betuminoso com teor em carbono superior a 80%, o qual é empregado para fins

industriais e de geração de eletricidade, o crescimento econômico gera demanda por energia e, conseqüentemente, maior aporte de recursos nessa indústria extrativa. A produção dessa indústria cresceu rapidamente para atender à demanda mundial, a qual cresceu 64%, entre 2000 e 2014 (World Energy Council 2016). Nesse contexto, espera-se que a participação do carvão continue relevante até a metade do século (World Energy Council 2016).

4.2. Contexto Brasil

A matriz energética brasileira possui uma variedade de fontes, dentre elas, o carvão, cana-de-açúcar, petróleo e gás natural. Com o escopo de caracterizar a evolução do consumo brasileiro, De Freitas e Kaneko (2011) apresentaram o consumo energético no país no intervalo de 40 anos, entre 1970 e 2009, separando por fontes de alto e baixo teor em dióxido de carbono (Figura 28). É possível observar que o período destacado foi marcante para o consumo de carvão, o qual cresceu nesse período, especialmente na década de 1980. As usinas termelétricas a carvão de Jorge Lacerda III, inaugurada em 1979, e Jorge Lacerda IV, inaugurada em 1997, ambas ainda em operação, contribuíram para esse robusto crescimento do consumo (ANEEL 2019).

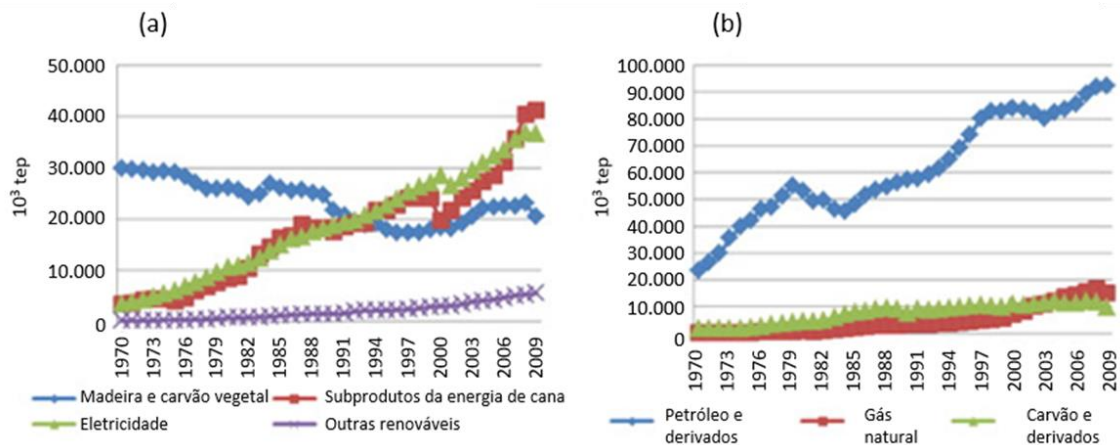


Figura 28 – Consumo de energia no Brasil por fonte, entre 1970 e 2009. Sendo (a) índices de fontes de conteúdo com baixas emissões de dióxido de carbono e (b) fontes de alta emissões de dióxido de carbono. (Modificado de Freitas e Kaneko 2011).

O Brasil está entre as 15 maiores reservas mundiais de carvão mineral, mas está em 26º no que diz respeito à produção, sendo o único país entre os maiores em reservas que não se encontra entre os maiores produtores. Isso se deve, principalmente, ao fato de

que os contextos econômico e regional não permitem um escoamento eficiente do carvão produzido na região Sul para as outras regiões do país (CGEE, 2012).

O carvão brasileiro possui duas principais funções: geração de energia elétrica, incluindo o uso energético industrial e na produção de coque, ferro-gusa e aço. Segundo a EPE (2018b), a capacidade instalada de geração elétrica no Brasil é de 152,097 MW. A origem dessa energia é, predominantemente, gerada por meio das usinas hidroelétricas, seguida pelos combustíveis fósseis e renováveis, conforme ilustrado no gráfico apresentado na Figura 29.

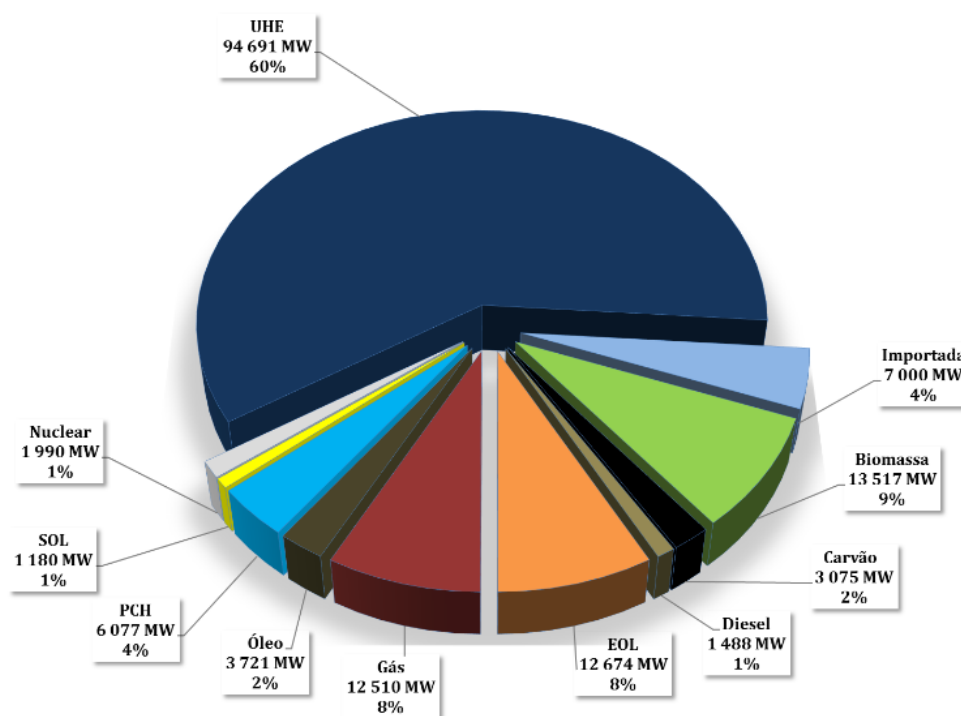


Figura 29 – Matriz elétrica brasileira (EPE 2018b).

Muitos fatores históricos, geográficos e de escolhas de políticas energéticas, que são mencionados por vários autores Lorenzo (2002), Santos e Monteiro (2010) e ANEEL (2014), explicam que no Brasil, a estruturação da matriz de geração elétrica foi projetada para ser majoritariamente dominada pelas fontes renováveis, destacando-se o papel central exercido pela geração hidrelétrica. Mesmo dentre as formas de geração elétrica com base em combustíveis fósseis, o carvão aparece apenas na terceira posição, como ilustrado na Figura 29, com apenas 2% de participação na matriz elétrica brasileira. Essa

realidade destoa da média mundial ou de realidades como a da União Europeia, a qual, em 2016, segundo a IEA (2018a), o carvão tinha uma participação de 22,6%.

Uma tal participação limitada do carvão na geração de energia elétrica, no Brasil, faz com que o consumo total de carvão no país também seja atípico, quando comparado com a média mundial. Assim, segundo o Balanço Energético Nacional (BEN) de 2018 (EPE 2018a), o consumo de carvão no país em 2017 totalizou 3,495 Mtep, sendo que o setor industrial representou 47,8% desse consumo. Ainda em 2017, as importações de carvão metalúrgico totalizaram 11566 t e as de carvão-vapor totalizaram 9405 t, já que para usos siderúrgicos, o país necessita contar com suprimentos externos de carvão de melhor qualidade.

A seguir, dedicam-se reflexões adicionais para caracterizar os estados de oferta, reservas e de demanda do carvão nacional, deixando-se de lado os aspectos relacionados ao carvão importado. Ademais, no Brasil, há de se enfatizar a existência de duas indústrias carvoeiras distintas e, que exercem papéis fundamentais de desenvolvimento regional. Assim, ainda segundo o BEN (EPE 2018a), consumiu-se no país, em 2017, 7,305 Mtep de carvão mineral (concentrado principalmente na região sul do país) e 5,157 t de carvão vegetal. As reflexões que seguem caracterizam, exclusivamente, o estado da indústria de carvão mineral no Brasil.

4.2.1. Demanda do Carvão Mineral Doméstico

Em 2017, o consumo de carvão mineral no país foi de 14,294 Mtep (ou 3,495 Mtep), sendo que deste montante, 9405 Mtep (EPE 2018a). Segundo o Balanço Energético Nacional (EPE 2018a), esta produção tem destino para as indústrias cimenteira, metalúrgica (especialmente para produção de ferro-gusa e aço), química, alimentícia, têxtil, de papel e celulose e cerâmica. A Figura 30 apresenta a divisão setorial do consumo nacional.

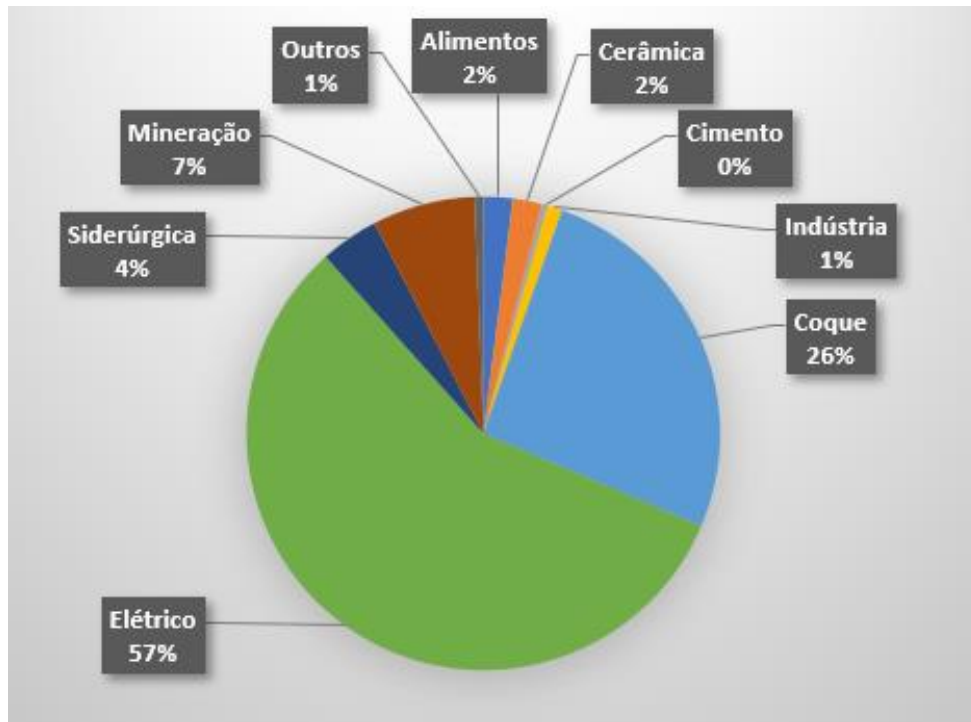


Figura 30 – Vendas de carvão por setor de consumo brasileiro para o ano de 2008. Fonte relatórios estatísticos da Associação Brasileira de Carvão Mineral (ABCM 2017).

A histórica relação de dependência e desenvolvimento conjunto do setor elétrico com o setor carvoeiro, bem como o fato evidenciado anteriormente que 57% do carvão tem destino termelétrico, leva a que seja necessário efetuar uma breve exploração do cenário elétrico, especificamente no que concerne às termelétricas a carvão, para a compreensão das forças que regem a maior parte da demanda desse combustível no país. Em 2017, como apresentado na Tabela 3, de um total de doze usinas termelétricas a carvão em operação no Brasil, sete delas encontram-se localizadas na região sul do país nas proximidades das áreas de mineração de carvão, nomeadamente Figueira, Jorge Lacerda I, II, III e IV, Presidente Médici A, B, Candiota III.

Tabela 3 – Usinas termelétricas a carvão operantes no Brasil (ANEEL 2019).

Usina	Data Operação	Potência Outorgada (MW)	Município
Figueira	01/01/1963	20	Figueira (PR)
Jorge Lacerda I e II	01/03/1965	232	Capivari de Baixo (SC)
Presidente Médici A, B	01/01/1974	446	Candiota (RS)
São Jerônimo	1953	20	São Jerônimo (RS)
Jorge Lacerda III	01/02/1979	262	Capivari de Baixo (SC)
Jorge Lacerda IV	01/02/1997	363	Capivari de Baixo (SC)
Alunorte	26/09/2007	103	Barcarena (PA)
Alumar	20/10/2009	75	São Luís (MA)
Porto do Itaqui (Antiga Termomaranhão)	05/02/2013	360	São Luís (MA)
Porto do Pecém I (Antiga MPX)	01/12/2012	720	São Gonçalo do Amarante (CE)
Candiota III	01/01/2011	350	Candiota (RS)
Porto do Pecém II	18/10/2013	365	São Gonçalo do Amarante (CE)

A central de geração elétrica a carvão São Jerônimo foi o primeiro projeto energético do Rio Grande do Sul, iniciada em 1948 e inaugurada em 1953 (Tolmasquim, 2016). As usinas de Figueira, Jorge Lacerda I e II entraram em operação durante a década de 1960. Estas possuem capacidade de produção termelétrica de 20 MW, 232 MW e 446 MW, respectivamente. Na década de 1970, as usinas Presidente Médici A e B e a Jorge Lacerda III entraram em operação, sendo que a primeira com produção de 446 MW e 262 MW, respectivamente. As usinas Alunorte e Alumar entraram em operação na primeira década dos anos 2000 e, segundo Tolmasquim (2016) são usinas de auto produção, totalizando uma produção de 178 MW. A partir dos anos 2010, as usinas de Candiota III, Porto do Pecém I, II e Porto do Itaqui, são as três usinas mais recentes a entrarem em operação no sul do país, onde produzem, respectivamente, 350 MW, 720 MW, 365 MW

e 360 MW de energia elétrica. No Brasil, somando todas as produções termelétricas produzidas a partir do carvão, são produzidos 3,378 GW.

A usina termelétrica de Jorge Lacerda IV, localizada em Capivari de Baixo (SC) foi inaugurada em 1997. Sua potência é de 363 MW, totalmente de produção independente de energia. A concepção do complexo termelétrico, inaugurado em 1965, saiu de um esforço conjunto de autoridades federais e estaduais com o objetivo de gerar energia e promover o desenvolvimento industrial na região a partir da abundante reserva de carvão. A usina termelétrica de Candiota III foi inaugurada em 2011 com uma potência de 350 MW que compõe um complexo termelétrico, dessa vez inaugurado em 1974 integrado ao Sistema Interligado Nacional (SIN). O projeto de Candiota III foi concebido ainda na década de 1980, em parceria com a França, porém a construção só iniciou em 2006. A sua construção visou a retomada do crescimento do setor carvoeiro voltado para a geração termelétrica, e duplicou o consumo de carvão no Estado do Rio Grande do Sul (Eletrobras 2019a).

O consumo de carvão nas usinas referidas anteriormente depende da ordem de demanda das mesmas, assim como de usinas operantes em um certo período. O consumo de carvão no complexo de Jorge Lacerda é de aproximadamente 2,88 Mtec por ano, enquanto Candiota chega aos 3,3 Mtec anuais com as três usinas operantes (Eletrobras 2019b). Nota-se que projetos mais recentes de geração termelétrica a carvão, no país, possuem um consumo anual de aproximadamente 4750 toneladas de carvão por MW de capacidade instalada (Zancan 2015).

Observa-se que muitas dessas usinas encontram-se localizadas próximas às regiões de mineração do carvão doméstico. Na ausência de um sistema ferroviário robusto, conectando as várias regiões do país, a lógica operativa dessas usinas encontra-se definida pelas prioridades de despacho impostas pelo SIN. Assim, a região sul do país interliga-se à região sudeste (centro de carga principal do país). Vieira (2009) descreve resumidamente a história e a complexa lógica operacional do sistema de transmissão de energia elétrica do Brasil. Em respeito às interligações entre as regiões sul e sudeste, a autora anteriormente citada aponta que, em 2008, o subsistema Sul, composto pelos Estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná, representava 17% do consumo de energia elétrica do SIN, apresentando uma carga média de 8600 MW. Esse mesmo

sistema possui uma capacidade instalada de 18000 MW, sendo 87% de geração hidráulica e 12% de geração termelétrica. Contudo, sem considerar a capacidade instalada no lado brasileiro de Itaipu, essa participação térmica no subsistema sul torna-se superior a 20%.

Vieira (2009) destaca, igualmente, os períodos hidrológicos bastante distintos nas regiões sul e sudeste. Até à construção da usina de Itaipu nos anos 1980, a interligação elétrica entre essas duas regiões era bastante restrita e, realizada por linhas de transmissões de menor capacidade, conectando os Estados de São Paulo, Mato Grosso do Sul e Paraná. Na ausência de grandes reservatórios de água no sistema hidrelétrico da região sul, eventuais ausências de chuva no Sul eram compensadas pela geração termelétrica, basicamente a carvão, local. Nesse sentido, a região Sul operava como um subsistema hidrotérmico relativamente isolado. Com o desenvolvimento do maior intercâmbio energético entre as regiões Sul e Sudeste a partir dos anos 1980, reduziu-se a geração térmica a carvão.

4.2.2. Reservas e Oferta do Carvão Mineral Doméstico

Apenas 25% (5,6 milhão de toneladas) do carvão utilizado no Brasil são de produção nacional enquanto que 75% (15,9 milhão de toneladas) são importados de países, como, Austrália, Estados Unidos, Rússia, Canadá, Colômbia, Venezuela, Indonésia e África do Sul, para uso siderúrgico, uma vez que o carvão nacional não possui as características necessárias para as tecnologias empregadas nas usinas termelétricas (Figura 31).

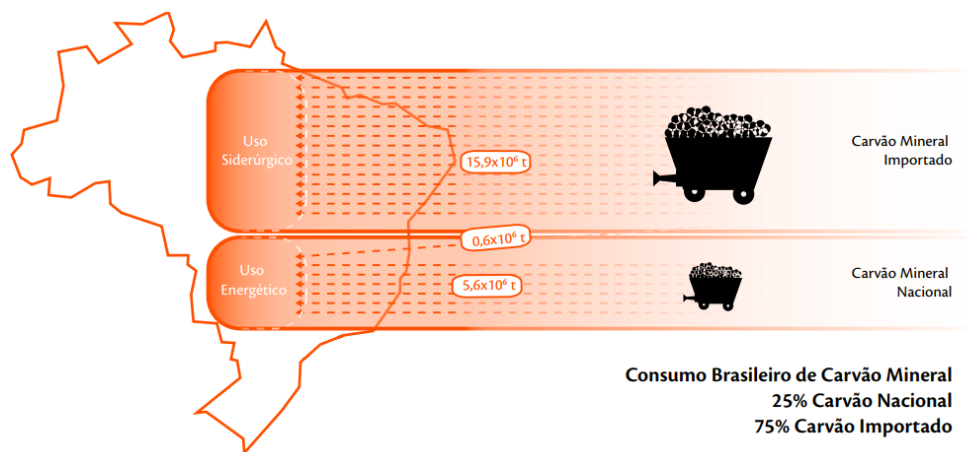


Figura 31 – Consumo brasileiro de carvão. (CGEE 2012).

Segundo levantamento feito pela Associação Brasileira de Carvão Mineral (ABCM 2017), apesar da restrita participação do carvão na geração elétrica nacional, o carvão é, em sua maioria, destinado à produção de energia elétrica com 82% de sua venda no Brasil. Segundo ANEEL (2014) é mais econômico investir em linhas de transmissão de energia elétrica do que no transporte do carvão, uma vez que o carvão brasileiro é energeticamente pobre para ser transportado para outras termelétricas fora da região de mineração, o que encareceria a produção de energia.

O Brasil possui reservas de Carvão Betuminoso Altamente Volátil C (Candiota) até a Betuminoso Altamente Volátil A (Sul-Catarinense) (Gomes et al. 2003). Dentre as principais jazidas, as maiores situam-se nos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, e as menores, no Paraná. A reserva total brasileira é a 14ª maior do globo, totalizando 7 bilhão de toneladas, correspondendo a menos de 1% das reservas mundiais (Gomes et al. 2003).

Entre os Estados brasileiros, o Rio Grande do Sul (RS) concentra 89,6% das reservas; Santa Catarina (SC) 10,1% e Paraná (PR) 0,3%. Somente o depósito de Candiota (RS) possui 38% de todo o carvão nacional (Gomes et al. 2003). Além de Candiota, também se destacam outros depósitos no Rio Grande do Sul, como os de Capané, Iruí, Leão, Charqueadas, Morungava/Chico Lomã, Santa Terezinha, e os de Santa Catarina, denominada Sul-Catarinense (Tabela 4).

Tabela 4 – Reserva de carvão no Sul do Brasil. DNPM (2016), Branco (2014) e Tolmasquim (2016).

Unidade de Federação (UF)	Reserva	Recursos (10 ⁶ t)	%
Paraná	Cambuí	44	
	Sapopemba	47	
	Total	91	0,3
Santa Catarina	Barro Branco	1,245	
	Bonito	1,656	
	Pré-Bonito	414	
	Total	3,315	10,1
Rio Grande do Sul	Candiota	12,575	
	Leão	2,339	
	Charqueadas	2,993	
	Iruí/Capané	2,968	
	Morungava	3,328	
	Santa Terezinha/Torres	5,168	
	Total	29,371	89,6
Total		32,777	100

Além do benefício estratégico para extração e geração de energia a partir da queima do carvão, a localização das reservas também pode definir áreas prioritárias para as operações de captação e armazenamento de CO₂, tanto no contexto atual quanto em situações de baixo interesse energético no combustível (Figura 32).

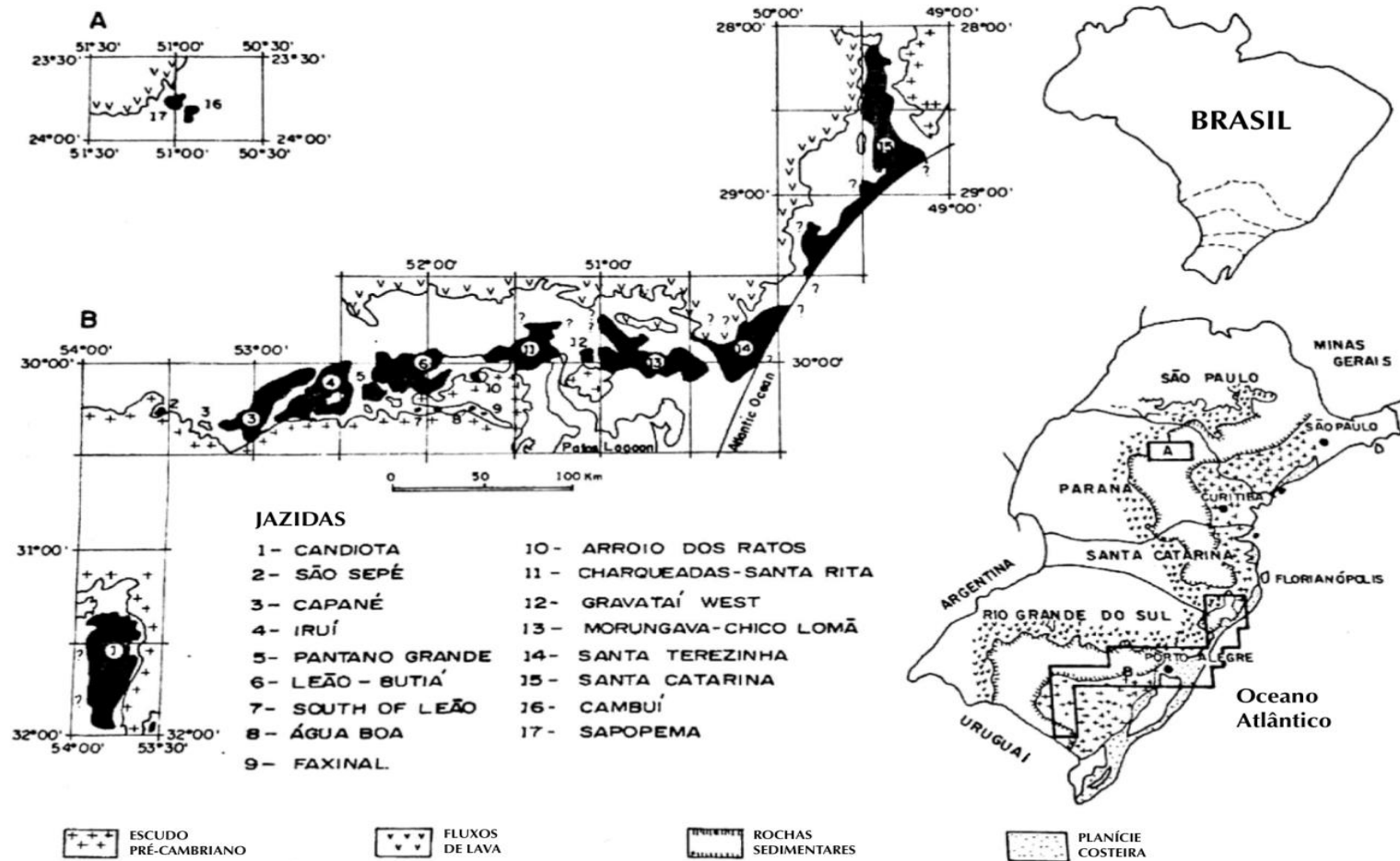


Figura 32 – Localização das principais jazidas de carvão do Brasil, destacando os estados de São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul (Corrêa da Silva 1989).

A mina de Santa Catarina é de especial interesse para esta pesquisa, principalmente as camadas Barro Branco e Bonito, as quais foram selecionadas como caso de estudo da presente tese. Além destas, as camadas Treviso, Irapuá e pré-Bonito tiveram seu carvão analisado petrograficamente por outros autores (Corrêa da Silva e Wolf 1978; Kalkreuth et al. 2010; Dos Santos Lourenzi e Kalkreuth 2014), os quais caracterizaram o carvão como rico em minerais e pobre em vitrita e inertita.

Segundo o Balanço Energético Nacional (EPE 2018a), em 2017, a produção nacional de carvão foi de 4,818 milhão de toneladas. Nessa perspectiva há de se apontar uma relativa “abundância” desse recurso natural que tem sido subaproveitada.

Entretanto, o carvão mineral doméstico considerado é pobre do ponto de vista energético, além de apresentar características que dificultam o seu beneficiamento e transporte, em função do elevado teor em inertes, como cinzas e enxofre (Tabela 5). Dessa forma, sua utilização é feita sem beneficiamento e à boca da mina, para menores custos de produção (Lemos de Sousa et al. 2012). Além disso, o regime de incerteza da forma como operam as centrais termelétricas dificulta a competitividade desse tipo de usina (Rego 2012).

Tabela 5 – Características dos carvões brasileiros (SATC 2014 e Tolmasquim 2016).

UF	Mina	Poder Calorífico (kcal/kg)	Carbono (% m/m)	Cinzas (% m/m)	Enxofre (% m/m)
PR	Cambuí (sub-betuminoso)	4850	30,0	45,0	6,0
	Sapopemba (sub-betuminoso)	4900	30,5	43,5	7,8
SC	Barro Branco (linhito)	2700	21,4	62,1	4,3
	Bonito (linhito)	2800	26,0	58,3	4,7
RS	Candiota (linhito)	3200	23,3	52,5	1,6
	Santa Teresinha (sub-betuminoso)	3800-4300	28,0-30,0	41-49,5	0,5-1,9
	Morungava/ Chico Lomã (sub-betuminoso)	3700-4500	27,5-30,5	40,0-49,0	0,6-2,0
	Charqueadas (linhito)	2950	24,3	54,0	1,3
	Leão (linhito)	2950	24,1	55,6	1,3
	Iruí (linhito)	3200	23,1	52,0	2,5
	Capané (linhito)	3100	29,5	52,0	0,8

Nota: Percentagem de matéria mineral = % mm; SATC (2014) e Tolmasquim (2016).

Assim como ocorre com o setor siderúrgico e outros setores industriais, principalmente aqueles localizados fora da região Sul, a maioria das novas termelétricas a carvão construídas no país após o ano 2000 e, igualmente, fora da região Sul (Tabela 3) não suportam a utilização de carvão mineral doméstico. Desta forma, apenas em 2015, os gastos do país com importação de carvão totalizou os US\$ 2,8 bilhão, contra uma receita de exportação da indústria carvoeira de apenas US\$ 74 milhão (DNPM 2016). Por exemplo, neste mesmo ano, o setor energético brasileiro como um todo importou cerca de US\$ 171,45 bilhão apenas em petróleo. Portanto, o carvão representou 1,6% dessas importações.

Por outro lado, há de se enfatizar a importância da indústria carvoeira em sua dimensão regional e para a região sul em particular. O percurso de riqueza associado à produção de carvão representou, em 2017, um total de R\$ 977.286.290,20 oriundos do faturamento do setor, e R\$ 16.020.172,52 oriundos do Imposto sobre Operações relativas à Circulação de Mercadorias e Prestação de Serviços de Transporte Interestadual e

Intermunicipal e de Comunicação (ICMS) (ABCM 2017). Segundo a Associação Brasileira de Carvão Mineral (ABCM 2017), essa indústria extrativa sustentou 3505 empregos diretos em 2017, e seu histórico permitiu um número ainda maior, isto é, de 4941 empregos em 2011 (Hamm 2012).

Além disso, dentro de cada um dos dois principais Estados produtores, há regiões cuja vocação econômica gira quase, exclusivamente, em torno da produção de carvão. Por exemplo, Comissão Especial do Carvão Mineral e da Energia Eólica (CECMEE) (2013) estima que, ao acoplar a mineração à geração de eletricidade, por exemplo uma usina termelétrica de 340 MW em Candiota (RS) aumentaria em 50% o PIB per capita da cidade. Tal usina na cidade de Hulha Negra aumentaria o PIB per capita em 130%.

4.3. Perspectivas Futuras

O carvão é uma opção importante para a geração de eletricidade, uma vez que poderá se tornar uma opção viável em detrimento do potencial hidrelétrico. O carvão poderá tornar-se protagonista na região Sul do país onde é um recurso mineral com preços estáveis e relativamente baixos (Tolmasquim, 2016). O mesmo autor aponta que as termelétricas a carvão no Brasil são antigas e operam com rendimentos abaixo dos 34%. A adoção de novas tecnologias pode proporcionar um rendimento acima dos 40% com menores índices de emissões. O potencial no ganho global em redução de emissões dos GEEs pode chegar a 1,7 bilhão de toneladas por ano, apenas pelo aumento da eficiência média, de 33% para 40%, das usinas que utilizam tecnologias subcrítica para a supercrítica, ou seja, de uma tecnologia de menor eficiência para uma de maior eficiência (tecnologia subcrítica e supercrítica) (World Energy Council 2016). Apesar de tantas dimensões possíveis de serem exploradas pela indústria do carvão para melhorar seus desempenhos ambientais, nesta Tese, dedica-se atenção apenas à questão da captação e armazenamento de dióxido de carbono.

Apesar de o carvão brasileiro ser de baixa qualidade energética, a sua resiliência como importante combustível, na matriz energética brasileira, assim como ocorre na dimensão mundial, é explicada pela facilidade de acesso, preços compatíveis com a realidade econômica e estrutura de utilização existente. Contudo, muitas projeções, tais

como MIT (2011), BP (2018) e IEA (2018b), apontam para um futuro global menos dependente em recursos fósseis, graças ao crescimento das fontes renováveis.

De acordo com IEA (2018b), em seu relatório *World Energy Outlook 2018*, em um cenário conservador, a participação combinada dos combustíveis fósseis na oferta de energia primária mundial cairá de 81%, em 2017, para 78%, até 2040. Essa participação cai para 74% em um cenário de transição, e para 60% no cenário onde há maior foco no desenvolvimento sustentável. Ainda nas projeções da IEA, a participação do carvão na oferta de energia primária mundial cresce 27,17%, até 2040, no cenário conservador, 1,51% no cenário de transição e recua 57,50% no cenário de desenvolvimento sustentável. No Brasil, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE 2018c) projeta que a participação dos combustíveis fósseis no consumo de energia primária do país será de 53% até 2040, e o carvão corresponderá entre 4% e 5% do consumo total.

No que concerne à geração elétrica no Brasil, a EPE (2018b) projeta um crescimento de demanda médio entre 3,6% e 3,9% (a depender do cenário) até 2027. Uma expansão da geração termelétrica a carvão no valor de 1500 MW é projetada até 2027. De acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) 2027 (EPE 2018b), a estabilidade da geração a carvão, tanto por conta da oferta do insumo como por conta das condições de comercialização de energia elétrica, coloca o carvão como alternativa viável ao gás natural nesse período, especialmente considerando fatores estratégicos como a segurança energética. As externalidades negativas de tal expansão podem ser mitigadas com a modernização do parque termelétrico a carvão (em final de vida útil), revelando uma oportunidade de ampliação de oferta de energia elétrica e adequação às restrições de emissões dos GEE.

Dessa forma, para ficarem mais competitivas e ainda socialmente aceitas, as usinas termelétricas a carvão serão forçadas a melhorar seu desempenho ambiental. Além de continuarem a aprimorar suas pegadas ambientais com efeitos locais, incluindo os problemas de chuva ácida e impactos ambientais e sociais nas zonas de mineração, termelétricas a carvão necessitarão liderar os processos de absorção de tecnologias de redução de emissões dos GEE.

Portanto, conclui-se que o protagonismo do carvão no Brasil pode crescer no século XXI, seja como insumo em usinas termelétricas novas, englobando parte da nova demanda que os sistemas hidrelétricos não aguentam, seja como recurso estratégico nas grandes reservas do Sul do país. A quase totalidade das reservas brasileiras de carvão estão localizadas na Bacia sedimentar do Paraná, cuja caracterização se faz necessária para a compreensão do potencial de armazenamento de CO₂ das camadas de carvão ali localizadas.

CAPÍTULO 5 – ENQUADRAMENTO REGIONAL DA BACIA DO PARANÁ

5.1. Introdução

Neste capítulo será apresentado o enquadramento regional da Bacia do Paraná, incluindo sua localização e caracterização geológica, tanto no âmbito tectono-estratigráfico como no que diz respeito aos ambientes deposicionais do carvão, objeto de estudo deste trabalho.

Os carvões da Bacia do Paraná são encontrados na Formação Rio Bonito do Subgrupo Guatá, sequência inferior do Grupo Tubarão (Corrêa da Silva e Wolf 1978). A Formação Rio Bonito é representada por um conjunto de arenitos e siltitos intercalados por finas camadas de carvão. Esta formação ocorre em toda a Bacia do Paraná e sua espessura varia entre os 100 e os 200 metros (Nahuys e Piatnicki 1984). As camadas de carvão selecionadas para o presente trabalho são a Bonito e a Barro Branco, ambas camadas da Formação Rio Bonito.

5.2. Localização

A Bacia do Paraná localiza-se no continente sul-americano, na porção centro-oriental da Plataforma Sul-Americana. A bacia abrange porções territoriais no Brasil meridional, Paraguai oriental, nordeste da Argentina e norte do Uruguai, que totalizam uma área de aproximadamente 1,4 milhão de quilômetros quadrados, sendo 1,1 milhões km² no Brasil. O contorno da bacia configura um limite erosivo ao longo de grande parte de seu perímetro, atingindo aproximadamente 5.500 quilômetros de diâmetro. Incluem-se na porção brasileira da bacia, em proporções significativas, os estados de SP, PR, SC e RS, e em proporções menores, os estados de MT, MS, GO e sudoeste de MG. A bacia

tem uma forma ovalada, sendo o eixo maior na direção N-S, em que o seu contorno atual é definido por limites erosivos relacionados, em grande parte, com a história geotectônica Meso-cenozóica do continente (Zalan et al. 1990; Milani et al. 2007).

Na região de Santa Catarina, as camadas de carvão ocorrem na parte Sudeste do estado em uma bacia com cerca de 80 km de comprimento, segundo a direção Norte-Sul (Figura 33).

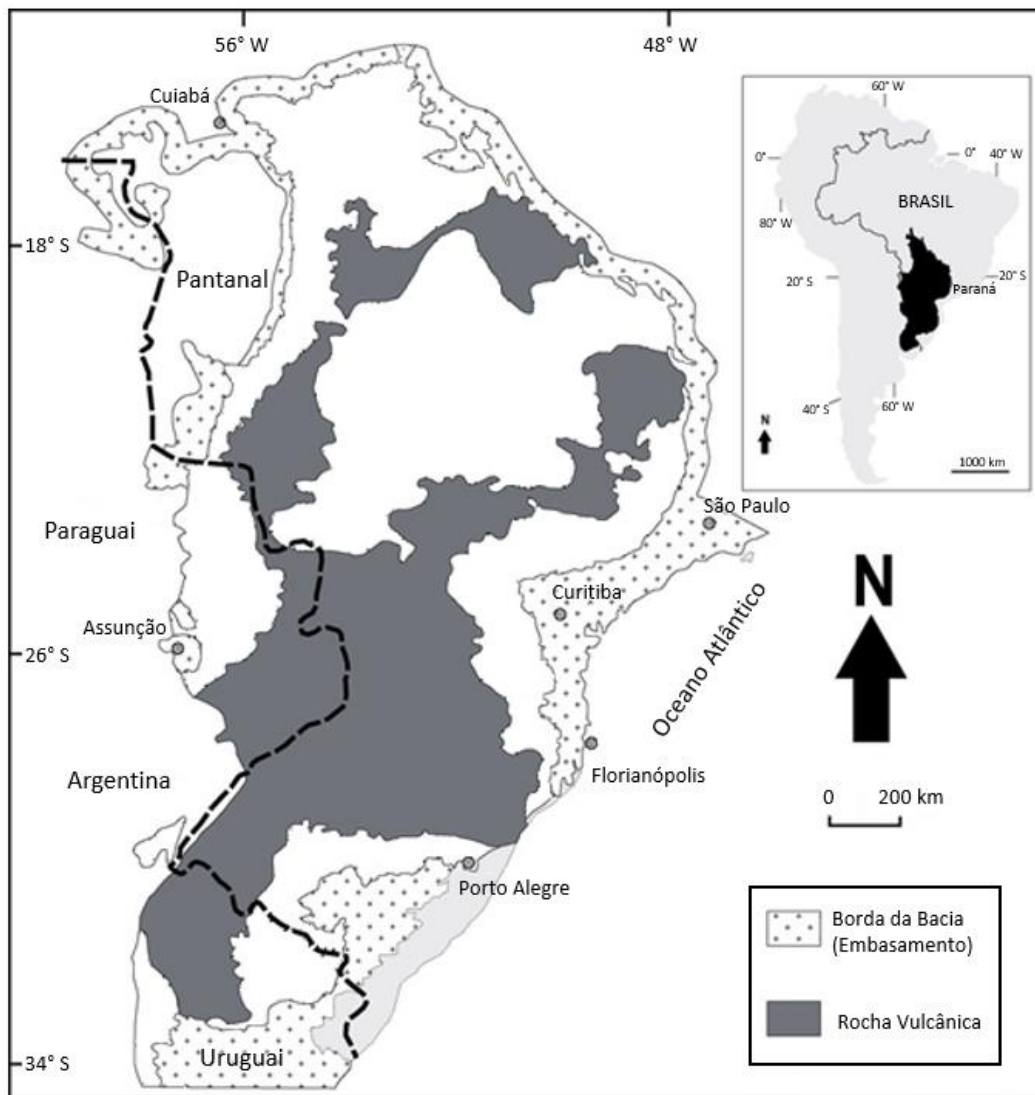


Figura 33 – Mapa da localização da Bacia do Paraná (Silva et al. 2006).

5.3. Caracterização Geológica

Inserida no contexto geológico paleocontinental do Gondwana, a evolução geológica da Bacia do Paraná é atribuída aos períodos Paleozóico e Mesozóico. A bacia contém um registro estratigráfico sedimentar e magmático de espessura total máxima em torno de 7 mil metros, cujo posicionamento espacial coincide geograficamente com o depocentro estrutural da sinéclise com a calha do rio Paraná, a partir do qual, segundo Maack (1947), a bacia foi nomeada. Já o posicionamento temporal varia entre Neo-Ordoviciano e Neocretáceo (Milani 1997). Sua evolução tectono-estratigráfica engloba o conjunto e sucessão de processos que incluem distensão continental, subsidência térmica e ajustes isostáticos (Maack 1947, Zalan 1990, Milani 1997 e 2004).

A sedimentação da Bacia do Paraná ocorreu em ambiente que sofreu pouca perturbação de fenômenos tectônicos e, subsequentemente, não sofreu esforços de compressão que pudessem produzir dobramentos e falhas de grande escala. Dessa forma, as camadas de carvão são encontradas em direções horizontais a sub-horizontais, com mergulhos suaves (Nahuys e Piatnicki 1984).

5.3.1. Estratigrafia

Os primeiros estudos estratigráficos feitos na Bacia do Paraná começaram com o trabalho de White (1908). Posteriormente, a partir da década de 1970, outros trabalhos importantes foram publicados, como o de Schneider et al. (1974), Zalan et al. (1990) e Milani et al. (2007).

Segundo Milani et al. (2007), a Bacia do Paraná foi dividida, estratigraficamente, em seis supersequências. As supersequências são formadas por registros preservados de sucessivas fases de acumulação sedimentar que se intercalaram a períodos de erosão em ampla escala (Hasui et al. 2012). As supersequências denominam-se como, da mais antiga para a mais nova: Rio Ivaí (Ordoviciano a Siluriano), Paraná (Devoniano), Gondwana I (Carbonífero Superior a Triássico Inferior), Gondwana II (Triássico), Gondwana III (Triássico Superior a Cretáceo Inferior) e Bauru (Cretáceo Superior). A Figura 34 apresenta a localização, isto é, distribuição das seis supersequências da Bacia do Paraná, e a Figura 35 apresenta a coluna litoestratigráfica da Bacia do Paraná.

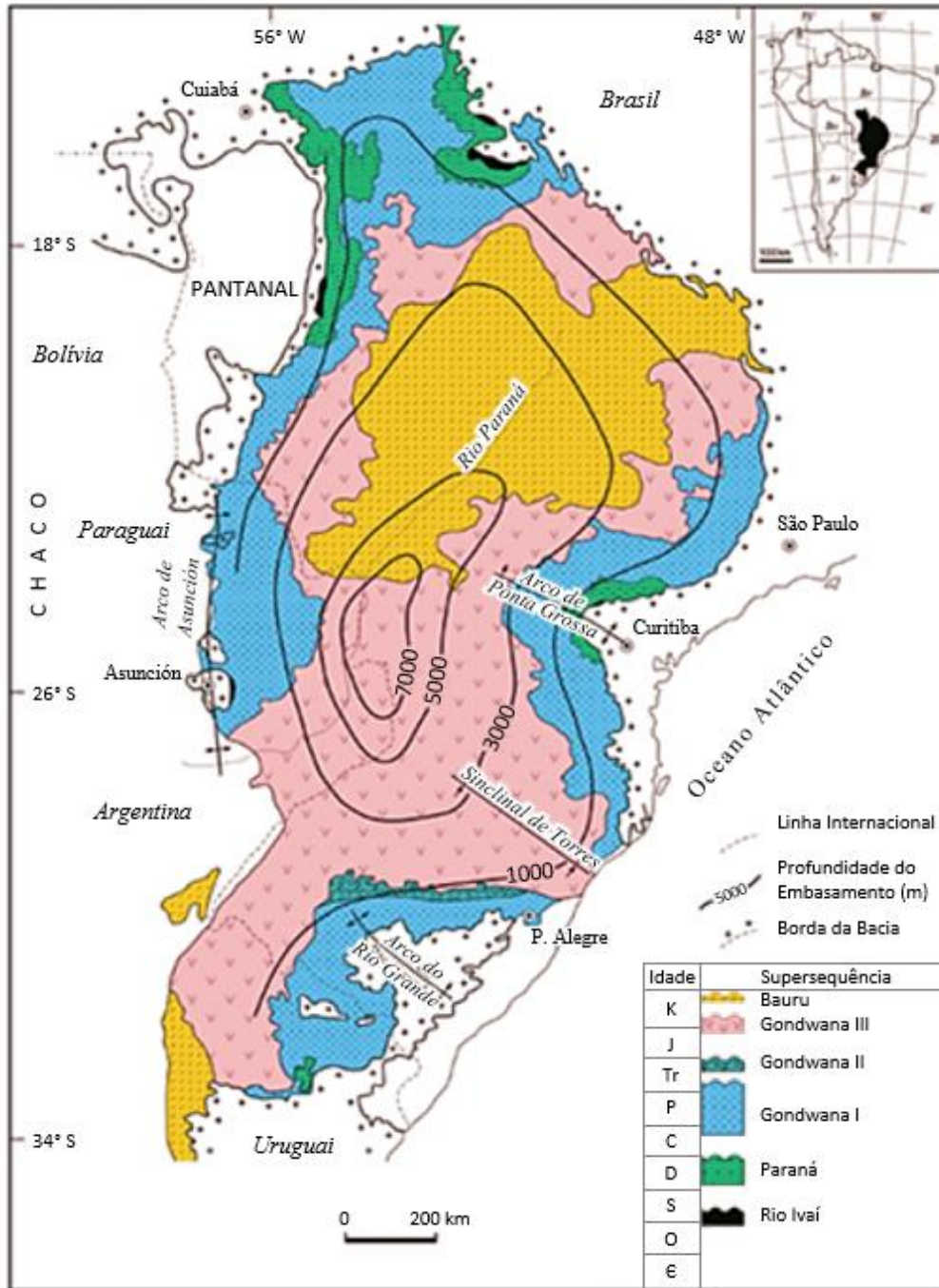


Figura 34 – Bacia do Paraná dividida, estratigraficamente, nas superseqüências Rio Ivaí, Paraná, Gondwana I, Gondwana II, Gondwana III e Bauru (Milani et al. 2004).

mineiro, especialmente das camadas de carvão. Esta supersequência, por sua vez, é constituída pelos grupos Tubarão e Passa Dois (Milani et al. 2007).

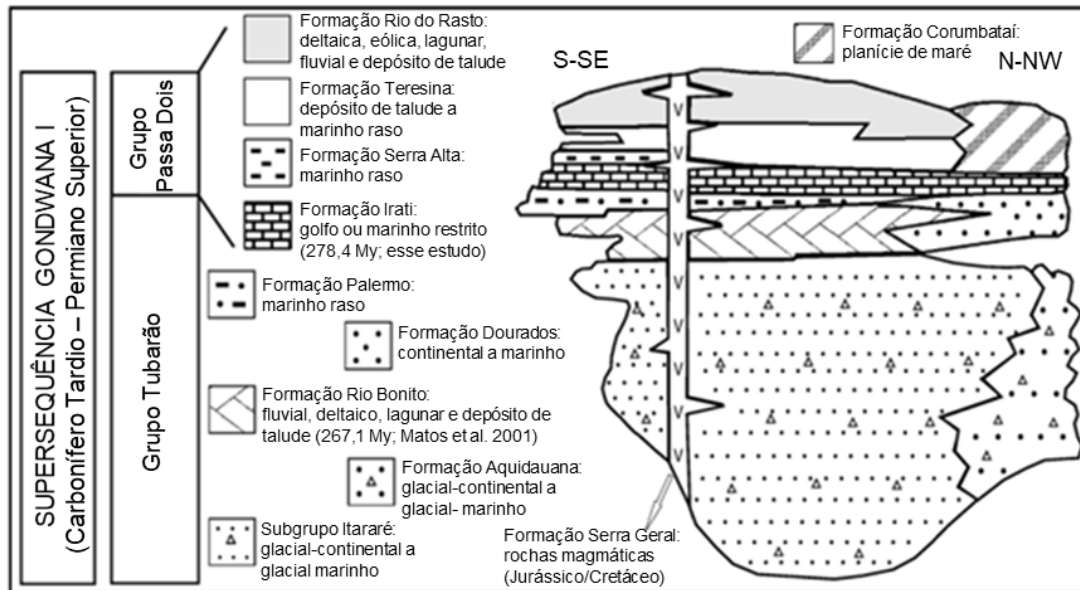


Figura 36 – Estratigrafia da Sequência Gondwana I (Santos et al. 2006).

O Grupo Tubarão é formado por três Subgrupos: Passa Dois, Guatá e Itararé. As camadas de carvão ocorrem no Subgrupo Guatá, mais especificamente, na Formação Rio Bonito. O Grupo Guatá é formado pelas Formações Palermo e Rio Bonito, sendo a última de interesse para o trabalho em questão, pois é nela que ocorrem as camadas de carvão da Bacia do Paraná.

A Formação Rio Bonito é dividida nos seguintes Membros: Siderópolis, Paraguaçu e Triunfo. Dentro do Membro Siderópolis ocorrem as camadas de carvão, sendo elas, da base para o topo: Bonito, Ponte Alta, Irapuá, Barro Branco e Treviso. No Membro Paraguaçu ocorre a camada Pré-Bonito. A estratigrafia simplificada da Supersequência Gondwana I, com destaque para a Formação Rio Bonito, está apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 – Subdivisão da Supersequência Gondwana I.

Supersequência Gondwana I	Grupo	Subgrupo	Formação	Membro	Camada de Carvão	
	Tubarão	Guatá	Rio Bonito	Siderópolis	Passa Dois	
					Palermo	
					Treviso	
					Barro Branco	
					Irapuá	
					Ponte Alta	
					Bonito	
					Paraguaçu	Pré-Bonito
					Triunfo	
Itararé						

O estudo dos ambientes de formação de carvões é de grande importância para a interpretação das condições paleoambientais de deposição e, dessa forma, significativa para a caracterização dos carvões. O estudo da formação dos ambientes deposicionais da região de Santa Catarina está presente a seguir.

5.3.2. Formação dos Ambientes Deposicionais

De acordo com estudos de White (1908), Medeiros, Thomas Filho (1973), Bortoluzzi et al. (1978), Aboarrage e Lopes (1986), Della Fávera et al. (1992, 1994), Holz et al. (2010) e Iannuzzi (2010), a Formação Rio Bonito está associada ao sistema fluvio-deltáico (influência fluvial), mais especificamente no Membro Triunfo, e a um sistema de barreira-laguna (influência lagunar de transição para marinho) a sistema estuarino (transição de um ambiente fluvial a marinho), no Membro Siderópolis.

A predominância de um ambiente subaquático, dominante na deposição, aumentou a deposição de quantidades significativas de argila juntamente com tecidos vegetais, algas, esporos e/ou grãos de pólen, de modo que o carvão é encontrado intercalado com folhelhos e argilitos.

As minas de carvão do Sul do Brasil, incluindo a região de Criciúma, indicam a formação de turfa por soterramento de vegetação herbácea e arbustiva relacionadas com árvores de pequeno porte.

Conforme estudos de Marques-Toigo e Corrêa da Silva (1984), Corrêa da Silva e Marques-Toigo (1985), Corrêa da Silva (1991), quatro tipos de ambientes deposicionais foram caracterizados pela diferença palinológica (microlitotipo), conforme o tipo e concentração de macerais nas camadas de carvão, ou seja, tipo de vegetação combinado com o nível de água para determinar uma mudança tanto lateral quanto vertical destes depósitos, conforme esquematizado na Figura 37.

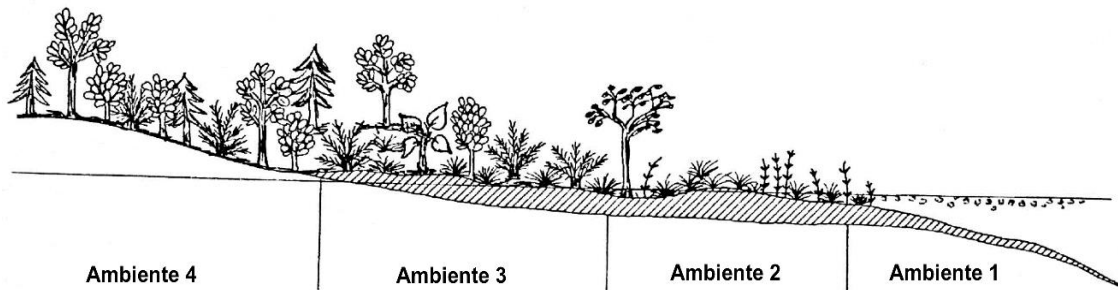


Figura 37 – Locais de deposição que deram origem aos depósitos de carvão no Permiano do Sul do Brasil (Marques-Toigo e Corrêa da Silva 1984).

O primeiro ambiente deposicional indicado na Figura 37 é caracterizado pela formação de rochas onde materiais inorgânicos predominam, como argilas, em um pântano aberto. A matéria orgânica é principalmente detrítica e derivada de plantas herbáceas e arbustivas que cresceram ao lado dos charcos e associados a algas. Esta fácies predomina nos carvões do Sul do Brasil (Corrêa da Silva 1991; Marques-Toigo e Corrêa da Silva 1984).

O segundo ambiente representado é definido como um habitat limno-telmático, onde também há predominância de plantas herbáceas e arbustivas, mas em um meio intermediário de pântano, onde o nível de água é intermediário, na transição para o meio de água exposta. Esta fácies é bem comum no Sul do Brasil (Corrêa da Silva 1991; Corrêa da Silva e Marques-Toigo 1985).

O terceiro ambiente da Figura 37 indica uma região onde a terra é muito úmida, mas bem drenada, havendo predomínio de arbustos e pequenas árvores (Marques-Toigo e Corrêa da Silva 1984).

A floresta com plantas arbóreas, representada à esquerda na mesma figura, Ambiente 4, foi desenvolvida em solos adjacentes ao pântano, mas no caso do Sul do Brasil, não há evidências deste ambiente (Corrêa da Silva 1991; Marques-Toigo e Corrêa da Silva 1984).

O estudo dos ambientes deposicionais dos carvões apresentam informações importantes, uma vez que, no caso dos carvões gonduânicos de Santa Catarina, as camadas de carvão estão intercaladas com camadas de rochas sedimentares que influenciam em suas características e, por sua vez, na sua classificação.

5.4. Carvão gonduânico de Santa Catarina

A identificação dos ambientes de formação do carvão, incluindo os tipos de vegetação e o nível de água, é indispensável para que seja possível caracterizar o carvão da Formação Rio Bonito. Assim, é importante referir que para além do grau de maturação do carvão existem outras propriedades importantes para que seja possível caracterizar o carvão, nomeadamente a proporção dos grupos de macerais presentes, conteúdo de matéria mineral, este último parâmetro normalmente expresso em teor em cinzas.

A classificação de carvões gonduânicos e de carvões do hemisfério norte, associados ao paleocontinente Laurasia, pode acarretar comparações errôneas. Carvões gonduânicos, geralmente, são enriquecidos em inertinita e matéria mineral, comparativamente a carvões do Carbonífero do hemisfério norte. Essa variação composicional decorre de (i) fatores paleoclimáticos – onde a variação sazonal de temperatura em climas tropicais e subtropicais favorece a rápida oxidação da matéria orgânica e, conseqüentemente, condiciona seu processo de gelificação e favorece a maior proporção de macerais do grupo inertinita; e (ii) fatores tectônicos, onde o posicionamento intracratônico de bacias gonduânicas, e a conseqüente baixa taxa de subsidência e sedimentação favorecem a “mistura” entre matéria orgânica e matéria mineral. Nesse sentido, como os regimes climáticos e tectônicos que caracterizam os

carvões gonduânicos também se aplicam a carvões mesozoicos de diversas regiões, a designação adequada para estes é de carvões “tipo gonduânicos” (Lemos de Sousa e Pinheiro 1999).

No estudo de Corrêa da Silva e Wolf (1978), o carvão da Formação Rio Bonito, principalmente das camadas do Membro Siderópolis, possui maior quantidade de vitrinite e inertinite e pouca liptinite. Mas, neste mesmo membro, em da Costa et al. (2014), o carvão possui maior quantidade de liptinite em comparação aos macerais do grupo da vitrinite e inertinite. Essa diferença pode ser justificada pela heterogeneidade da camada. No entanto, ressalta a necessidade de mais estudos e ensaios acerca da classificação dos carvões gonduânicos, de Santa Catarina.

Em relação à matéria mineral e ao teor em cinzas, no estudo de Kalkreuth et al. (2010), o acúmulo e preservação de turfa, como explicado anteriormente, influenciado pelos sistemas de barreira e sistema estuarino, justificam a presença de enxofre na forma de pirita nas camadas de carvão. Os carvões formam camadas intercaladas com siltitos, folhelhos carbonosos e piritosos, o que explica o elevado teor em cinzas, que atingem porcentagens entre 50,2 e 64,2 % (Dardenne e Schobbenhaus 2001; Kalkreuth et al. 2010).

Em Corrêa da Silva e Wolf (1980) e Corrêa da Silva (1989) é discutido que os carvões gonduânicos do Sul do Brasil não seguem a mesma classificação que os carvões do hemisfério Norte, uma vez que sofreram alterações externas, como intemperismo e erosão, além do aquecimento artificial de rochas magmáticas. Porém, no estudo de Corrêa da Silva e Wolf (1978) a classificação destes carvões é feita de acordo com os valores de reflectância de vitrinite (% R_o), sendo assim de grau de maturação de Carvão betuminoso altamente volátil (HVB – *high volatile betuminous*). Em concordância com os estudos apresentados anteriormente, os trabalhos de Kalkreuth et al. (2010), dos Santos Lourenzi e Kalkreuth (2014), da Costa et al. (2014) também classificam a maior parte dos carvões da Formação Rio Bonito, localizados na mina Sul Catarinense, como Carvões betuminosos altamente voláteis (HVB).

As características do carvão da região de Santa Catarina justificam seu uso em usinas termelétricas. A mina Sul-Catarinense, cuja porção está compreendida na cidade

de Criciúma, é a de maior exploração nas últimas décadas devido às propriedades coqueificáveis do carvão da Camada Barro Branco e ao consumo nas usinas termelétricas de Santa Catarina. O comprimento da mina ultrapassa 85 km, com largura variável entre 5 e 20 km, apresentando duas camadas economicamente importantes. Os recursos totais da mina contabilizam 4.288×10^6 t, dos quais 70% estão nas camadas Barro Branco (1.323×10^6 t) e Bonito (1.843×10^6 t). Com a suspensão da produção de carvão metalúrgico no início da década de 90, o consumidor quase exclusivo passou a ser a termelétricidade. Produz-se carvão com 4.500 cal/g, por beneficiamento próximo às minas, com rendimento de 30 a 35% sobre o carvão Bruto ou Tal-Qual (ROM) (Gomes et al. 1998).

Os carvões da Formação Rio Bonito têm sido o foco de estudo de vários autores há décadas. Alguns autores discutem a diferença da classificação de carvões gonduânicos de carvões do hemisfério Norte, que podem acarretar comparações errôneas na classificação e maturação. De acordo com Corrêa da Silva e Wolf (1980), Corrêa da Silva (1989), Kalkreuth et al. (2010), dos Santos Lourenzi e Kalkreuth (2014) e da Costa et al. (2014) o carvão da região de Santa Catarina é classificado como Carvão betuminoso altamente volátil. Esta classificação justifica o uso dos carvões da Formação Rio Bonito como combustível em termelétricas da região de Criciúma.

As classificações referidas são, todavia, apenas aproximadas, uma vez que os autores não seguiram a totalidade das especificações e respectivos cálculos corretivos, tal como indicado nas sucessivas edições da Norma ASTM D388. Demais, no que respeita a carvões cuja gênese está intrinsecamente ligada à presença de elevados teores em matéria mineral na própria massa do carvão, é necessário ter em conta regras específicas quanto ao seu enquadramento classificativo (Alpern et al. 1984).

CAPÍTULO 6 – MATERIAL E TÉCNICAS DE ANÁLISES

6.1. Introdução

Tal como referido nos objetivos, este trabalho tem como foco estudar a viabilidade de CCS no carvão da Formação Rio Bonito da Bacia do Paraná em Criciúma, Santa Catarina, Brasil. Para tal investigação, foi inicialmente realizada a caracterização de sete amostras de carvão das camadas Rio Bonito e Barro Branco. Esta caracterização decorre de análises químicas, petrológicas e petrográficas, além de estudos palinológicos e de isotermas de sorção e dessorção de gases. As respectivas técnicas e procedimentos laboratoriais são apresentados neste capítulo, bem como os cálculos analíticos aplicados.

6.2. Amostragem

A realização do presente trabalho implicou uma etapa de amostragem, na qual recolheu-se sete amostras de carvão da Formação Rio Bonito, nas camadas Barro Branco e Bonito, cujo trabalho de campo foi realizado na região da cidade de Criciúma, no estado de Santa Catarina, Sul do Brasil. Foram coletados 35 kg de carvão para cada uma das sete amostras, totalizando aproximadamente 210 kg de material. Destaca-se a importância de terem sido selecionados locais para a amostragem o mais longe possível do contato com a intrusão magmática presente na Bacia do Paraná. Esta intrusão, altera artificialmente o grau de incarbonização do carvão, alterando por sua vez as suas características. O mapa da Figura 38 apresenta a localização das amostras recolhidas no Estado de Santa Catarina.

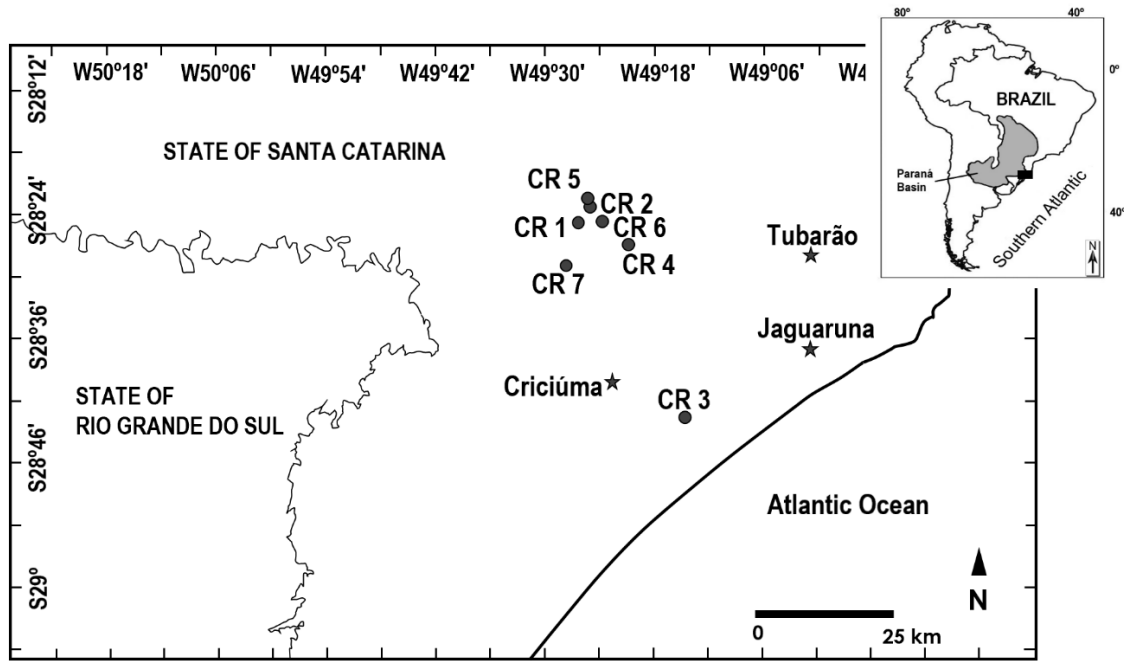


Figura 38 – Mapa com a localização geográfica das amostras coletadas (Pereira et al. 2019).

A amostra CR1 foi retirada de um afloramento de estrada da camada Barro Branco, na rodovia SC-466, próximo à cidade de Palermo. O afloramento possui, aproximadamente, dois metros de espessura, com intercalações de 40 a 50 cm de carvão, siltitos e argilitos. Por estar a céu aberto, foi necessário escavar a camada superficial do afloramento para evitar a amostragem de rocha muito intemperizada. A Figura 39 ilustra o afloramento do ponto CR1.



Figura 39 – Afloramento do ponto CR1.

A amostra CR2 foi retirada da camada Bonito da Mina Lauro Muller, da empresa Carbonífera Belluno Ltda. As camadas de carvão deste ponto variam de 5 a 15 cm e se encontram intercaladas com siltitos e argilitos.

A amostra CR3 de carvão foi retirada da camada Barro Branco, localizada na Mina 101, da Indústria Carbonífera Rio Deserto Ltda. A camada de carvão de 20 a 30 cm de espessura está intercalada com siltitos e argilitos.

A amostra CR4 foi retirada da camada Barro Branco na Mina Frente G, de uma frente de lavra a céu aberto da empresa Urussanga Minérios Ltda. Nesta mina, as camadas de carvão, de espessura variando de 20 a 30 cm, estão intercaladas com siltitos e argilitos. Mesmo sendo uma mina ativa, foi necessário escavar o afloramento com uma escavadeira para obter uma amostra de carvão mais fresca, visto tratar-se de uma mina a céu aberto. As Figuras 40 a e b ilustram o afloramento do ponto CR4.

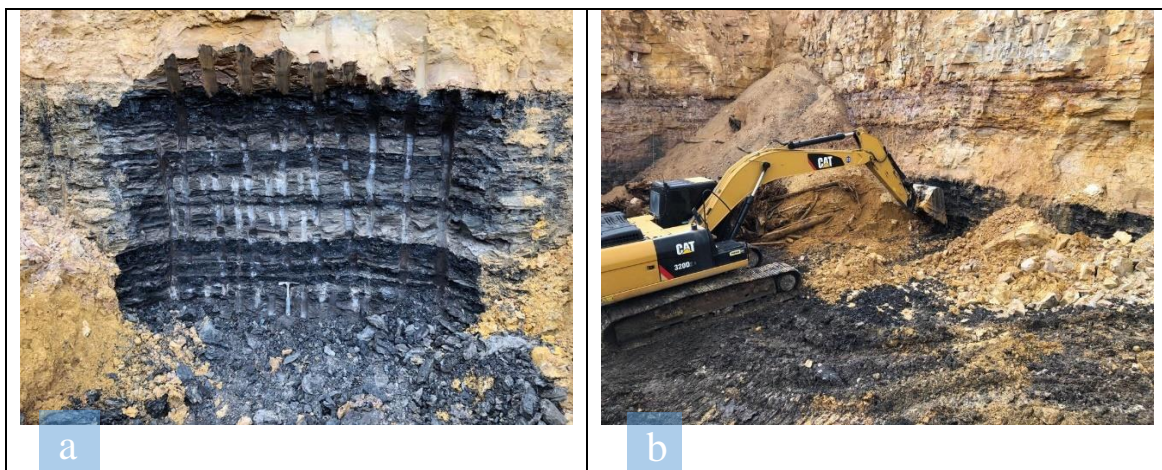


Figura 40 – a) Foto do afloramento do ponto CR4; b) escavadeira retirando a camada intemperizada do afloramento.

A amostra CR5 foi retirada da camada Bonito na Mina Bonito I - Eixo 03NW, Galeria G12/T60/61, de lavra subterrânea, da empresa Carbonífera Catarinense Ltda. As camadas de carvão centimétricas estão intercaladas com siltitos e argilitos. Mesmo sendo retirado de uma mina subterrânea, houve a necessidade de retirar a camada superficial de rocha oxidada para a amostragem de uma rocha mais fresca. A Figura 41 ilustra a mina subterrânea do ponto CR5.



Figura 41 – Lavra subterrânea do ponto CR5.

A amostra CR6 foi coletada de um afloramento da camada Barro Branco, na Estrada Geral Itanema, próximo à Mina Lauro Müller. Este afloramento encontrava-se fortemente alterado com camadas centimétricas de carvão, intercaladas com de siltitos e argilitos. Neste caso, também foi necessário escavar o afloramento para evitar a amostragem de rocha muito intemperizada. A Figura 42 ilustra o afloramento onde a amostra CR6 foi coletada.



Figura 42 – Amostragem do ponto CR6.

A amostra CR7 foi retirada da lavra subterrânea da Mina Fontanela, da camada Bonito, SM2/Galeria 2/1/Travessão 9; Eixo 13NE, da empresa Carbonífera Metropolitana S/A. As camadas de carvão tinham espessuras centimétricas e estavam intercaladas com siltitos e argilitos. Os detalhes das amostragens encontram-se na Tabela 7.

Tabela 7 – Dados das amostras coletadas.

Amostra	Local	Empresa de Mineração	Coordenadas UTM	Camada
	Afloramento na rodovia			
CR1	SC-466, próximo a Palermo.	-	652795 E/6854994 S	Barro Branco
CR2	Mina Lauro Muller	Carbonífera Belluno Ltda.	654763 E/6857847 S	Bonito
	Indústria			
CR3	Mina 101	Carbonífera Rio Deserto Ltda.	672076 E/6819181 S	Barro Branco
CR4	Mina Frente G	Urussanga Minérios Ltda.	661718 E/6851274 S	Barro Branco
CR5	Mina Bonito I - Eixo 03NW, Galeria G12/T60/61	Carbonífera Catarinense Ltda.	654521 E/6858630 S	Bonito
	Afloramento na Estrada			
CR6	Geral Itanema, próximo a Lauro Müller.	-	656892 E/6855439 S	Barro Branco
CR7	Mina Fontanela, SM2/Galeria 2/1/Travessão 9; Eixo 13NE	Carbonífera Metropolitana S/A	650511 E/6847768 S	Bonito

6.3. Técnicas de análise

A seguir são listadas as análises apresentadas neste capítulo:

- Imediata,
- Elementar,
- Fluorescência de Raios-X,
- Poder Calorífico Superior,
- Carbono Orgânico Total,
- Pirólise (Rock Eval),
- Determinação dos macerais,
- Análise óptica da maturação,
- Estudos Palinológicos, e
- Determinação das Isotérmicas de sorção.

Análises Químicas

As análises químicas englobam as análises imediata e elementar e a análise de fluorescência de raios-X. Foram realizadas no Laboratório de Análises e Ensaios de Carvão (LAEC) da Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina (SATC), na cidade de Criciúma (SC), Brasil.

Análise Imediata

As análises imediatas compreendem a determinação da umidade higroscópica (UH), matéria volátil (MV), teor em cinzas (CZ) e carbono fixo (CF). Os valores das referidas análises foram apresentados na base seco.

Assim, o teor em carbono fixo (CF%), neste caso, é calculado pela soma da porcentagem do teor em cinzas (CZ%) e do teor em matéria volátil (MV%) subtraídos de 100. O valor do teor em umidade higroscópica (UH%) não é subtraído, uma vez que, os resultados das análises químicas são apresentados na base seca.

Cálculo do carbono fixo (CF%):

$$CF\% = 100 - (CZ\% + MV\%)$$

Análise Elementar

A análise elementar corresponde à determinação dos teores em carbono (C %), oxigênio (O%), hidrogênio (H %), nitrogênio (N%) e enxofre total (St%). Esta análise foi feita de acordo com o procedimento laboratorial PO-197, seguindo a Norma ASTM D4239, do Laboratório de Análises e Ensaios de Carvão (LAEC) da SATC, em Criciúma, que descreve os passos para a operação do software do equipamento da Leco 628.

Fluorescência de Raios-X

A Fluorescência de raios-X é utilizada para definir a composição química da matéria mineral, a qual é determinada nas cinzas do carvão. Esta análise foi feita utilizando o equipamento EDX 7000 Shimadzu, segundo a Norma ASTM 5016 – 08.

Ensaio Físico-Químico e Geoquímicos

O ensaio físico-químico engloba a análise de Poder Calorífico Superior, enquanto os ensaios geoquímicos incluem as análises de Carbono Orgânico Total (COT) e de Pirólise (Rock Eval). O Poder Calorífico Superior foi realizada no Laboratório de Análises e Ensaios de Carvão (LAEC) da SATC, em Criciúma.

As análises de COT e Pirólise (Rock Eval) foram realizadas na cidade do Rio de Janeiro, no Laboratório de Estratigrafia Química e Geoquímica Orgânica da Universidade Estadual do Rio de Janeiro (UERJ).

Poder Calorífico Superior

O poder calorífico apresenta o valor (em cal/g) produzido pela combustão de combustíveis que possuem hidrogênio em sua composição. Esta combustão é produto do

combustível em contato com o oxigênio do ar que gera água, que ao vaporizar-se emite calor de vaporização. Existem dois ensaios para a determinação do poder calorífico, o inferior e o superior. O primeiro, ou seja, o poder calorífico inferior, se refere ao poder calorífico útil da caldeira, quando não é feita a recuperação do calor de vaporização em sistemas abertos. E o segundo, poder calorífico superior, corresponde ao poder calorífico realizado em laboratório em condições Normalizadas em sistemas fechados, que contabiliza o valor de calor de vaporização da água (Lemos de Sousa et al. 2012). A Norma utilizada para a obtenção dos valores é a ASTM D5865.

Carbono Orgânico Total (COT)

A determinação do teor em Carbono Orgânico Total (COT) é essencial em rochas enriquecidas em matéria orgânica, como o carvão. A análise de COT foi realizada no equipamento LECO SC-632.

Pirólise (Rock Eval)

A Pirólise (Rock Eval) tem como objetivo simular, em laboratório, o processo da evolução da maturação, da diagênese até à metagênese, em rochas ricas em matéria orgânica. Esta análise permite determinar o potencial de geração de hidrocarbonetos, a qualidade da matéria orgânica e o estado de maturação da rocha (Ade 2000).

A análise foi realizada segundo o padrão IFP 160000. Para tal, utiliza-se o equipamento “Rock-Eval II” como nos procedimentos descritos por Ade (2000), os quais consistem em aquecer as amostras a uma temperatura que varia dos 250 aos 550°C em intervalos de tempo variando de 5 a 25 minutos. O primeiro aquecimento gera o despreendimento de gases livres de hidrocarbonetos, formando o primeiro pico (S1) analisado no procedimento. Já o segundo pico (S2) representa a quantidade de hidrocarbonetos gerados na pirólise e, por fim, o terceiro pico (S3) determina a quantidade de CO₂ possível de ser gerada pela rocha. Além dos picos, também é determinada a temperatura máxima do pico de geração de hidrocarbonetos (T_{máx}), o qual é definido aquando do desenvolvimento do pico S2 (Ade 2000).

A partir desses valores, também são definidos (Espitalié et al. 1977):

- Índice de hidrogênio: $IH = (S2 \times 100) / COT$.
- Índice de oxigênio: $IO = (S3 \times 100) / COT$.

Estudos Petrológicos

Os estudos petrológicos envolveram a determinação da composição maceral (constituintes botânicos do carvão a nível microscópico) das amostras e a avaliação óptica da maturação. Dentro da avaliação óptica da maturação das amostras de carvão, foram realizadas a Reflectância da Vitrinite (%Ra), a análise do Índice de Alteração Térmica (IAT, *Thermic Alteration Index - TAI*) e Fluorescência dos palinomorfos. A determinação da composição maceral foi realizada no Laboratório de Estratigrafia Química e Geoquímica Orgânica (UERJ), Rio de Janeiro, Brasil. As análises da avaliação óptica de maturação foram realizadas no Centro de Investigação Marinha e Ambiental (CIMA) da Universidade do Algarve, em Portugal.

Determinação da Composição Petrográfica

A análise dos macerais foi realizada conforme Norma ISO-7404/3 (1985) baseada em contagem de 500 pontos em uma malha regular cobrindo toda a seção de observação da ocular do microscópio. Os resultados identificam e quantificam os constituintes orgânicos e inorgânicos de uma amostra. Na análise foi utilizado um microscópio modelo Zeiss Imager.M2m, luz branca refletida e luz fluorescente, filtro azul e objetiva imersa em óleo de 50X e ocular de 10X. A contagem inclui a discriminação dos macerais dos grupos da vitrinite, inertinite e liptinite. A matéria mineral e a quantidade de pirita também são contabilizadas, dando o total de minerais da amostra. Estes resultados são expressos em percentual do volume.

Avaliação Óptica da Maturação

A avaliação óptica da maturação tem como objetivo analisar a evolução da incarbonização que o carvão sofreu durante a sua formação (Lemos de Sousa et al. 2012). Em oposição à análise de determinação da composição maceral, estas análises de avaliação óptica de maturação são estudos qualitativos. Esta avaliação pode ser efetuada de acordo com as seguintes análises: Reflectância da Vitrinite (%Ra), Índice de Alteração Térmica (IAT) e Fluorescência. A Figura 43 relaciona os valores para cada uma das análises e como se correlacionam com o estado de evolução da maturação da matéria orgânica da rocha.

Maturidade térmica da matéria orgânica	Cor de pólen/ esporos	Correlação com outras escalas		
		TAI 1-5	Reflectância de vitrinite	Fluorescência
Imaturo		1	0,2%	Azul
		1+		Verde
		2-		Amarelo esverdeado
Fase principal matura de geração de petróleo líquido		2	0,5%	Amarelo dourado
		2+		
		3-	0,9%	Laranja
		3		Vermelho
Gás seco ou Estéril		3+	1,3%	Não fluorescência
		4-	2,0%	
		4	2,5%	
		5		

Figura 43 – Tabela relacionando as análises de reflectância de vitrinite (%Ra), Índice de Alteração Térmica (IAT) e Fluorescência com o grau de incarbonização da matéria orgânica.

Reflectância da Vitrinite

A Reflectância de Vitrinite (%Ra) foi medida em um microscópio Olympus BX 51, equipado com uma câmera digital com imagem a preto e branco. As imagens de escala de cinzas das partículas de vitrinite foram analisadas numa rotina do programa MatLab. Esta rotina é uma ferramenta gráfica que é executada dentro da ferramenta MIRONE e

calibra a escala de 256 níveis de cinza com padrões de refletividade conhecidos. Os valores de refletância dos padrões utilizados foram: 0,428%, 0,595%, 0,897%, 1,314%, 1,715%, 3,15% e 5,37%. A %Ra foi medida nas lâminas das amostras em luz incidente com um comprimento de onda de 546 nm e imersão em óleo com um índice de refração de 1,518. Os valores de %Ra que relacionam a maturação da matéria orgânica são: 0,2% corresponde a matéria orgânica pouco incarbonizada e 2,5% corresponde a muito incarbonizada (Figura 43).

Índice de Alteração Térmica (IAT)

O Índice de Alteração Térmica (IAT) é realizado nas lâminas de carvão para a identificação qualitativa da incarbonização da rocha. Este parâmetro é analisado segundo a escala de cores dos esporos e polénes (Figura 43), o índice de alteração térmica da rocha que varia de amarelo claro, para rochas imaturas, a preto, para rochas maduras. Esta técnica é utilizada em conjunto com as análises de Fluorescência e Reflectância da Vitrinite para determinação do grau de incarbonização do carvão.

Fluorescência

A análise qualitativa da fluorescência é feita nos macerais do grupo da liptinite e da vitrinite segundo a Norma ICCP (*International Committee for Coal and Organic Petrology*, Comitê Internacional para Carvão e Petrologia Orgânica) 1976; 1993. Segundo a escala, as cores variam de azul e verde para uma amostra imatura para laranja a vermelho para rochas mais maduras (Figura 43).

Estudo Palinológico

Os estudos palinológicos têm como objetivo identificar os palinomorfos que permitem caracterizar o ambiente de deposição da matéria orgânica, assim como estabelecer a idade da unidade estratigráfica em análise.

As amostras palinológicas foram submetidas a procedimentos laboratoriais de padrão palinológico para extrair e concentrar os resíduos orgânicos. Os resíduos

orgânicos foram oxidados com ácido nítrico fumegante por aproximadamente 1 a 2 minutos (Wood et al. 1996; Riding e Warny 2008). Os resíduos foram montados em lâminas e posteriormente examinados, onde estudo taxonômico e fotomicrográficos foram feitos usando luz óptica BX40 Olympus microscópio equipado com uma câmera digital Olympus C5050. As amostras, os resíduos e as lâminas foram realizados no Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG) em S. Mamede de Infesta (Porto, Portugal).

Determinação das Isotérmicas de Sorção

A determinação das isotérmicas de sorção permite avaliar a capacidade de armazenamento de gás carbônico em carvão, a uma temperatura constante. Nesta seção é apresentado o método utilizado para a análise dos resultados de capacidade de armazenamento de gases em camadas de carvão e em seguida as variáveis que influenciam a capacidade de sorção destes gases pelo carvão.

Com o objetivo de estudar o potencial de armazenamento de gás carbônico, um dos melhores métodos para estudar o armazenamento de gases em camadas de carvão são os modelos de sorção (Rodrigues, Dinis e Lemos de Sousa 2016). Estes modelos descrevem o mecanismo capaz de caracterizar quantitativamente a relação entre gás absorvido/livre e o gás armazenado (adsorvido) na matriz do carvão, a uma temperatura constante, igual à temperatura do reservatório. Vários modelos baseados em sorção por equilíbrio podem ser utilizados para explicar o comportamento do armazenamento de gases na estrutura do carvão, como o modelo de Gibbs, o modelo teórico do potencial e o modelo de Langmuir (Rodrigues, Dinis e Lemos de Sousa 2016). Segundo Rodrigues (2002), o melhor modelo para estudar os dados de sorção de gás em camada de carvão é o de Langmuir, pelo fato de resultarem em uma boa descrição das isotermas se sorção quando realizadas em amostras de carvão.

As isotermas de sorção foram realizadas utilizando o método volumétrico calibrado segundo o princípio de Boyle-Mariotte. Este equipamento foi submetido a um banho isoterma para reprodução da temperatura real na camada de carvão. Foi utilizado o Modelo de Langmuir, uma vez que é considerado o mais preciso para estudos de processo de sorção em amostras de carvão (Rodrigues 2002).

Segundo Rodrigues (2002), a precisão dos dados experimentais depende de alcançar o estágio de estabilização a cada etapa de incremento ou diminuição da pressão durante os processos de sorção e dessorção, ou seja, a fase adsorvida e a fase livre devem estar em equilíbrio dinâmico em uma das etapas da pressão após tempo suficiente. Na realidade, para que seja atingido o equilíbrio dinâmico em cada etapa de pressão, a pressão não pode apresentar variações na ordem dos 0,1 psi ($\cong 6,9 \times 10^{-4}$ Mpa) por um período de 30 minutos. Um outro parâmetro fundamental para a precisão dos dados experimentais está relacionado com o fator de volume de formação de gás, que terá que ser calculado em cada uma das etapas de pressão mencionadas anteriormente, levando em conta os pontos críticos dos gases puros e os pontos pseudocríticos das misturas de gases.

As características do carvão que influenciam na sorção de gases são: grau de maturação ou grau de incarbonização, composição petrográfica e conteúdo em matéria mineral (Rodrigues 2002).

De acordo com o estudo de Rodrigues e Lemos de Sousa (2002), quanto maior o grau de maturação, de uma forma geral, maior a capacidade de armazenamento, ou seja, maior a sorção de gás no carvão. A influência da composição petrográfica está diretamente relacionada com quantidade dos diferentes grupos de macerais, principalmente do grupo da vitrinite e da inertinite. Na base livre de matéria mineral, quanto maior a quantidade dos macerais do grupo da vitrinite, maior a capacidade de armazenamento da amostra de carvão; e quanto maior a quantidade de inertinite, menor será a capacidade de armazenamento da amostra.

A relação positiva entre a capacidade de sorção e o conteúdo de vitrinite decorre de sua porosidade orgânica: o volume de poros e o diâmetro dos poros (predominantemente inferior a 2nm – microporos enquanto que o grupo de inertinite e caracterizado por meso a macroporos), e a área de superfície interna, comparativamente maior a de outros grupos macerais como inertinite, resultam na maior capacidade de sorção de dióxido de carbono (Rodrigues 2002). Além disso, com o aumento da maturação ocorre uma maior diminuição da microporosidade do grupo da vitrinite quando comparado com a diminuição dos poros do grupo da inertinite. A matéria mineral, ou seja, a composição inorgânica do carvão, atua como inibidor na sorção de gás, reduzindo

a capacidade de armazenamento no carvão. A distribuição da matéria mineral no carvão também influencia na sorção de gases, isto é, se a matéria mineral estiver disseminada na rocha ou concentrada em camadas ou em aglomerações, como por exemplo, se minerais como sulfetos e silicatos estiverem distribuídos em camadas ou aglutinados aleatoriamente na rocha, interfere na capacidade de armazenamento da rocha (Rodrigues 2002).

6.4 Resultados Analíticos em Diferentes Bases

Os resultados analíticos, como os das análises química e imediata é necessário que sejam apresentados “na mesma base” de análise, neste sentido será importante empregar uma Norma de ensaio que uniformize todos os resultados. Para isso, escolhe-se a base para os ensaios, nomeadamente (Lemos de Sousa et al. 2012):

- “como recebido” ou “como amostrado”, quando a umidade total da amostra não é subtraída;
- “seco”, quando a umidade da amostra é subtraída dos resultados;
- “seco sem cinzas”, quando tanto a umidade da amostra e o teor em cinzas são desconsiderados;
- “seco sem matéria mineral”, quando a umidade da amostra e o teor em matéria mineral são desconsiderados.

Neste estudo as análises contemplarão a base seca, no caso, há a subtração da umidade higroscópica da amostra para análise.

Neste capítulo foram descritas as análises químicas, físico-químicas e geoquímicas, estudos petrológicos, palinológicos e a determinação das isotérmicas de sorção. Para cada técnica é informada a Norma utilizada. No capítulo seguinte serão apresentados os resultados.

CAPÍTULO 7 – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

7.1. Introdução

Neste capítulo, os resultados são, numa primeira parte, apresentados de acordo com os diferentes métodos analíticos descritos no capítulo anterior, nomeadamente, as análises químicas, os ensaios físico-químicos e geoquímicos, os estudos petrológicos e os estudos palinológicos para as amostras de carvão que nomeadas de ‘tal qual’, ou seja, que foram analisados sem serem concentrados. A partir desses resultados, os carvões analisados foram classificados de acordo com as Normas ASTM D388-15 (2015) e a ISO 11760:2005 (2005), tanto para as amostras ‘tal qual’ quanto para as amostras ‘lavadas’, isto é, amostras que passaram por ensaios de densidade para concentrar a matéria orgânica da rocha.

A segunda parte deste capítulo consiste na determinação e interpretação das isotérmicas de Langmuir tendo em conta as características químicas e físicas das amostras selecionadas para o estudo, uma vez que o objetivo principal deste trabalho consiste na avaliação do potencial das camadas Bonito e Barro Branco da Formação Rio Bonito. Os resultados destas avaliações serão apresentados separadamente, em amostras da camada Bonito e em amostras da camada Barro Branco.

7.2. Resultados

Análises Químicas

Neste subcapítulo são apresentados os resultados das análises químicas, nomeadamente análise imediata, análise elementar e fluorescência de raios-X (Anexo 1 e 3).

Os resultados para as análises imediatas são apresentados na Tabela 8. As amostras da camada Bonito apresentam uma certa homogeneização, nomeadamente, o teor em cinzas oscila entre 45,95 e 54,62%, o teor em matéria volátil varia entre 17,05 e 21,73%, e o teor em umidade higroscópica varia entre 1,05 e 1,12%. Sendo a percentagem em carbono fixo calculada a partir dos valores das análises anteriores (CZ e MV), estes valores não poderiam apresentar fortes oscilações (28,33 a 32,32%).

No caso das amostras da camada Barro Branco (Tabela 8), os resultados apresentam uma maior heterogeneidade, isto é, o teor em cinzas varia entre 22,66 e 42,39%, o teor em matéria volátil variou de 21,59 e 29,59%, e o teor em umidade higroscópica varia entre 0,68 e 1,53%. O carbono fixo calculado, nesta camada, oscila entre 35,70 a 47,75%.

Tabela 8 – Resultados das Análises Imediatas das camadas Bonito e Barro Branco (Formação Rio Bonito).

Análises Imediatas					
Camada	Amostra	CZ	MV	CF	UH
Bonito	CR2	45,95	21,73	32,32	1,10
	CR5	54,62	17,05	28,33	1,12
	CR7	50,83	17,43	31,74	1,05
Barro Branco	CR1	40,93	23,37	35,70	1,42
	CR3	42,39	21,59	36,02	0,68
	CR4	31,92	27,78	40,30	0,74
	CR6	22,66	29,59	47,75	1,53

A Tabela 9 resume os resultados das análises elementares para as amostras das camadas Bonito e Barro Branco, destacando as porcentagens de enxofre total (St%), carbono (C%), hidrogênio (H%), nitrogênio (N%) e oxigênio (O%).

Em relação aos resultados das análises elementares, para a camada Bonito (Tabela 9), as amostras apresentam uma heterogeneidade, notadamente, o teor em enxofre varia entre 3,62 e 9,57%, o teor em carbono oscila entre 38,03 e 43,11%, o teor em hidrogênio varia entre 2,84 e 3,16%, o teor em nitrogênio oscila entre 0,84 e 1,20%, e por fim, o teor em oxigênio não foi detectado.

Os resultados da camada Barro Branco apresentam uma maior heterogeneidade, isto é, o teor em enxofre varia entre 4,61 e 12,88%, o teor em carbono oscila entre 48,09 e 62,90%, o teor em hidrogênio varia entre 3,48 e 4,56%, o teor em nitrogênio varia em 1,05 e 1,55% e, por fim, o teor em oxigênio varia entre 0,23 e 1,56%, sendo determinado apenas para as amostras CR6 e CR1, respectivamente.

Tabela 9 – Resultados das Análises Elementares das camadas Bonito e Barro Branco.

Análises Elementares						
Camada	Amostra	St (%)	C (%)	H (%)	N (%)	O (%)
Bonito	CR2	9,57	43,11	3,16	1,20	-
	CR5	4,08	38,03	2,84	0,84	-
	CR7	3,62	42,90	3,07	0,92	-
Barro Branco	CR1	4,61	48,09	3,73	1,05	1,56
	CR3	5,90	48,67	3,48	1,19	-
	CR4	12,88	52,69	3,89	1,34	-
	CR6	8,10	62,90	4,56	1,55	0,23

A Tabela 10 apresenta os resultados dos ensaios de Fluorescência de Raios-X para as amostras realizadas (Anexo 3). Os teores de SO₃ são determinados normativamente e são fundamentais para determinar o teor em matéria mineral do carvão que é, igualmente, feito por meio de cálculos normalizados. Os resultados para a camada Bonito (Tabela 10) oscilam entre 0,74 e 1,15%. Já para camada Barro Branco (Tabela 10), este teor varia entre 0,06 e 1,18%.

Tabela 10 – Resultados da análise de Fluorescência de raios-X para as camadas Bonito e Barro Branco.

Camada	Amostra	SO ₃ (%*)
Bonito	CR2	1,15
	CR5	0,85
	CR7	0,74
Barro Branco	CR1	0,10
	CR3	1,18
	CR4	0,09
	CR6	0,06

*= porcentagem em cinzas

Ensaio Físico-Químico e Geoquímico

Os ensaios físico-químicos abrangem os resultados de Poder Calorífico Superior, enquanto os ensaios geoquímicos incluem os resultados de Carbono Orgânico Total (COT) e Pirólise (Rock Eval) (Anexo 1 e 6).

A Tabela 11 apresenta os resultados de Poder Calorífico Superior para as amostras analisadas. Os valores de poder calorífico superior, para a camada Bonito, variam entre 3459 e 3997 cal/g, enquanto que, para a camada Barro Branco, os resultados variam entre 4493 e 5964 cal/g, apresentando maior heterogeneidade do que os valores para a camada Bonito.

Tabela 11 - Valores do Poder Calorífico Superior.

Camada	Amostra	Poder Calorífico Superior (cal/g)
Bonito	CR2	3997
	CR5	3459
	CR7	3899
Barro Branco	CR1	4567
	CR3	4493
	CR4	5075
	CR6	5964

A Tabela 12 apresenta os resultados para os ensaios geoquímicos, que incluem as análises de Carbono Orgânico Total (COT) e Pirólise (Rock Eval). Para a camada Bonito (Tabela 12), os valores obtidos da Pirólise (Rock Eval) para o parâmetro S1 varia entre 1,43 e 7,63 mg/g, para o S2 varia entre 95,75 e 143,4 mg/g, para o pico S3 varia entre 0,27 e 0,86 mg/g. A temperatura máxima (Tmax) do pico S2 varia entre 441 e 450 °C. O Carbono Orgânico Total (COT) oscila entre 37,00 a 50,20%. O Índice de Hidrogênio (IH) varia entre 259 e 286 e o Índice de Oxigênio (IO) varia entre 0,71 e 1,71.

Na camada Barro Branco (Tabela 12), os valores estão mais dispersos: S1 varia entre 3,40 e 8,49 mg/g, S2 varia entre 71,08 a 204,04 mg/g, pico S3 oscila entre 0,19 e 0,85mg/g, T_{máx} oscila entre 436 e 456 °C. O valor de COT oscila entre 29,70 e 61,40%. O valor de IH varia entre 239 a 332 e o IO varia entre 0,35 e 1,38.

Tabela 12 – Resultados das análises de COT e Pirólise (Rock Eval) das camadas Bonito e Barro Branco.

Camada	Amostra	COT	Pirólise (Rock Eval 6)					
		(Leco) COT (%)	S1 (mg/g)	S2 (mg/g)	S3 (mg/g)	Tmax (°C)	IH (mg/g)	IO (mg/g)
Bonito	CR2	50,2	3,75	143,4	0,86	441	286	1,71
	CR5	37	1,43	95,75	0,34	441	259	0,92
	CR7	37,99	7,63	108,3	0,27	450	285	0,71
Barro Branco	CR1	29,7	3,4	71,08	0,36	436	239	1,21
	CR3	52	7,77	136,5	0,19	456	262	0,37
	CR4	60,8	11,61	192,6	0,21	442	317	0,35
	CR6	61,4	8,49	204	0,85	443	332	1,38

Estudos Petrológicos

Os estudos petrológicos incluem a determinação da composição dos macerais, e a avaliação óptica da maturação das amostras, onde são empregadas as técnicas de poder refletor do grupo da vitrinite (%Ra) e a combinação dos resultados de Fluorescência de esporos e o Índice de Alteração Térmico (IAT) dos grupos de macerais (Anexo 5).

A Tabela 13 apresenta os resultados de determinação da composição dos macerais. A camada Bonito aparenta maior homogeneidade: a quantidade de vitrinite varia entre 33 e 41%, a de inertinite entre 22 e 28% e a de liptinite entre 17 e 26%. A matéria mineral oscila entre 9 e 27%, da qual a quantidade de pirita varia entre 1 e 4% nesta camada. A semi-fusinite, mesmo sendo um maceral do grupo da inertinite, apresenta características de sorção semelhantes ao grupo da vitrinite, sendo, portanto, importante seu destaque, cuja quantidade varia entre 10 e 16% na camada Bonito.

No caso da camada Barro Branco (Tabela 13), as amostras são mais heterogêneas: a quantidade de vitrinite oscila entre 46 e 73%, a de inertinite varia entre 6 e 24% e a de liptinite varia entre 9 e 13%. A matéria mineral varia entre 13 e 25%, da qual a concentração de pirita varia entre 2 e 9%. A semi-fusinite oscila, nas amostras desta camada, entre 2 e 9%.

Os resultados de Índice de Hidrogênio (Tabela 12) não foram analisados no diagrama de Van Krevelen modificado para a classificação do cerogênio, uma vez que o valor alto deste parâmetro indicaria, primeiramente, que a composição macerálica das amostras seria predominantemente formada pelo grupo da liptinite. Na realidade, os valores elevados do Índice de Hidrogênio estão intimamente relacionados com o grau de impregnação em petróleo destas amostras de carvão. Aspecto este que foi diagnosticado nos estudos petrológicos. Adicionalmente, os resultados dos estudos petrológicos não indicaram a predominância dos macerais do grupo da liptinite, portanto, se fosse realizada a classificação do cerogênio, ocorreria uma interpretação errônea dos resultados em relação à composição macerálica das amostras.

Tabela 13 – Quantidade de macerais para as camadas Bonito e Barro Branco.

Camada	Amostra	Macerais (% em volume)					Total Minerais
		Vitrinite	Inertinite (SF*)	Liptinite	MM	Pirita	
Bonito	CR2	41	25 (10)	26	8	1	9
	CR5	35	22 (16)	17	23	4	27
	CR7	33	28 (11)	25	13	1	14
Barro Branco	CR1	46	15 (9)	13	21	4	25
	CR3	51	24 (9)	11	12	2	14
	CR4	64	11 (4)	11	5	9	14
	CR6	73	6 (2)	9	8	5	13

SF* = quantidade de semi-fusinite (grupo da inertinite).

Os resultados de avaliação óptica de macerais são apresentados na Tabela 14. Na camada Bonito, esses resultados apresentam-se mais homogêneos: a reflectância de vitrinite varia entre 0,68 e 0,7%, o IAT teve os mesmos índices para as três amostras desta camada de 2+/3- e a fluorescência dos esporos também apresentou o mesmo resultado de cor amarelo dourado. Já a camada Barro Branco apresentou uma maior variação em seus resultados: a reflectância de vitrinite varia entre 0,64 e 0,87%. O valor de 0,87% corresponde à camada CR3 que estava mais próxima da intrusão magmática. O IAT teve três valores distintos, apresentando para as amostras CR1 e CR4, um índice de 2+/3-, correspondendo a fluorescência na cor de amarelo dourado, a amostra CR3 obteve um IAT 3+ e fluorescência não determinada, e, para a amostra CR6, índice 3-/3+ e com fluorescência de cor laranja escuro.

Tabela 14 – Resultados das análises ópticas de maturação das camadas Bonito e Barro Branco.

Camada	Amostra	Análise óptica de maturação		
		%Ra	IAT	Fluorescência Esporos
Bonito	CR2	0,70	2+/3-	Amarelo Dourado
	CR5	0,68	2+/3-	Amarelo Dourado
	CR7	0,70	2+/3-	Amarelo Dourado
Barro Branco	CR1	0,66	2+/3-	Amarelo Dourado
	CR3	0,87	3+	
	CR4	0,66	2+/3-	Amarelo Dourado
	CR6	0,64	3-/3	Laranja escuro

Estudo Palinológico

A Tabela 15 apresenta os resultados para a análise dos grupos de palinomorfos das camadas Bonito e Barro Branco (Anexo 7). A camada Bonito possui variação relativa de 14,7 a 18% para esporos levigados. Para esporos apiculados, a concentração variou de 10 a 13,3%. Os esporos cingulizados variaram de 58,0 a 65,3%. O pólen monossacado variou de 0,7 a 1,3%. O pólen bissacado variou de 1,7 a 2,0 e o pólen estriado variou de 1,3 a 2,0. A alga clorofícea variou de 0,7 a 1,3%, nas amostras CR5 e CR7, respectivamente, e não foi encontrada na amostra CR2.

A camada Barro Branco possui variação relativa de 15,3 a 36,0% de esporos levigados. Para esporos espiculados, variou de 6,7 a 26%. Esporos cingulizados, variaram de 31,3 a 68,7%. Já para as frequências relativas dos pólenes monossacados, variou de 0,7 a 2,7%, sendo para as amostras CR4 e CR1, respectivamente, e para as amostras CR3 e CR6 não foram encontrados. Para o pólen bissacado, variou de 2,7 a 9,3%. O pólen estriado variou de 1,3 a 4,0%. E, por fim, para a alga clorofícea, houve variação de 0,7 a 5,3%, onde, para a amostra CR6, não foi observada nenhuma frequência deste polimorfo.

Tabela 15 – Resultado da análise dos grupos de palinomorfos das camadas Bonito e Barro Branco, em frequência relativa de grupos de palinomorfos nas amostras estudadas (em %).

Camada	Amostra	Esporos levigados	Esporos apiculados	Esporos cingulizados	Pólen monossacados	Pólen bissacados	Pólen estriados	Algas clorofíceas
Bonito	CR2	18,0	13,3	65,3	0,7	1,3	1,3	0,0
	CR5	14,7	10,0	65,3	1,3	5,3	2,0	1,3
	CR7	19,3	12,0	58,0	0,7	7,3	2,0	0,7
Barro Branco	CR1	29,3	13,3	46,7	2,7	2,7	2,7	2,7
	CR3	36,0	26,0	31,3	0,0	4,0	2,0	0,7
	CR4	30,0	14,7	36,0	0,7	9,3	4,0	5,3
	CR6	15,3	6,7	68,7	0,0	8,0	1,3	0,0

De acordo com a análise dos grupos de palinomorfos encontrados e com estudos de Souza e Marques Toigo (2003, 2005), Souza (2006) e Pereira et al. (2019), as amostras das camadas Bonito e Barro Branco são correlatas a Zona *Vittatina costabilis* e a Subzona *Protohaploxypinus goraiensis*. Portanto, datam do Cisuraliano inferior (Permiano inferior).

Em termos de paleoambientes deposicionais, o conteúdo palinológico identificado sugere predominância de licófitas arbóreas e herbáceas dentre a comunidade de plantas formadoras de turfa (Pereira et al. 2019). Comparativamente, as amostras da camada Barro Branco apresentam maior conteúdo de algas, indicando possível influência de fácies fluviais ou lagunares (Pereira et al. 2019).

7.3. Classificação dos carvões segundo a Norma ASTM D388-15 e a Norma ISO 11760:2005

A classificação dos carvões, por serem rochas, é de grande importância pois devido as diferentes qualidades revelam características essenciais para seu estudo, beneficiamento e utilização (Lemos de Sousa et al. 2012). Existem muitos sistemas e normas para classificar o carvão, mas as mais utilizadas são a Norma ASTM e a ISO.

A ASTM fornece informações em relação ao parâmetro de grau, como, teor em carbono fixo, teor em matérias voláteis e poder calorífico superior, sendo, portanto, mais indicado a carvões com maior composição de macerais do grupo da vitrinite. No entanto, na prática da nomenclatura do carvão, que deveria fornecer informações em relação aos atributos destas rochas em relação ao seu tipo de jazigo e à caracterização dos tipos de ocorrência num âmbito de classificação internacional, a norma ISO é a mais completa (Lemos de Sousa et al. 2012). Esta norma fornece as seguintes propriedades: grau, composição petrográfica e categoria. Para estabelecer o grau do carvão, são utilizados os parâmetros de reflectância da vitrinite e o valor da umidade calculado “como amostrado”, assim classificando os carvões em relação ao seu grau de incarbonização. Já a composição petrográfica se refere à quantidade de macerais dos grupos da vitrinite. E por fim, a classificação com base na categoria se faz em relação ao teor em cinzas, calculado na “base seco” (Lemos de Sousa et al. 2012).

As sete amostras de carvão analisadas neste trabalho foram classificadas de acordo com a Norma ASTM D388-15 e a Norma ISO 11760:2005. A classificação foi feita para dois tipos de materiais: carvão Tal - Qual e carvão Lavado.

Amostra Tal – Qual

As amostras Tal-Qual correspondem a amostras em Bruto tal como colhidas nas minas e afloramentos. Por terem sido analisadas juntamente com os estéreis (rochas sedimentares) que se encontram associadas às camadas de carvão, nos resultados químicos e geoquímicos, apresentam teores em matéria orgânica menores quando comparadas às amostras Lavadas. A Tabela 16 apresenta a classificação dos carvões para a Norma ASTM D388-15 e a Tabela 17 apresenta a classificação dos carvões para a Norma ISO 11760:2005.

As amostras Tal-Qual são classificadas, segundo a Norma ASTM (Tabela 16), como Carvão betuminoso altamente volátil A; apenas as amostras CR5 e CR7 são classificadas como Carvão betuminoso medianamente volátil. Segundo a Norma ISO (Tabela 17), as amostras são classificadas do seguinte modo: Grau de carbonificação – Carvão betuminoso C; Composição Petrográfica – Vitrinite variável (entre alta a baixa); Categoria – Cinzas altas (seis amostras) e moderadamente altas (amostra CR-6).

Tabela 16 – Classificação das amostras Tal-Qual de carvão de acordo com a Norma ASTM.

Classificação ASTM (D388-15)				
Amostra	Teor em carbono fixo CF [s,smm] ¹ (%)	Teor em matérias voláteis MV [s,smm] ¹ (%)	Poder calorífico superior PCs [h,smm] ² (Btu/lb)	Classe/Grupo
CR1	66	34	8104	Carvão betuminoso altamente volátil A
CR2	66	34	7115	Carvão betuminoso altamente volátil A
CR3	67	33	8032	Carvão betuminoso altamente volátil A
CR4	66	34	9067	Carvão betuminoso altamente volátil A
CR5	70	30	6956	Carvão betuminoso medianamente volátil
CR6	65	35	10571	Carvão betuminoso altamente volátil A
CR7	71	29	6945	Carvão betuminoso medianamente volátil
¹ - seco, sem matéria mineral ² - húmido, sem matéria mineral				

Tabela 17 – Classificação das amostras Tal-Qual de carvão de acordo com a Norma ISO.

Classificação ISO (11760:2005)						
Amostra	Poder refletor aleatório da vitrinite (Ra, %)	Vitrinite V (% em volume, smm) ¹	Teor em cinzas Cz (% massa, s) ²	Grau de carbonificação	Composição petrográfica	Categoria
CR1	0,7	62	41	Betuminoso C	Vitrinite Moderadamente Alta	Cinzas Altas
CR2	0,7	45	46	Betuminoso C	Vitrinite Média	Cinzas Altas
CR3	0,9	59	42	Betuminoso C	Vitrinite Média	Cinzas Altas
CR4	0,7	74	32	Betuminoso C	Vitrinite Moderadamente Alta	Cinzas Altas
CR5	0,7	47	55	Betuminoso C	Vitrinite Média	Cinzas Altas
CR6	0,6	83	23	Betuminoso C	Vitrinite Alta	Cinzas Moderadamente Altas
CR7	0,7	39	51	Betuminoso C	Vitrinite Baixa	Cinzas Altas
¹ - sem matéria mineral ² - seco						

Amostra Lavada

A amostra Lavada se refere às amostras de carvão que foram submetidas a separação à densidade <1,35 para a concentração da matéria orgânica com a finalidade de analisar mais precisamente a composição orgânica da camada (Anexos 2 e 4). A Tabela 18 apresenta a classificação dessas amostras pela Norma ASTM D388-15 e a Tabela 19 para a Norma ISO 11760:2005.

As amostras Lavadas são classificadas, de acordo com a Norma ASTM (Tabela 18) em carvão betuminoso altamente volátil A e, segundo a Norma ISO (Tabela 19), Carvão betuminoso C.

Tabela 18 – Classificação das amostras Lavada de carvão de acordo com a Norma ASTM.

Classificação ASTM (D388-15)				
Amostra	Teor em carbono fixo CF [s,smm] ¹ (%)	Teor em matérias voláteis MV [s,smm] ¹ (%)	Poder calorífico superior PCs [h,smm] ² (Btu/lb)	Classe/Grupo
CR1	60	40	13243	Carvão betuminoso altamente volátil A
CR2	63	37	13452	Carvão betuminoso altamente volátil A
CR3	65	35	13996	Carvão betuminoso altamente volátil A
CR4	58	42	13863	Carvão betuminoso altamente volátil A
CR5	68	32	13085	Carvão betuminoso altamente volátil A
CR6	60	40	13419	Carvão betuminoso altamente volátil A
CR7	61	39	13829	Carvão betuminoso altamente volátil A
¹ - seco, sem matéria mineral ² - húmido, sem matéria mineral				

Tabela 19 – Classificação das amostras Lavada de carvão de acordo com a Norma ISO.

Classificação ISO (11760:2005)						
Amostra	Poder refletor aleatório da vitrinite (Ra, %)	Vitrinite V (% em volume, smm) ¹	Teor em cinzas Cz (% massa, s) ²	Grau de carbonificação	Composição petrográfica	Categoria
CR - 01	0,7	62	9	Betuminoso C	Vitrinite Moderadamente Alta	Cinzas Baixas
CR - 02	0,7	45	8	Betuminoso C	Vitrinite Média	Cinzas Baixas
CR - 03	0,9	59	8	Betuminoso C	Vitrinite Média	Cinzas Baixas
CR - 04	0,7	74	8	Betuminoso C	Vitrinite Moderadamente Alta	Cinzas Baixas
CR - 05	0,7	47	7	Betuminoso C	Vitrinite Média	Cinzas Baixas
CR - 06	0,6	83	8	Betuminoso C	Vitrinite Alta	Cinzas Baixas
CR - 07	0,7	39	7	Betuminoso C	Vitrinite Baixa	Cinzas Baixas
¹ - sem matéria mineral ² - seco						

7.4. Determinação e Interpretação das Isotérmicas de Langmuir

As análises de sorção e dessorção de gás foram realizadas pelo método volumétrico de Langmuir, a uma temperatura constante de 35°C (Anexo 8). A Tabela 20 apresenta a capacidade de armazenamento de gás carbônico nas camadas Bonito e Barro Branco.

Tabela 20 – Resultados de sorção/dessorção de gás para as amostras das camadas Bonito e Barro Branco, a pressão de 400 psi.

Camada	Amostra	T(°C)	Pressão (psi)	Volume (scf/ton*)	Volume (m ³ /t)
Bonito	CR2	35	400	175	4,95
	CR5	35	400	180	5,09
	CR7	35	400	210	5,94
Barro Branco	CR1	35	400	180	5,09
	CR3	35	400	235	6,65
	CR4	35	400	235	6,65
	CR6	35	400	275	7,79

*scf/ton = *standard cubic feet* por tonelada.

A capacidade de armazenamento da camada Bonito varia entre 175 e 210 scf/ton (4,95 e 5,94 m³/t), a uma pressão de 400 psi. Já para as amostras da camada Barro Branco, a capacidade de armazenamento oscila entre 180 e 275 scf/ton (5,09 e 7,79 m³/t).

A Figura 44 apresenta as isotermas para as amostras da camada Bonito.

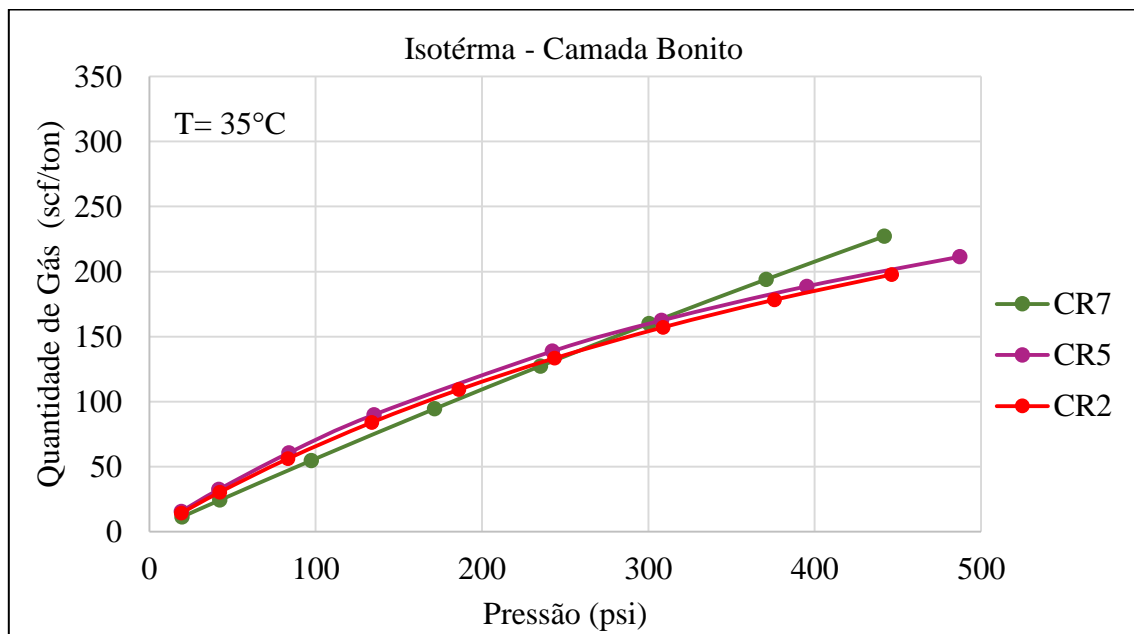


Figura 44 – Isotermas de sorção realizadas nas amostras CR2, CR5 e CR7.

As amostras com menor capacidade de armazenamento da camada Bonito são a CR2 e CR5, ambas com aproximadamente a mesma resposta aos ensaios de sorção,

respectivamente 175 e 180 scf/ton (4,95 e 5,09 m³/t) a uma pressão de 400 psi. Isto é decorrente do fato de ambas as amostras apresentarem composição de macerais próximas, com destaque para a soma dos teores de vitrinite e semi-fusinite: 51% para as duas amostras.

De acordo com a Tabela 15, a amostra CR2 possui, em sua composição, 41% de macerais do grupo da vitrinite, 25% do grupo da inertinite (sendo 10% de semi-fusinite), 26% do grupo da liptinite e apenas 9% de matéria mineral. A amostra CR5 possui 35% de macerais do grupo da vitrinite, 22% de macerais do grupo da inertinite (sendo 16% de semi-fusinite), 17% de liptinite e 27% de matéria mineral.

A amostra de maior capacidade de armazenamento da camada Bonito é a CR7, com volume de 210 scf/ton (5,94 m³/t) a uma pressão de 400 psi, o que pode ser justificado pelo maior teor de inertinite (28%) nessa amostra em relação às amostras CR2 (25%) e CR5 (22%).

A Figura 45 apresenta as isotermas para as amostras da camada Barro Branco.

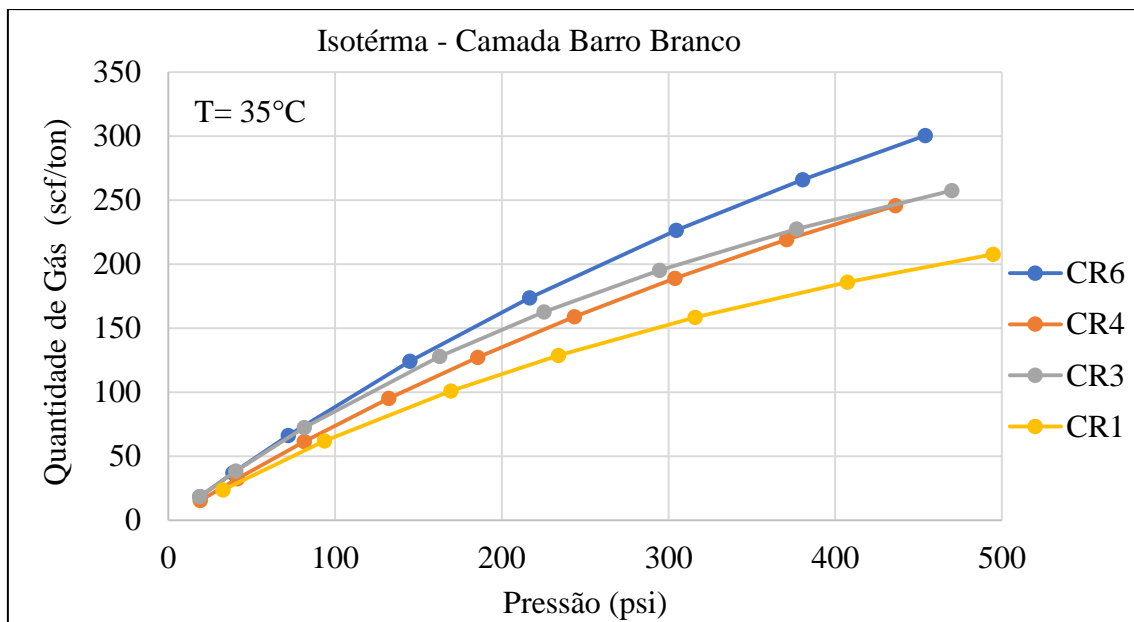


Figura 45 – Isotermas de sorção realizadas nas amostras CR1, CR3, CR4 e CR6.

Para a camada Barro Branco, a amostra de menor capacidade de armazenamento é a CR1, com capacidade de 180 scf/ton (5,09 m³/t) a uma pressão de 400 psi. Esta

amostra possui a menor quantidade de macerais do grupo da vitrinite da camada, com apenas 46%.

As amostras CR3 e CR4 possuem a mesma capacidade de armazenamento de, aproximadamente, 235 scf/ton (6,65 m³/t) a uma pressão de 400 psi. Isto é pode ser explicado pelo fato de ambas as amostras apresentarem composição de macerais próximas, com destaque para a soma dos teores de vitrinite e inertinite: 75% para as duas amostras.

A amostra CR3 é composta por 51% de macerais do grupo da vitrinite, 24% do grupo da inertinite (sendo 9% de semi-fusinite), 11% do grupo da liptinite e 14% de matéria mineral. Já a amostra CR4 possui 64% de macerais do grupo da vitrinite, 11% do grupo da inertinite (sendo 4% de semi-fusinite), 11% de macerais do grupo da liptinite e um total de 14% de matéria mineral.

A amostra de maior capacidade de armazenamento da camada Barro Branco é a CR6, onde armazena 275 scf/ton (7,79 m³/t) à 400 psi. Esta amostra apresenta a maior quantidade de macerais do grupo da vitrinite na camada, com 73%.

Assim sendo, conclui-se que a Formação Rio Bonito é caracterizada por possuir duas camadas de carvão distintas em que claramente a relação entre os ambientes de deposição leva a distintas composições petrográficas. Nos estudos de Corrêa da Silva (1991) e Pereira et al. (2019) afirmam que a camada Barro Branco apresenta maior variação de fluxo fluvial (aporte fluvial) que justifica o maior conteúdo de macerais do grupo da vitrinite e, portanto, apresenta a maior capacidade de armazenamento. Num âmbito de avaliação do potencial de sequestração na Bacia do Paraná, pode-se colocar que é possível armazenar dióxido de carbono nas camadas ricas em carvão das minas localizadas na região Sul do Brasil.

CAPÍTULO 8 – CONCLUSÕES

De acordo com previsões (BP 2018; Rodrigues 2018), os combustíveis fósseis se manterão como opção de fonte primária de energia, mas perderão protagonismo conforme o aperfeiçoamento de tecnologias de fontes renováveis. Considerando as estratégias estabelecidas pelas Nações Unidas, expõe-se um cenário no qual a aplicação em larga escala das tecnologias de captação e armazenamento de CO₂ (CCS) é a única alternativa para que as metas de redução das emissões de CO₂ sejam atingidas.

O carvão permanecerá relevante na matriz energética global e na importância estratégica das tecnologias CCS, como apresentado neste trabalho. Portanto, visou-se estudar o potencial de aproveitamento das reservas brasileiras de carvão em conjunto com as tecnologias CCS, abrindo um novo caminho de aplicação deste recurso fóssil, hoje explorado nas camadas estudadas para fins termelétricos.

A área de seleção de amostras foi baseada na relevância histórica das minas de carvão em Criciúma, localizada no estado de Santa Catarina (Brasil), além da importância econômica desse recurso para a região, através do fornecimento de carvão para geração de energia. Nesta região, o carvão da Bacia do Paraná ocorre no Grupo Guatá na Formação Rio Bonito. As camadas de carvão estudadas pertencem ao Membro Siderópolis: Barro Branco e Bonito. Destas camadas, foram analisadas sete amostras, sendo quatro da camada Barro Branco e três da camada Bonito.

Com base nos resultados analisados, o carvão estudado é classificado como:

- Classificação ASTM D 388-15

As amostras CR-5 e CR-7 como Carvão betuminoso medianamente volátil e, todas as restantes, como Carvão betuminoso altamente volátil A.

- Classificação ISO 11760:2005

Todas as amostras como: Grau de carbonificação – Carvão betuminoso C; Composição Petrográfica – Vitrinite variável (entre alta a baixa); Categoria – Cinzas altas (amostras CR1, CR2, CR3, CR4, CR5 e CR7) e moderadamente altas (amostra CR6).

A este respeito e, por último, faz-se notar que na sequência do trabalho apresentado em eventos internacionais, mas não publicado, de Corrêa da Silva et al. (1999) é esta a primeira vez em que se classificam carvões brasileiros pela Norma ASTM D388-05, seguindo a totalidade das especificações e respectivos cálculos corretivos indicados na mesma Norma.

A classificação internacional da Norma ISO 11760-2005 foi, igualmente, utilizada. Em ambos os casos e com fins comparativos usaram-se amostras Tal-Qual e, bem assim, as mesmas amostras Lavadas à densidade $<1,35$.

As amostras estudadas possuem variação de composição macerálica: a camada Barro Branco possui maior concentração de vitrinite, em comparação às amostras da camada Bonito. Na camada Barro Branco, a concentração de macerais do grupo da vitrinite chega a 73%, enquanto na camada Bonito a amostra de maior concentração é de 41%.

A reflectância de vitrinite (%Ra), para ambas as camadas, é semelhante, variando entre 0,68 a 0,70% na camada Barro Branco e entre 0,64 a 0,66% na camada Bonito. Apenas a amostra CR3, da camada Bonito, apresentou %Ra acima desses valores (0,87%), pois esta amostra de carvão foi retirada de local mais próximo da intrusão magmática, razão pela qual apresenta um grau de maturação artificialmente maior.

Tendo sido os ensaios experimentais realizados a uma temperatura constante de 35°C, a camada Barro Branco apresenta uma capacidade de armazenamento de CO₂ maior que a camada Bonito a uma pressão de 400 psi, variando entre 180 e 275 scf/ton (5,09 e 7,79 m³/t), enquanto a camada Bonito varia entre 175 a 210 scf/ton (4,95 e 5,94 m³/t). Dentre as amostras analisadas, a maior capacidade de armazenamento de CO₂ é atribuída à amostra CR6, da camada Barro Branco, com 275 scf/ton (7,79 m³/t) de CO₂ armazenado a uma pressão de 400 psi, que pode ser justificada pelo maior teor de vitrinite identificado nessa amostra (de 73%). No entanto, estimativas realizadas anteriormente, embora não se

preceba até que ponto são equiparáveis aos valores apresentados neste trabalho, uma vez que não possuímos nenhuma informação quanto à temperatura de realização dos ensaios experimentais, sugerem uma capacidade de armazenamento de gás metano de 1,00 m³/t para a Formação Rio Bonito (Kalkreuth et al. 2008), e uma capacidade de armazenamento de CO₂ variando entre 4,44 e 7,02 m³/t para a Formação Rio Bonito (Santarosa 2012). Também Soares et al. (2007) estudaram, em termos meramente físicos, uma série não especificada de amostras de carvão Catarinense na qual definiram valores de capacidade de adsorção de CO₂ entre 0,089 e 0,186 mmol CO₂/g (2,21 – 4,62 m³/t; 78 – 163 scf/ton).

O ambiente de deposição destas camadas está diretamente relacionado à composição macerálica do carvão estudado. De acordo com os resultados, a camada Barro Branco apresenta maior variação de fluxo fluvial que justifica o maior conteúdo de macerais do grupo da vitrinite e, portanto, apresenta a maior capacidade de armazenamento.

As condições do ambiente de deposição dos carvões gonduânicos do Brasil foram estudadas no passado, em grande pormenor, no âmbito dos trabalhos levados a efeito pela Escola de Porto Alegre. No decurso da elaboração desta tese foi possível especificar pormenores das condições de depósito por via palinológica, ao mesmo tempo que foi possível refinar as datações das camadas Bonito e Barro Branco nas zonas amostradas (Pereira et al. 2019).

De acordo com os resultados obtidos das amostras analisadas, podemos concluir que o emprego de tecnologias CCS é um dos mais indicados para o armazenamento de dióxido de carbono para efeito de mitigação de emissões dos gases com efeito de estufa em efeito local. Para tanto, as reservas de carvão encontradas no Sul no Brasil, especificamente na Bacia do Paraná, são ideais para armazenamento de dióxido de carbono, pois possuem uma boa capacidade de armazenamento de dióxido de carbono.

CAPÍTULO 9 - TRABALHOS FUTUROS

Como conclusão deste trabalho, foram apresentados resultados sobre o potencial de armazenamento de dióxido de carbono em camadas de carvão localizadas na Bacia do Paraná. No entanto, para que este potencial seja alvo de pesquisas e até, numa perspectiva futura, seja adotado como opção para mitigação de emissão de CO₂ na atmosfera, alguns estudos precisam ser realizados. A seguir são apresentados estudos pertinentes para a possível adoção das tecnologias CCS no Brasil.

Para um estudo mais profundo das tecnologias CCS no país em relação ao armazenamento em camadas de carvão, como foi o objetivo deste trabalho, seria necessário elaborar um banco de dados com todas as informações e parâmetros sobre os estudos já realizados do carvão brasileiro. Dessa forma, tendo a intenção de sequestrar o CO₂, também será necessário estudar e comparar, tanto em termos tecnológicos quanto em termos de viabilidade econômica, as técnicas de recuperação avançada de metano e a de sequestração pura do dióxido de carbono.

No que concerne o tipo de armazenamento geológico, é sugerido estudos comparativos entre camadas de folhelhos negros e carvões, uma vez que ambos são tipos de armazenamentos não convencionais. A este respeito há, ainda, a mencionar a necessidade de promover o estudo pormenorizado da matéria mineral dos carvões brasileiros.

Em relação à legislação específica necessária para o uso das Tecnologias CCS, tanto o bloco da União Europeia como a união federativa dos Estados Unidos, possuem legislação para a sequestração e armazenamento de CO₂ em relação às tecnologias CCS. Para que o Brasil possa adotá-las como alternativa para a mitigação das emissões de dióxido de carbono, acredita-se que o Brasil deverá, primeiro, elaborar uma legislação que regule a aplicação destas tecnologias em território nacional, podendo basear sua proposta de regulamentação nestas iniciativas anteriormente mencionadas.

REFERÊNCIAS

- ABCM, 2017. Associação Brasileira de Carvão Mineral. Anuário Estatístico 2017.
- Aboarrage, A. M. & Lopes, R. D. C., 1986. Projeto A Borda Leste da Bacia do Paraná: integração geológica e avaliação econômica. Departamento Nacional da Produção Mineral; Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, Porto Alegre.
- Ade, M. V. B., 2000. Caracterização da matéria orgânica dispersa através da técnica de pirólise "Rock-Eval II" - Vantagens e Limitações para a Geologia. *Pesquisas em Geociências*, 27, 1: 43-50.
- Almeida, J.R.L., Rocha H.V., Costa, H.K.M., dos Santos, E.M., Rodrigues, C.F.A., Lemos de Sousa, M.J. 2017. Analysis of civil liability regarding CCS: The Brazilian case. *Modern Environmental Science and Engineering*, 3, 6: 382-385.
- Alpern, B., Nahuys, J. & Martinez, L., 1984. Mineral matter in ashy and non-washable coals – Its influence on chemical properties. In: M.J. Lemos de Sousa, Ed., *Symposium on Gondwana Coals, Proceedings and Papers*, Lisbon, 1983. *Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal*, 70, 2: 299-317.
- ANEEL, 2014. Atlas de Energia Elétrica do Brasil; Parte III – Fontes Não Renováveis. Agência Nacional de Energia Elétrica, Brasília.
- ANEEL, 2019. Banco de Informações de Geração-BIG. Agência Nacional de Energia Elétrica, Brasília.
- ASTM Designation: D388-05, 2015. Standard Classification of Coals by Rank.
- ASTM Designation: D4239-14, 2016. Standard Test Method for Sulfur in the Analysis Sample of Coal and Coke Using High-Temperature Tube Furnace Combustion.
- ASTM Designation: D5016, 2008. Standard Test Method for Total Sulfur in Coal and Coke Combustion Residues Using a High-Temperature Tube Furnace Combustion Method with Infrared Absorption.
- ASTM Designation: D5865, 2013. Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke.

- Bachu, S., 2000. Sequestration of CO₂ in Geological Media: Criteria and Approach for Site Selection in Response to Climate Change. *Energy Conversion and Management*, 41, 9: 953-970.
- Bachu, S. 2007. Carbon dioxide storage capacity in uneconomic coal beds in Alberta, Canada: Methodology, potential and site identification. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 1(3), 374–385.
- Bachu, S., Hawkes, C., Pooladi-Darvish, M., & Perkins, E. 2009. CCS Characterisation Criteria. IEA Greenhouse Gas R&D Programme (IEA GHG), 2009/10, July 2009.
- Barros, N., Oliveira, G.M. & Lemos de Sousa, M.J., 2012. Environmental Impact Assessment of Carbon Capture and Sequestration: General overview. IAIA12 Conference Proceedings: Energy Future, The Role of Impact Assessment. 32nd Annual Meeting of the International Association for Impact Assessment, 27 May-1 June 2012, Porto – Portugal. (Extended Abstract, 6 pp. e Póster).
- Bortoluzzi, C. A., Piccoli, A. E. M., Bossi, G. E., Sommer, M. G., Marques-Toigo, M. M., Pons, M. E., Wolf, M. & Corrêa da Silva, Z. C., 1978. Pesquisas Geológicas na Bacia Carbonífera de Santa Catarina (Considerações sobre a Estratigrafia, Sedimentologia, Paleontologia e Petrologia dos Carvões). *Pesquisas em Geociências*, 11, 11: 33-192.
- BP – British Petroleum, 2017. *Statistical Review of World Energy*, 66th edition.
- BP – British Petroleum, 2018. *Statistical Review of World Energy*, 67th edition.
- Branco, P. M., 2014. Carvão Mineral. CPRM – Serviço Geológico do Brasil. BRASIL. Lei nº 12.187, de 29 de Dezembro de 2009. Institui a Política Nacional sobre a Mudança do Clima. Diário Oficial da União: Seção 1, Brasília, DF, p.109, 29 dez. 2009. PL18/2007.
- Brulle, J. R., 2018. The Climate Lobby: A Sectoral Analysis of Lobbying Spending on Climate Change in the USA, 2000 to 2016. *Climate Change*, 149, 3-4: 289-303.
- Busch, A. & Gensterblum, Y., 2011. CBM and CO₂-ECBM Related Sorption Processes in Coal: A review. *International Journal of Coal Geology*, 87, 2: 49-71.
- Câmara, G. B., Andrade, J. C. & Rocha, P. V., 2011. Tecnologia de Armazenamento Geológico de Dióxido de Carbono: panorama mundial e situação brasileira. *Sistemas & Gestão*, 6, 3: 238-253.
- CECMEE, 2013. Comissão Especial do Carvão Mineral e Energia Eólica. Relatório Final. Assembleia Legislativa do Estado do Rio Grande do Sul.
- CEPAC, 2019. Portal do CEPAC. Centro de Excelência em Pesquisa e Inovação em Petróleo, Recursos Minerais e Armazenamento de Carbono.

CGEE, 2012. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos Roadmap tecnológico para produção, uso limpo e eficiente do carvão mineral nacional: 2012 a 2035. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos.

Clark, G. & Jacks, D. S., 2007. Coal and the Industrial Revolution, 1700-1869. *European Review of Economic History*, 11, 1: 39-72.

Corrêa da Silva, Z. C., 1989. The Rank Evaluation of South Brazilian Gondwana Coals on the Basis of Different Chemical and Physical Parameters. In: P.C. Lyons & B. Alpern, Eds, *Coal: Classification, Coalification, Mineralogy, Trace-element Chemistry, and Oil and Gas Potential*. *International Journal of Coal Geology*, 13, 1-4: 21-39.

Corrêa da Silva, Z.C., Costa, L.F., Flores, D., Garcia, C., Juan, R., Lemos de Sousa, M.J., Marques, M., Pinheiro, H.J., Rodrigues, C., Ruiz, M.C. & Silva, M.B., 1999. Candiota and Leão Coals: Classification in Different Systems. In: *Seminar on the Implementation of the United Nations Framework Classification for Reserves/Resources in Latin America*, Porto Alegre, Brazil, 24 November 1999 and *Workshop on Coal and Environment*, Porto Alegre, Brazil, 25 November 1999.

Corrêa da Silva, Z. C., 1991. The Formation of Coal Deposits in South Brazil. *Gondwana*, 7: 233-252.

Corrêa da Silva, Z. & Marques-Toigo, M., 1985. Considerações Petroológicas e Palinológicas sobre a Camada Candiota, Jazida Carbonífera de Candiota, Rio Grande do Sul. In: *Atas, 2º Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia*, 1985, Florianópolis, p. 432-447.

Corrêa da Silva, Z. C. & Wolf, M., 1978. Estudo Petrográfico Preliminar das Camadas de Carvão de Santa Catarina. In: *Proceedings, XXX Congresso Brasileiro de Geologia 1978, Recife-Brasil*, p. 2828-2840.

Corrêa da Silva, Z. C. & Wolf, M., 1980. O Poder Refletor como Parâmetro para a Determinação do Grau de Carbonificação dos Carvões Gonduânicos do Sul do Brasil. *Pesquisas*, 13: 35-42.

Costa, J. B., Lourenzi, P. D. S., González, M. B., Peralba M.C.R. & Kalkreuth, W., 2014. A Petrological and Organic Geochemical Study of Permian Coal Seams East of Maracajá, South Santa Catarina, Paraná Basin, Brazil. *International Journal of Coal Geology*, 132, p. 51-59.

CSFL, 2011. Carbon Sequestration Leadership Forum, CSS Focus: Carbon Capture and Storage. What is Carbon Utilization?

Dardenne, M. A. & Schobbenhaus, C., 2001. *Metalogênese do Brasil*, p.78-83. UNB, CPRM. Brasília.

Della Fávera, J.C., Chaves, H.A.F., Pereira, E., Medeiros, M.A.M. & Câmara Filho, L.M., 1992. *Geologia da Área de Candiota, Bacia do Paraná, Rio Grande do Sul*. Rio de Janeiro: UERJ, Dep. de Geologia/Geofísica, LABCG, 68 pp. (Relatório do 1º Curso de Projetos de Análise de Bacias).

- Della Fávera, J.C., Chaves, H.A.F., Pereira, E., Medeiros, M.A.M. & Câmara Filho, L.M., 1994. Evolução Geológica da Sequência Permiana da Região de Candiota-RS – Brasil. *Acta Geologia Leopoldensia*, 39, 1: 235–246.
- Dinis, M. A. P., 2010. The Study of the Gas Diffusion Process in Coals Using Langmuir Isotherms. Universidade Fernando Pessoa, Porto. (Tese de Doutorado).
- Dinis, M. A. P., Rodrigues, C.F. & Lemos de Sousa, M. J. 2010. Gas Storage versus Gas Circulation in North Atlantic and Gondwana Coal “Types”. *International Journal of Energy for a Clean Environment*, 11, 1-4: 35-40.
- Dinis, M.A.P., Rodrigues, C.F. & Lemos de Sousa, M.J., 2015. Increasing sorption isotherms accuracy: Weibull modelling and linear regression. *Energy Exploration & Exploitation*, 33, 4: 515-532.
- DNPM, 2016. Sumário Mineral (2015). Departamento Nacional de Produção Mineral.
- Dodson, J., Li, X., Sun, N., Atahan, P., Zhou, X., Liu, H., Zhao, K., Hu, S. & Yang, Z., 2014. Use of Coal in the Bronze Age in China. *The Holocene*, 5: 525-530.
- EASAC, 2013. Carbon Capture and Storage in Europe, 2013 (Manuel Lemos de Sousa: Working Group membership and co-author of the book), 86 pp. European Academies Science Advisory Council – EASAC.
- German National Academy of Sciences Leopoldina, Halle (Saale). (EASAC policy report 20, May 2013). ISBN: 978-3-8047-3180-6.
- EIA, 2013. Glossary. Energy Information Administration.
- EIA, 2019. Short-Term Energy Outlook (STEO). Energy Information Administration.
- ELETROBRAS, 2019a. Candiota.
- ELETROBRAS, 2019b. CGTEE Duplicará o Consumo de Carvão.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética, 2018a. Balanço Energético Nacional. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética, Brasília, MME/EPE.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética, 2018b. Plano Decenal de Expansão de Energia 2027. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética, Brasília, MME/EPE.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética, 2018c. PNE: Plano Nacional de Energia – 2050. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética, Brasília, MME/EPE.
- Espitalié, J., Laporte, J. L., Madec, M., Marquis, F., Leplat, P., Paulet, J. & Boutefeu, A., 1997. Méthode rapide de caractérisation des roches mères, de leur potentiel pétrolier et de leur degré d'évolution. *Revue de L'Institut Français du Pétrole*, 32, 1: 23-43.

- ESRU, 2019. The Capture and Sequestration of Carbon Dioxide. Energy Systems Research Unit.
- European Commission, 2007. Communication from the Commission. Europe 2020 - A European Strategy for Smart, Sustainable and Inclusive Growth. COM (2010) 2020, Final, Brussels.
- European Commission, 2011. Communication from the Commission. Energy Roadmap 2050. COM (2011), Luxembourg.
- European Commission, 2014. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: A Policy Framework for Climate and Energy in the Period from 2020 to 2030. COM (2014), Brussels.
- Fan, S., Gloor, M., Mahlman, J., Pacala, S., Sarmiento, J., Takahashi, T. & Tans, P., 1998. A Large Terrestrial Carbon Sink in North America Implied by Atmospheric and Oceanic Carbon Dioxide Data and Models. *Science*, 282, 5388: 442–446.
- Ferreira, V., 2016. Avaliação de Métodos de Recuperação Melhorada de Petróleo para Campos Marítimos no Brasil: o Caso da Bacia de Campos. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (Coppe) da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Freitas, L. C. & Kaneko, S., 2011. Decomposing the Decoupling of CO₂ Emissions and Economic Growth in Brazil. *Ecological Economics*, 70, 8: 1459-1469.
- Freund, P. & Ormerod, W. G., 1997. Progress towards Storage of Carbon Dioxide. *Energy Conservation and Management*, 38, Supplement: 198–205.
- Global CCS Institute, 2015. Carbon Capture and Storage in the Community of Portuguese Language Countries.
- Global CCS Institute, 2019a. Advantages and Disadvantages of Major CO₂ Capture Technologies.
- Global CCS Institut, 2019b. Facilities Database.
- Gomes, A. P., Cruz, P. R. & Borges, L. P., 2003. Recursos Minerais Energéticos: Carvão e Urânio. In: A. Bizzi, C. Schobbenhaus, R. M. Vidotti & J. H. Gonçalves, Eds, *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil*, p. 577-601. CPRM, Brasília.
- Gomes, A. P., Ferreira, J. A. F., Albuquerque, L. F. D., & Süffert, T., 1998. Carvão fóssil. *Estudos Avançados*, 12, 33: 89-106.
- Hamm, A., 2012. Carvão Mineral: Principal Fonte Energética do País. Associação Brasileira de Carvão Mineral.
- Hasui Y., Carneiro C.D.R., Almeida F.F.M., Bartorelli A., Eds, 2012. *Geologia do Brasil*. 900 pp. Ed. Beca, São Paulo.

Hildenbrand, A., Krooss, B., Busch, A. & Gaschnitz, R., 2006. Evolution of Methane Sorption Capacity of Coal Seams as a Function of Burial History - a Case Study from the Campine Basin, NE Belgium. *International Journal of Coal Geology*, 66, 3: 179-203.

Holz, M., França, A. B., Souza, P. A., Iannuzzi, R. & ROHN, R., 2010. A stratigraphic chart of the Late Carboniferous/Permian succession of the eastern border of the Paraná Basin, Brazil, South America. *Journal of South American Earth Sciences*, 29, 2: 381-399.

Holz, M., Kalkreuth, W. & Rolim, S. B. A., 2010. Extension of the Paraná Basin to offshore Brazil: Implications for coalbed methane evaluation. *Marine and Petroleum Geology*, 27, 5: 1119-1132.

Iannuzzi, R., 2010. The flora of Early Permian Coal Measures from the Paraná Basin in Brazil: a Review. *International Journal of Coal Geology*, 83, 2/3: 229-247.

ICCP 1963. International Committee for Coal Petrology - ICCP, *International Handbook of Coal Petrography*, 2nd Ed. Centre National de la Recherche Scientifique, Academy of Sciences of the USSR, Paris, Moscow.

ICCP 1976. International Committee for Coal and Organic Petrology - ICCP, *International Handbook of Coal Petrography*, 2nd Supplement to the 2nd Ed. Centre National de la Recherche Scientifique, Academy of Sciences of the USSR, Paris, Moscow.

IEA - International Energy Agency, 2010. *World Energy Outlook*.

IEA - International Energy Agency, 2011. *Carbon Capture and Storage - Legal and Regulatory Review*.

IEA - International Energy Agency, 2016. *20 Years of Carbon Capture and Storage: Accelerating Future Deployment*.

IEA – International Energy Agency, 2018a. *Key World Energy Statistics*.

IEA – International Energy Agency, 2018b. *World Energy Outlook*.

IEA – International Energy Agency, 2019. *Statistics*.

IEAGHG – International Energy Agency Greenhouse Gas, 2014. *CCS - Proven and it Works*.

IEEJ – The Institute of Energy Economics, 2016. *Asia/World Energy Outlook*.

Instituto Aço Brasil, 2015. *Empresas Siderúrgicas do Brasil*.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Core Writing Team, R.K. Pachauri & L.A. Meyer, Eds.)*. IPCC, Geneva.

IPR - Instituto do Petróleo e dos Recursos Naturais, 2019. *Portal do IPR*.

ISO 7404-3:1985: Methods for the petrographic analysis of bituminous coal and anthracite - Part 3: Method of determining maceral group composition. International Organization for Standardization.

ISO 11760:2005: Classification of Coals. International Organization for Standardization.

Kalkreuth, W., Holz, M., Casagrande, J., Cruz, R., Oliveira, T., Kern, M., Levandowski, J. & Rolim, S., 2008. O Potencial de Coalbed Methane (CBM) na Jazida da Santa Terezinha – Modelagem 3D e Avaliação do Poço de Exploração CBM001-ST-RS. *Revista Brasileira de Geociências*, 38, 2: 3-17.

Kalkreuth, W., Holz, M., Mexias, A., Balbinot, M., Levandowski, J., Willett, J., Finkelman, R. & Burger, H., 2010. Depositional Setting, Petrology and Chemistry of Permian Coals from the Paraná Basin: 2. South Santa Catarina Coalfield, Brazil. In: J. Graciano Mendonça Filho, M. Bagatin Silva & E. Osorio, Eds, Joint 61st ICCP/26th TSOP Meeting: Advances in Organic Petrology and Organic Geochemistry. *International Journal of Coal Geology*, 84, 3: 213-236.

Ketzer, J. M. M., Machado, C. X., Rockett, G. C. & Iglesias, R. S. (Orgs), 2015. *Brazilian Atlas of CO₂ Capture and Geological Storage*, 66 pp. ediPUCRS, Porto Alegre.

Koornneef, J., Ramírez, A., Turkenburg, W. & Faaij, A., 2012. The Environmental Impact and Risk Assessment of CO₂ Capture, Transport and Storage - An Evaluation of the Knowledge Base. *Progress in Energy and Combustion Science*, 38, 1: 62-86.

Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009. Política Nacional de Mudança Climática, em 30 de novembro de 2009. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*. Brasília, DF, 29 dez. 2009. Seção 1 - Edição Extra, p. 109.

Leung, D. Y. C., Caramanna, G. & Maroto-Valer, M. M., 2014. An Overview of Current Status of Carbon Dioxide Capture and Storage Technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39: 426-443.

Lemos de Sousa, M. J., Oliveira, G., Rodrigues, C., Dinis, A., Tato Diogo, M. & Barros N., Eds, 2009. Workshop on “Energy, Greenhouse Gases and Environment”. Porto, 6-8 Outubro 2008. Proceedings, Presentations and Posters. Universidade Fernando Pessoa, Porto. CD-ROM. ISBN: 978-989-643-029-0.

Lemos de Sousa, M.J. & Pinheiro H.J., 1999. O que é um Carvão Gonduanico? *Geólogos*, 5: 95–101.

Lemos de Sousa, M. J., Rodrigues, C. F. & Dinis, M.A.P., Eds, 2012. *O Carvão na Actualidade, Vol.1, Petrologia, Métodos analíticos, Classificação e Avaliação de Recursos e Reservas, Papel no contexto energético, Carvão em Portugal*, 467 pp. Universidade Fernando Pessoa, Academia das Ciências de Lisboa, Porto, Lisboa. ISBN 978-989-643-103-7.

Le Quéré, C., Jain, A. K., Raupach, M. R., Schwinger, J., Sitch, S., Stocker, B. D., Viovy, N., Zaehle, S., Huntingford, C., Friedlingstein, P., Andres, R. J., Boden, T., Jourdain, C., Conway, T., Houghton, R. A., House, J. I., Marland, G., Peters, G. P., Van Der Werf, G., Ahlström, A., Andrew, R. M., Bopp, L., Canadell,

- J. G., Kato, E., Ciais, P., Doney, S. C., Enright, C., Zeng, N., Keeling, R. F., Klein, Goldewijk, K., Levis, S., Levy, P., Lomas, M. & Poulter, B., 2012. The Global Carbon Budget 1959–2011. *Earth System Science Data Discussions*, 5, 1: 1107-1157.
- Li, Q., Fei, W., Liu, X., Wei, X., Jing, M. & Li, X., 2014. Challenging Combination of CO₂ Geological Storage and Coal Mining in the Ordos Basin, China. *Greenhouse Gases Science and Technology*, 4, 4: 452-467.
- Lino, U.R.A., 2005. Case History of Breaking a Paradigm: Improvement of an Immiscible Gas Injection Project in Buracica Field by Water Injection at the Gas/Oil Contact. In: *SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference*, Rio de Janeiro, 8 pp. (SPE-94978-MS).
- Lorenzo, H. C., 2002. O Setor Elétrico Brasileiro: Passado e Futuro. *Perspectivas*, 24-25: 147-170.
- Maack, R., 1947. Breves notícias sobre a geologia dos estados do Paraná e Santa Catarina. *Arquivos de Biologia e Tecnologia*. Curitiba, 2, 63-154.
- Machado, C. X., Rockett, G. C. & Ketzer, J. M. M., 2013. Brazilian Renewable Carbon Capture and Geological Storage Map: Possibilities for the Paraná Basin. *Energy Procedia*, 37: 6105-6111.
- Marques-Toigo, M. & Corrêa da Silva, Z. C., 1984. On the Origin of Gondwanic South Brazilian Coal Measures. In: M.J. Lemos de Sousa, Ed., *Symposium on Gondwana Coals*, Lisbon, 1983. *Proceedings and Papers. Comunicações Serviços Geológicos de Portugal*, 70, 2: 151-160.
- Mccoy, S., 2014. Carbon capture and storage: legal and regulatory review. International Energy Agency.
- Medeiros, R. A. & Thomaz Filho, A., 1973. Fácies e Ambientes Depositionais da Formação Rio Bonito. In: *Anais do Congresso Nacional de Geologia*, Aracajú, 1973, Vol.3, p.3-12.
- Metz, B., Davidson, O., Coninck, H., Loos, M. & Meyer, L., Eds., 2005. *Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*, 443 pp. United States of America, Cambridge University Press, Cambridge, New York, NY.
- Milani, E. J., 1997. Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica Fanerozóica do Gondwana Sul-Occidental. *Curso de Pós-Graduação em Geociências*, 2 vols, 255 pp.
- Milani, E. J. 2004. Comentários sobre a origem e evolução tectônica da Bacia do Paraná. In: V. Mantesso Neto, A, Bartorelli, C.D.R. Carneiro & B.B. Brito Neves, Orgs, *Geologia do continente sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*, p. 265-279. São Paulo, Beca.
- Milani, E. J., Rangel, H. D., Bueno, G. V., Stica, J. M., Winter, W. R., Caixeta, J. M. & Neto, O. P., 2007. *Bacias Sedimentares Brasileiras: Cartas Estratigráficas*. Anexo ao *Boletim de Geociências da Petrobrás*, 15, 1: 183-205.

- MIT - Massachusetts Institute of Technology, 2011. *The Future of Natural Gas, An Interdisciplinary Study*.
- Nahuys, J. & Piatnicki, S., 1984. Carvões Brasileiros – Estado da Arte. In: M.J. Lemos de Sousa, Ed., *Symposium on Gondwana Coals*, Lisbon, 1983. *Proceedings and Papers. Comunicações Serviços Geológicos de Portugal*, 70, 2: 175-204.
- Neto, P. T., 2010. *Ecopolítica das Mudanças Climáticas - O IPCC e o Ecologismo dos Pobres*. 84 pp. Centro Edelstein de Pesquisas Sociais. Rio de Janeiro.
- NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration, 2019. *Temperature Change and Carbon Dioxide Change*. National Centers for Environmental Information.
- Oliveira, G. M. T. S., 2016. *Roteiro Tecnológico (Roadmap) da Captação, Utilização e Armazenamento de Dióxido de Carbono (CCUS) em Portugal*, Universidade Fernando Pessoa, Porto. (Tese de Doutorado).
- Pereira, Z., Mendes, M., Souza, P.A., Rodrigues, C., Fernandes, P., Ade, M., Araújo, C., Almeida, J.R.L., Santos, E.M., Rocha, H.V., Santos, V.E.S., Araújo, B.P., Garavaglia, L., Lemos de Sousa, M. J., 2019.
- Palynology of Bonito and Barro Branco coal seams from Rio Bonito Formation (Lower Permian of Paraná Basin) in the Criciúma coal region, southernmost Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 91: 27-35.
- PETROBRAS, 2016. *Vamos Operar o Quarto Sistema de Separação e Reinjeção de Dióxido de carbono no Préal*. Fatos e Dados.
- Pires, J. C. M., Martins, F. G., Alvim-Ferraz, M. C. M. & Simões, M., 2011. M. Recent Developments on Carbon Capture and Storage: An Overview. *Chemical Engineering Research and Design*, 59: 1446–1460.
- Projeto de Lei nº 1.876, de 2011 das Câmaras dos Deputados: Comissão especial destinada a proferir parecer ao projeto de lei nº 1876, de 1999, do Sr. Sérgio Carvalho, que "dispõe sobre Áreas de Preservação Permanente, Reserva Legal, Exploração Florestal e dá outras providências" (revoga a lei n. 4.771, de 1965 – Código Florestal; altera a lei nº 9.605, de 1998). (Código Florestal Brasileiro).
- RCGI - Research Centre for Gas Innovation, 2019. Portal do RCGI.
- Rego, E. E., 2012. *Proposta de Aperfeiçoamento da Metodologia dos Leilões de Comercialização de Energia Elétrica no Ambiente Regulado: Aspectos Conceituais, Metodológicos e Suas Aplicações*. Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil. (Tese de Doutorado).
- Renner, R. M., 2004. *Sequestro de Carbono e a Viabilização de Novos Reflorestamentos no Brasil*. Universidade Federal do Paraná, Brasil. (Dissertação de Mestrado).

Rhein, M., Rintoul, S.R., Aoki, E. Campos, E., Chambers, D., Feely, R.A., Gulev, S. Johnson, G.C., Josey, S.A., Kostianoy, A., Mauritzen C., Roemmich, D., Talley, L.D. & Wang, F., 2013: Observations: Ocean. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex & P.M. Midgley, Eds.]. Cambridge University Press, Cambridge, New York, NY.

Riding, J.B. & Warny, S., 2008. Palynological Techniques. American Association of Stratigraphic Palynologists Foundation, Dallas.

Rivkin, R. B. & Legendre, L., 2001. Biogenic Carbon Cycling in the Upper Ocean: Effects of Microbial Respiration. *Science*, 291, 5512: 2398-2400.

Rodrigues, C. F., 2002. The Application of Isotherm Studies to Evaluate the Coalfield Methane Potential of the Waterberg Basin, South Africa. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Porto (Tese de Doutoramento).

Rodrigues, C. F., 2018. Relatório Energia em Angola 2017. Universidade Católica de Angola. Centro de Estudos e Investigação Científica.

Rodrigues, C.F., Dinis, M.A.P. & Lemos de Sousa, M.J., 2008. Gas Content Derivative Data *versus* Diffusion Coefficient. In: I. Suárez-Ruiz, Editor, International Conference on Coal and Organic Petrology, ICCP-TSOP Joint Meeting, Oviedo, 21-27 September 2008, Program Abstract, p.70. (Oral Presentation 27).

Rodrigues, C. F., Dinis, M. A. P. & Lemos de Sousa, M. J., 2015. Review of European Energy Policies Regarding the Recent “Carbon Capture, Utilization and Storage” Technologies Scenario and the Role of Coal Seams. *Environmental Earth Sciences*, 74, 3: 2553–2561.

Rodrigues, C. F., Dinis, M. A. P. & Lemos de Sousa, M. J., 2016. Coal gas adsorption/desorption isotherms versus diffusion process. *International Journal of Global Warming*, 9, 4: 467-485.

Rodrigues, C. F., Laiginhas, C., Fernandes, M., Lemos de Sousa, M. J., Dinis, M. A. P., 2014. The Coal Cleat System: a New Approach to its Study. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6: 208-218.

Rodrigues, C. F. & Lemos de Sousa, M. J., 2002. The Measurement of Coal Porosity with Different Gases. *International Journal of Coal Geology*, 47, 3/4: 245-251.

Rodrigues, C. F. & Lemos de Sousa, M. J., 2008.. Coalbed Methane Recovery *versus* CO₂ Geological Storage in Coals: Focus in Recent Developments and Future Perspectives. In: 2nd Petrobras International Seminar on CO₂ Capture and Geological Storage, Salvador, Brasil, 9-12/Setembro/2008.

Rodrigues, C.F. & Lemos de Sousa, M. J., 2018 Treze Anos de Ciências da Terra na Universidade Fernando Pessoa 2006 – 2018. Porto.

Rodrigues, C. F. & Lemos de Sousa, M. J., 2019. Últimos Avanços das Tecnologias CCS e da Legislação na Europa. Oral Presentation (20/05/2015). Universidade de São Paulo.

Santarosa, C. S., 2012. Potencial da Jazida de Charqueadas para o Armazenamento Geológico de CO₂ e Produção de Gás Natural Utilizando Parâmetros Petrofísicos e Testes de Sorção. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil. (Tese de Doutorado).

Santos, E. M. & Monteiro, E. M., 2010. Uso Político do Setor Elétrico Brasileiro - Uma Metodologia de Análise Baseada na Teoria de Grupos de Pressão. Synergia Editora. Rio de Janeiro.

Santos, R. V., Souza, P. A., Alvarenga, C. J. S., Dantas, E. L., Pimentel, M. M., Oliveira, C. G. & Araújo, L. M., 2006. Shrimp U–Pb zircon dating and palynology of bentonitic layers from the Permian Irati Formation, Paraná Basin, Brazil. *Gondwana Research*, 9, 4: 456-463.

Santos, V. E. S., 2017. Gás natural e Carvão na Geração Termelétrica: Reflexões sobre a Competição/Complementação das Fontes na Região Sul do Brasil. Universidade de São Paulo, São Paulo. (Dissertação de Mestrado).

Santos Lourenzi, P. & Kalkreuth, W., 2014. O Potencial de Geração CBM (Coalbed Methane) na Jazida Sul Catarinense: Características Petrográficas e Químicas das Camadas de Carvão da Formação Rio Bonito, Permiano da Bacia do Paraná. *Brazilian Journal of Geology*, 44, 3: 471-491.

SATC - Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina, 2014 - Carvão, Reservas, Mercado e Produção. In: Curso Carvão Mineral, promovido pela SATC em Criciúma/SC em parceria com ABCM - Associação Brasileira do Carvão Mineral.

Schneider, R., Mühlmann, H., Tommasi, E., Medeiros, R. D., Daemon, R. F. & Nogueira, A. A., 1974. Revisão Estratigráfica da Bacia do Paraná. In: *Anais do 28º Congresso Brasileiro de Geologia; 1974*, Vol.1, p.41-65. Sociedade Brasileira de Geologia, Porto Alegre.

SEEG – Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases Efeito Estufa, 2018 - Emissões de GEE no Brasil e suas implicações para políticas públicas e a contribuição brasileira para o Acordo de Paris.

Sieferle, R. P., 2001. *The Subterranean Forest: Energy Systems and the Industrial Revolution*. Cambridge, The White Horse Press. (Traduzido do alemão por Michael P. Osman).

Silva, D. R. A. D., Mizusaki, A. M. P., Anjos, S. M. C. D. & Conceição, R. V., 2006. O método radiométrico RB-Sr aplicado em rochas sedimentares o exemplo da bacia do Paraná, Brasil. *Pesquisas em Geociências*, 33, 1: 83-100.

- Soares, J. L., Oberziner, A.L.B., Humberto, J.J., Rodrigues, A.E., Moreira, R.F.P.M.M., 2007. Carbon Dioxide Adsorption in Brazilian Coals. *Energy & Fuels*, 21: 209-215.
- Sokolov, D., 2016. The Future Role of Gas - GECF Global Gas Outlook 2040 Insights. In: *Proceedings of the 3rd IEA-IEF-OPEC Symposium Gas and Coal Market Outlooks*. Doha, Qatar.
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Alley, R.B., Berntsen, N.L., Bindoff, Z., Chen, A., Chidthaisong, J.M., Gregory, G.C., Hegerl, M., Heimann, B., Hewitson, B.J., Hoskins, F., Joos, J., Jouzel, J., Kattsov, V., Lohmann, U., Matsuno, M., Molina, N., Nicholls, J., Overpeck, G., Raga, G., Ramaswamy, V., Ren, J., Rusticucci, M., Somerville, T.F., Stocker, P., Whetton, P., Wood, R.A. & D. Wratt, D., 2007. Technical Summary. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Souza, P.A., 2006. Late Carboniferous palynostratigraphy of the Itararé Subgroup, northeastern Paraná Basin, Brazil. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 138, 1: 9–29.
- Souza, P.A. & Marques-Toigo, M., 2003. An overview in the palynostratigraphy of the upper paleozoic strata of the Brazilian Paraná Basin. *Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales*, 5: 205-214.
- Souza, P.A. & Marques-Toigo, M., 2005. Progress on the palynostratigraphy of the Paraná strata in Rio Grande do sul state, Paraná Basin, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 77: 353–365.
- Sun, L., Dou, H., Li, Z., Hu, Y. & Hao, X., 2017. Assessment of CO₂ Storage Potential and Carbon Capture, Utilization and Storage Prospect in China. *Journal of the Energy Institute*, 9, 6: 970-977.
- Tang, Y., Yang, R. & Bian, X., 2014. A Review of CO₂ Sequestration Projects and Application in China. *Scientific World Journal*, 2014: 1-11.
- Thomaz Filho, A., Mizusaki, A. M. P. & Antonioli, L., 2008. Magmatismo nas Bacias Sedimentares Brasileiras e sua Influência na Geologia do Petróleo. *Revista Brasileira de Geociências*, 38, 2: 128-137.
- Thompson, R. J., 2005. *Surface Strip Coal Mining Handbook*. SACMA – South African Colliery Managers Association.
- Tolmasquim, M. T., Coord., 2016. *Energia Termelétrica: Gás Natural, Biomassa, Carvão, Nuclear*, 417 pp. EPE - Empresa de Pesquisa Eletrica, Rio de Janeiro.
- UNFCCC - UN – UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE, 2010. Views related to carbon dioxide capture and storage in geological formations as a possible mitigation technology. Submission from Parties (Brazilian Submission on the possible inclusion of Carbon Dioxide Capture and Storage in Geological Formation (CCS) in the Clean Development Mechanism), Bonn.
- UNFPA – United Nations Populations Fund. 2019. *World Population Dashboard*.
- United Nations, 2015. *Paris Agreement*.

- Van der Meer, L.G.H. 1993. The conditions limiting CO₂ storage in aquifers. *Energy Convers.* 34, 9-11: 959-966 pp.
- Vieira, I. S., 2009. Expansão do Sistema de Transmissão de Energia Elétrica do Brasil. Universidade de Brasília, Brasília. (Dissertação de Mestrado).
- Wamsted, D., Feaster, S. & Schlissel, D., 2019. Coal Outlook 2019 – Domestic Market Decline Continues. IEEFA – Institute for Energy Economics and Financial Analysis. March 2019 Report.
- Weniger, P., Kalkreuth, W., Busch, A. & Krooss, B. M., 2010. High-Pressure Methane and Carbon Dioxide Sorption on Coal and Shale Samples from the Paraná Basin, Brazil. In: J. Graciano Mendonça Filho, M. Bagatin Silva & E. Osorio, Eds, Joint 61st ICCP/26th TSOP Meeting: Advances in Organic Petrology and Organic Geochemistry. *International Journal of Coal Geology*, 84, 3-4: 190-205.
- White, I.C. 1908. Relatório final da Comissão de Estudos das Minas de Carvão de Pedra do Brasil, Parte I, p.1-300; Parte II, p. 301-617. DNPM, Rio de Janeiro.
- Wood, G.D., Gabriel, A.M. & Lawson, J.E., 1996. Palynological techniques processing and microscopy. In: J. Jansonius & D.C. McGregor, Eds., *Palynology: Principles and Applications*, Vol. 1, p. 29–50. American Association Stratigraphic Palynology Foundation.
- World Coal Institute, 2005. *The Coal Resource - A Comprehensive Overview of Coal*.
- World Energy Council, 2016. *World Energy Resources*.
- World Energy Council, 2019. *World Energy Insights Brief 2019 - Global Energy Scenarios Comparison Review - Technical Annex*.
- Zalán, P. V., Wolff, S., Astolfi, M. A. M., Vieira, I. S., Conceição, J. C. J., Appi, V. T., Eugenio, V.S., Cerqueira, J.R. & Marques, A., 1990. The Parana Basin, Brazil. Chapter 33. Part II. Selected Analog Interior Cratonic Basins: Analog Basins.
- Zancan, F. L., 2015. Carvão Mineral – A Energia Disponível. In: *Anais do 12º Encontro Nacional de Agentes do Setor Elétrico*, Rio de Janeiro.

ANEXOS

ANEXO 1

Material amostrado tal-qual

Relatórios de Análises Imediatas/Elementares e Poder Calorífico



SATC - Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina
 LAEC - Laboratório de Análises e Ensaio de Carvão
 Rua Pascoal Meller, 73, Universitário, Criciúma/SC - CEP.: 88.805-380
 Fone: 048 3431-7516 Fone/Fax: 048 3431-7515 E-mail: laec@satc.edu.br

RELATÓRIO DE ANÁLISES/ENSAIOS Nº: 5444/2017

Descrição da Amostra:	CR - 01	AMOSTRAGENS	
Tipo da Amostra:	CARVÃO	Método:	X
Cliente:	COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA	Local da Coleta:	X
Endereço do Cliente:	RUA ESTELA	Data:	-
Contratante:	COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA	Representatividade:	X
Data Recebimento:	15/12/2017	Condições Climáticas Observações:	X

Amostra	Análises/Ensaio	Método / Referência	Resultado		Especificações
Cabeça	DETERMINAÇÃO DA UMIDADE TOTAL	PO - 054 - Rev 05	7,33	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DE HIGROSCOPIA	PO - 158 - Rev 02 / ASTM D 7582	1,42	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CINZAS	PO - 158 - Rev 02 / ASTM D 7582	40,93	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE MATÉRIAS VOLÁTEIS	PO - 158 - Rev 02 / ASTM D 7582	23,37	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR	PO - 063 - Rev 13 / ASTM D 5865 - Analisado	4567	Cal/g	Temperatura(C): 27,10
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE ENXOFRE TOTAL	PO - 064 - Rev 08 / ASTM D 4239	4,61	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CARBONO FIXO	PO - 068 - Rev 04 / ASTM D 3172	35,70	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CARBONO	PO - 197 - Rev 00	48,09	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE HIDROGÊNIO	PO - 197 - Rev 00	3,73	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE NITROGÊNIO	PO - 197 - Rev 00	1,05	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE OXIGÊNIO	PO - 347 - Rev 00	1,59	%	-

Considerações: Os Resultados contidos neste relatório tem significado restrito à amostra analisada/ensaiada.

MORGANA LOURENÇO DE SOUZA
 Signatário Autorizado

JEFFERSON MORONA
 Responsável Técnico
 CRQ 13.300701 - 13ª Região

Documento finalizado eletronicamente e assinado por MORGANA LOURENÇO DE SOUZA, na data de 04/01/2018, as 08:04:07.

Documento emitido às: **08:04:08** do dia **04/01/2018** (hora e data de Brasília).

Código de controle do documento: **a11c.b20a.8254.deb0**

Autenticidade poderá ser confirmada na página da instituição SATC na Internet, no endereço www.autentico.satc.edu.br.



SATC - Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina
 LAEC - Laboratório de Análises e Ensaio de Carvão
 Rua Pascoal Meller, 73, Universitário, Criciúma/SC - CEP.: 88.805-380
 Fone: 048 3431-7516 Fone/Fax: 048 3431-7515 E-mail: laec@satc.edu.br

RELATÓRIO DE ANÁLISES/ENSAIOS Nº: 5445/2017

Descrição da Amostra:	CR - 02	AMOSTRAGENS	
Tipo da Amostra:	CARVÃO	Método:	X
Cliente:	COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA	Local da Coleta:	X
Endereço do Cliente:	RUA ESTELA	Data:	-
Contratante:	COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA	Representatividade:	X
Data Recebimento:	15/12/2017	Condições Climáticas Observações:	X

Amostra	Análises/Ensaio	Método / Referência	Resultado		Especificações
Cabeça	DETERMINAÇÃO DA UMIDADE TOTAL	PO - 054 - Rev 05	2,25	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DE HIGROSCOPIA	PO - 158 - Rev 02 / ASTM D 7582	1,10	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CINZAS	PO - 158 - Rev 02 / ASTM D 7582	45,95	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE MATÉRIAS VOLÁTEIS	PO - 158 - Rev 02 / ASTM D 7582	21,73	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR	PO - 063 - Rev 13 / ASTM D 5865 - Analisado	3997	Cal/g	Temperatura(C): 27,00
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE ENXOFRE TOTAL	PO - 064 - Rev 08 / ASTM D 4239	9,57	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CARBONO FIXO	PO - 068 - Rev 04 / ASTM D 3172	32,32	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CARBONO	PO - 197 - Rev 00	43,11	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE HIDROGÊNIO	PO - 197 - Rev 00	3,16	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE NITROGÊNIO	PO - 197 - Rev 00	1,20	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE OXIGÊNIO	PO - 347 - Rev 00	N.D.	%	-

Considerações: Os Resultados contidos neste relatório tem significado restrito à amostra analisada/ensaiada. ND = RESULTADO NÃO DETECTADO

MORGANA LOURENÇO DE SOUZA
 Signatário Autorizado

JEFFERSON MORONA
 Responsável Técnico
 CRQ 13.300701 - 13ª Região

Documento finalizado eletronicamente e assinado por MORGANA LOURENÇO DE SOUZA, na data de 04/01/2018, as 08:07:45.

Documento emitido às: **08:07:46** do dia **04/01/2018** (hora e data de Brasília).

Código de controle do documento: **58fd.82bb.b30a.8d1a**

Autenticidade poderá ser confirmada na página da instituição SATC na Internet, no endereço www.autentico.satc.edu.br.



SATC - Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina
 LAEC - Laboratório de Análises e Ensaio de Carvão
 Rua Pascoal Meller, 73, Universitário, Criciúma/SC - CEP.: 88.805-380
 Fone: 048 3431-7516 Fone/Fax: 048 3431-7515 E-mail: laec@satc.edu.br

RELATÓRIO DE ANÁLISES/ENSAIOS Nº: 5446/2017

Descrição da Amostra:	CR - 03	AMOSTRAGENS	
Tipo da Amostra:	CARVÃO	Método:	X
Cliente:	COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA	Local da Coleta:	X
Endereço do Cliente:	RUA ESTELA	Data:	-
Contratante:	COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA	Representatividade:	X
Data Recebimento:	15/12/2017	Condições Climáticas Observações:	X

Amostra	Análises/Ensaio	Método / Referência	Resultado		Especificações
Cabeça	DETERMINAÇÃO DA UMIDADE TOTAL	PO - 054 - Rev 05	2,36	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DE HIGROSCOPIA	PO - 158 - Rev 02 / ASTM D 7582	0,68	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CINZAS	PO - 158 - Rev 02 / ASTM D 7582	42,39	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE MATÉRIAS VOLÁTEIS	PO - 158 - Rev 02 / ASTM D 7582	21,59	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR	PO - 063 - Rev 13 / ASTM D 5865 - Analisado	4493	Cal/g	Temperatura(C): 26,50
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE ENXOFRE TOTAL	PO - 064 - Rev 08 / ASTM D 4239	5,90	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CARBONO FIXO	PO - 068 - Rev 04 / ASTM D 3172	36,02	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CARBONO	PO - 197 - Rev 00	48,67	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE HIDROGÊNIO	PO - 197 - Rev 00	3,48	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE NITROGÊNIO	PO - 197 - Rev 00	1,19	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE OXIGÊNIO	PO - 347 - Rev 00	N.D.	%	-

Considerações: Os Resultados contidos neste relatório tem significado restrito à amostra analisada/ensaiada. ND = RESULTADO NÃO DETECTADO.

MORGANA LOURENÇO DE SOUZA
 Signatário Autorizado

JEFFERSON MORONA
 Responsável Técnico
 CRQ 13.300701 - 13ª Região

Documento finalizado eletronicamente e assinado por MORGANA LOURENÇO DE SOUZA, na data de 04/01/2018, as 08:18:19.

Documento emitido às: **08:18:20** do dia **04/01/2018** (hora e data de Brasília).

Código de controle do documento: **30a1.370f.c3b7.efd0**

Autenticidade poderá ser confirmada na página da instituição SATC na Internet, no endereço www.autentico.satc.edu.br.



SATC - Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina
 LAEC - Laboratório de Análises e Ensaio de Carvão
 Rua Pascoal Meller, 73, Universitário, Criciúma/SC - CEP.: 88.805-380
 Fone: 048 3431-7516 Fone/Fax: 048 3431-7515 E-mail: laec@satc.edu.br

RELATÓRIO DE ANÁLISES/ENSAIOS Nº: 5447/2017

Descrição da Amostra:	CR - 04	AMOSTRAGENS	
Tipo da Amostra:	CARVÃO	Método:	X
Cliente:	COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA	Local da Coleta:	X
Endereço do Cliente:	RUA ESTELA	Data:	-
Contratante:	COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA	Representatividade:	X
Data Recebimento:	15/12/2017	Condições Climáticas Observações:	X

Amostra	Análises/Ensaio	Método / Referência	Resultado		Especificações
Cabeça	DETERMINAÇÃO DA UMIDADE TOTAL	PO - 054 - Rev 05	3,93	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DE HIGROSCOPIA	PO - 158 - Rev 02 / ASTM D 7582	0,74	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CINZAS	PO - 158 - Rev 02 / ASTM D 7582	31,92	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE MATÉRIAS VOLÁTEIS	PO - 158 - Rev 02 / ASTM D 7582	27,78	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR	PO - 063 - Rev 13 / ASTM D 5865 - Analisado	5075	Cal/g	Temperatura(C): 26,90
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE ENXOFRE TOTAL	PO - 064 - Rev 08 / ASTM D 4239	12,88	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CARBONO FIXO	PO - 068 - Rev 04 / ASTM D 3172	40,30	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CARBONO	PO - 197 - Rev 00	52,69	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE HIDROGÊNIO	PO - 197 - Rev 00	3,89	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE NITROGÊNIO	PO - 197 - Rev 00	1,34	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE OXIGÊNIO	PO - 347 - Rev 00	N.D.	%	-

Considerações: Os Resultados contidos neste relatório tem significado restrito à amostra analisada/ensaiada. ND = NÃO DETECTADO.

MORGANA LOURENÇO DE SOUZA
 Signatário Autorizado

JEFFERSON MORONA
 Responsável Técnico
 CRQ 13.300701 - 13ª Região

Documento finalizado eletronicamente e assinado por MORGANA LOURENÇO DE SOUZA, na data de 04/01/2018, as 08:21:14.

Documento emitido às: **08:21:15** do dia **04/01/2018** (hora e data de Brasília).

Código de controle do documento: **1eb3.33e6.99dd.fd14**

Autenticidade poderá ser confirmada na página da instituição SATC na Internet, no endereço www.autentico.satc.edu.br.



SATC - Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina
 LAEC - Laboratório de Análises e Ensaio de Carvão
 Rua Pascoal Meller, 73, Universitário, Criciúma/SC - CEP.: 88.805-380
 Fone: 048 3431-7516 Fone/Fax: 048 3431-7515 E-mail: laec@satc.edu.br

RELATÓRIO DE ANÁLISES/ENSAIOS Nº: 5448/2017

Descrição da Amostra:	CR - 05	AMOSTRAGENS	
Tipo da Amostra:	CARVÃO	Método:	X
Cliente:	COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA	Local da Coleta:	X
Endereço do Cliente:	RUA ESTELA	Data:	-
Contratante:	COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA	Representatividade:	X
Data Recebimento:	15/12/2017	Condições Climáticas Observações:	X

Amostra	Análises/Ensaio	Método / Referência	Resultado		Especificações
Cabeça	DETERMINAÇÃO DA UMIDADE TOTAL	PO - 054 - Rev 05	2,81	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DE HIGROSCOPIA	PO - 158 - Rev 02 / ASTM D 7582	1,12	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CINZAS	PO - 158 - Rev 02 / ASTM D 7582	54,62	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE MATÉRIAS VOLÁTEIS	PO - 158 - Rev 02 / ASTM D 7582	17,05	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR	PO - 063 - Rev 13 / ASTM D 5865 - Analisado	3459	Cal/g	Temperatura(C): 27,10
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE ENXOFRE TOTAL	PO - 064 - Rev 08 / ASTM D 4239	4,08	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CARBONO FIXO	PO - 068 - Rev 04 / ASTM D 3172	28,33	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CARBONO	PO - 197 - Rev 00	38,03	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE HIDROGÊNIO	PO - 197 - Rev 00	2,84	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE NITROGÊNIO	PO - 197 - Rev 00	0,84	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE OXIGÊNIO	PO - 347 - Rev 00	N.D.	%	-

Considerações: Os Resultados contidos neste relatório tem significado restrito à amostra analisada/ensaiada.

MORGANA LOURENÇO DE SOUZA
 Signatário Autorizado

JEFFERSON MORONA
 Responsável Técnico
 CRQ 13.300701 - 13ª Região

Documento finalizado eletronicamente e assinado por MORGANA LOURENÇO DE SOUZA, na data de 04/01/2018, as 08:33:48.

Documento emitido às: **08:33:49** do dia **04/01/2018** (hora e data de Brasília).

Código de controle do documento: **6eec.7172.e8c1.69af**

Autenticidade poderá ser confirmada na página da instituição SATC na Internet, no endereço www.autentico.satc.edu.br.



SATC - Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina
 LAEC - Laboratório de Análises e Ensaio de Carvão
 Rua Pascoal Meller, 73, Universitário, Criciúma/SC - CEP.: 88.805-380
 Fone: 048 3431-7516 Fone/Fax: 048 3431-7515 E-mail: laec@satc.edu.br

RELATÓRIO DE ANÁLISES/ENSAIOS Nº: 5449/2017

Descrição da Amostra:	CR - 06	AMOSTRAGENS	
Tipo da Amostra:	CARVÃO	Método:	X
Cliente:	COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA	Local da Coleta:	X
Endereço do Cliente:	RUA ESTELA	Data:	-
Contratante:	COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA	Representatividade:	X
Data Recebimento:	15/12/2017	Condições Climáticas Observações:	X

Amostra	Análises/Ensaio	Método / Referência	Resultado		Especificações
Cabeça	DETERMINAÇÃO DA UMIDADE TOTAL	PO - 054 - Rev 05	5,63	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DE HIGROSCOPIA	PO - 158 - Rev 02 / ASTM D 7582	1,53	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CINZAS	PO - 158 - Rev 02 / ASTM D 7582	22,66	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE MATÉRIAS VOLÁTEIS	PO - 158 - Rev 02 / ASTM D 7582	29,59	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR	PO - 063 - Rev 13 / ASTM D 5865 - Analisado	5964	Cal/g	Temperatura(C): 27,20
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE ENXOFRE TOTAL	PO - 064 - Rev 08 / ASTM D 4239	8,10	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CARBONO FIXO	PO - 068 - Rev 04 / ASTM D 3172	47,75	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CARBONO	PO - 197 - Rev 00	62,90	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE HIDROGÊNIO	PO - 197 - Rev 00	4,56	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE NITROGÊNIO	PO - 197 - Rev 00	1,55	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE OXIGÊNIO	PO - 347 - Rev 00	0,23	%	-

Considerações: Os Resultados contidos neste relatório tem significado restrito à amostra analisada/ensaiada.

MORGANA LOURENÇO DE SOUZA
 Signatário Autorizado

JEFFERSON MORONA
 Responsável Técnico
 CRQ 13.300701 - 13ª Região

Documento finalizado eletronicamente e assinado por MORGANA LOURENÇO DE SOUZA, na data de 04/01/2018, as 08:24:01.

Documento emitido às: **08:24:02** do dia **04/01/2018** (hora e data de Brasília).

Código de controle do documento: **8496.7a91.d2f0.375a**

Autenticidade poderá ser confirmada na página da instituição SATC na Internet, no endereço www.autentico.satc.edu.br.



SATC - Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina
 LAEC - Laboratório de Análises e Ensaio de Carvão
 Rua Pascoal Meller, 73, Universitário, Criciúma/SC - CEP.: 88.805-380
 Fone: 048 3431-7516 Fone/Fax: 048 3431-7515 E-mail: laec@satc.edu.br

RELATÓRIO DE ANÁLISES/ENSAIOS Nº: 5450/2017

Descrição da Amostra:	CR - 07	AMOSTRAGENS	
Tipo da Amostra:	CARVÃO	Método:	X
Cliente:	COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA	Local da Coleta:	X
Endereço do Cliente:	RUA ESTELA	Data:	-
Contratante:	COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA	Representatividade:	X
Data Recebimento:	15/12/2017	Condições Climáticas Observações:	X

Amostra	Análises/Ensaio	Método / Referência	Resultado		Especificações
Cabeça	DETERMINAÇÃO DA UMIDADE TOTAL	PO - 054 - Rev 05	2,88	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DE HIGROSCOPIA	PO - 158 - Rev 02 / ASTM D 7582	1,05	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CINZAS	PO - 158 - Rev 02 / ASTM D 7582	50,83	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE MATÉRIAS VOLÁTEIS	PO - 158 - Rev 02 / ASTM D 7582	17,43	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR	PO - 063 - Rev 13 / ASTM D 5865 - Analisado	3899	Cal/g	Temperatura(C): 27,30
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE ENXOFRE TOTAL	PO - 064 - Rev 08 / ASTM D 4239	3,62	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CARBONO FIXO	PO - 068 - Rev 04 / ASTM D 3172	31,74	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CARBONO	PO - 197 - Rev 00	42,90	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE HIDROGÊNIO	PO - 197 - Rev 00	3,07	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE NITROGÊNIO	PO - 197 - Rev 00	0,92	%	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE OXIGÊNIO	PO - 347 - Rev 00	N.D.	%	-

Considerações: Os Resultados contidos neste relatório tem significado restrito à amostra analisada/ensaiada. ND = RESULTADO NÃO DETECTADO.

MORGANA LOURENÇO DE SOUZA
 Signatário Autorizado

JEFFERSON MORONA
 Responsável Técnico
 CRQ 13.300701 - 13ª Região

Documento finalizado eletronicamente e assinado por MORGANA LOURENÇO DE SOUZA, na data de 04/01/2018, as 08:26:25.

Documento emitido às: **08:26:26** do dia **04/01/2018** (hora e data de Brasília).

Código de controle do documento: **8215.394d.5320.b4fb**

Autenticidade poderá ser confirmada na página da instituição SATC na Internet, no endereço www.autentico.satc.edu.br.

ANEXO 2

Material amostrado lavado na fração <1,35

Relatórios de Análises Imediatas/Elementares e Poder Calorífico



SATC - Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina
 LAEC - Laboratório de Análises e Ensaio de Carvão
 Rua Pascoal Meller, 73, Universitário, Criciúma/SC - CEP.: 88.805-380
 Fone: 048 3431-7516 Fone/Fax: 048 3431-7515 E-mail: laec@satc.edu.br

RELATÓRIO DE ANÁLISES/ENSAIOS Nº: 0031/2019

Descrição da Amostra:	CR-01	AMOSTRAGENS	
Tipo da Amostra:	CARVÃO	Método:	X
Cliente:	COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA	Local da Coleta:	X
Endereço do Cliente:	RUA ESTELA	Data:	-
Contato:	JOSÉ RICARDO LEMES DE ALMEIDA	Representatividade:	X
Contratante:	COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA	Condições Climáticas Observações:	X
Data Recebimento:	04/01/2019		

ENSAIO DENSIMÉTRICO - ED
 PO - 055 Rev: 6

DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DE HIGROSCOPIA - UH
 PO - 059 Rev: 10 / ASTM D 3173

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CINZAS - CZ
 PO - 060 Rev: 12 / ASTM D 3174

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE MATÉRIAS VOLÁTEIS - MV
 PO - 061 Rev: 9 / ASTM D 3175

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE ENXOFRE TOTAL - ST
 PO - 064 Rev: 12 / ASTM D 4239

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CARBONO - CA
 PO - 197 Rev: 2

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE HIDROGÊNIO - HI
 PO - 197 Rev: 2

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE NITROGÊNIO - NI
 PO - 197 Rev: 2

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE OXIGÊNIO - O2
 PO - 347 Rev: 0

Documento emitido às: **14:56:17** do dia **09/01/2019** (hora e data de Brasília).

Código de controle do documento: **8e95.818a.24d9.3c7e**

Autenticidade poderá ser confirmada na página da instituição SATC na Internet, no endereço www.autentico.satc.edu.br.



SATC - Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina
 LAEC - Laboratório de Análises e Ensaio de Carvão
 Rua Pascoal Meller, 73, Universitário, Criciúma/SC - CEP.: 88.805-380
 Fone: 048 3431-7516 Fone/Fax: 048 3431-7515 E-mail: laec@satc.edu.br

RELATÓRIO DE ANÁLISES/ENSAIOS Nº: 0031/2019

Descrição da Amostra:	CR-01	AMOSTRAGENS	
Tipo da Amostra:	CARVÃO	Método:	X
Cliente:	COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA	Local da Coleta:	X
Endereço do Cliente:	RUA ESTELA	Data:	-
Contato:	JOSÉ RICARDO LEMES DE ALMEIDA	Representatividade:	X
Contratante:	COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA	Condições Climáticas Observações:	X
Data Recebimento:	04/01/2019		

Análises	Fração	(%)	UH (%)	CZ (%)	MV (%)	ST (%)	CA (%)	HI (%)	NI (%)	O2 (%)
ED	< 1,35	9,65	1,74	9,47	37,44	1,46	76,70	5,30	1,64	5,43
ED	> 1,35	90,35	-	-	-	-	-	-	-	-

Considerações: Os Resultados contidos neste relatório tem significado restrito à amostra analisada/ensaiada. Este documento só poderá ser reproduzido de forma integral e sem alteração do seu conteúdo original. Quando a amostragem não for realizada pelos colaboradores do LABSATC, as informações fornecidas referente a esta atividade são de responsabilidade do cliente/contratante. "Amostragem realizada pelo cliente".

DANIELA COSTA PEREIRA
 Signatário Autorizado

JEFFERSON MORONA
 Responsável Técnico
 CRQ 13.300701 - 13ª Região

Documento finalizado eletronicamente e assinado por DANIELA COSTA PEREIRA, na data de 09/01/2019, as 14:55:21.

Documento emitido às: **14:56:17** do dia **09/01/2019** (hora e data de Brasília).

Código de controle do documento: **8e95.818a.24d9.3c7e**

Autenticidade poderá ser confirmada na página da instituição SATC na Internet, no endereço www.autentico.satc.edu.br.



SATC - Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina
 LAEC - Laboratório de Análises e Ensaios de Carvão
 Rua Pascoal Meller, 73, Universitário, Criciúma/SC - CEP.: 88.805-380
 Fone: 048 3431-7516 Fone/Fax: 048 3431-7515 E-mail: laec@satc.edu.br

RELATÓRIO DE ANÁLISES/ENSAIOS Nº: 1832/2019

Descrição da Amostra:	CR - 1 (<1,35)	AMOSTRAGENS	
Tipo da Amostra:	CARVÃO MINERAL	Método:	X
Cliente:	COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA	Local da Coleta:	X
Endereço do Cliente:	RUA ESTELA	Data:	-
Contato:	JOSÉ RICARDO LEMES DE ALMEIDA	Representatividade:	X
Contratante:	COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA	Condições Climáticas Observações:	X
Data Recebimento:	15/04/2019		

Amostra	Análises/Ensaio	Método / Referência	Resultado		Data da Análise	Especificações
Cabeça	DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DE HIGROSCOPIA	PO - 059 Rev: 10 / ASTM D 3173	1,76	%	16/04/2019	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR	PO - 063 Rev: 15 / ASTM D 5865-13 - Analisado	7489	Cal/g	16/04/2019	Temperatura(C): 23,60

Considerações: Os Resultados contidos neste relatório tem significado restrito à amostra analisada/ensaiada. Este documento só poderá ser reproduzido de forma integral e sem alteração do seu conteúdo original. Quando a amostragem não for realizada pelos colaboradores do LABSATC, as informações fornecidas referente a esta atividade são de responsabilidade do cliente/contratante. "Amostragem realizada pelo cliente".

DANIELA COSTA PEREIRA
 Signatário Autorizado

JEFFERSON MORONA
 Responsável Técnico
 CRQ 13.300701 - 13ª Região

Documento finalizado eletronicamente e assinado por DANIELA COSTA PEREIRA, na data de 17/04/2019, as 11:27:35.

Documento emitido às: **11:29:04** do dia **17/04/2019** (hora e data de Brasília).

Código de controle do documento: **12c6.86a2.394d.cf2a**

Autenticidade poderá ser confirmada na página da instituição SATC na Internet, no endereço www.autentico.satc.edu.br.



SATC - Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina
 LAEC - Laboratório de Análises e Ensaios de Carvão
 Rua Pascoal Meller, 73, Universitário, Criciúma/SC - CEP.: 88.805-380
 Fone: 048 3431-7516 Fone/Fax: 048 3431-7515 E-mail: laec@satc.edu.br

RELATÓRIO DE ANÁLISES/ENSAIOS Nº: 0032/2019

Descrição da Amostra:	CR-02	AMOSTRAGENS	
Tipo da Amostra:	CARVÃO	Método:	X
Cliente:	COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA	Local da Coleta:	X
Endereço do Cliente:	RUA ESTELA	Data:	-
Contato:	JOSÉ RICARDO LEMES DE ALMEIDA	Representatividade:	X
Contratante:	COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA	Condições Climáticas Observações:	X
Data Recebimento:	04/01/2019		

ENSAIO DENSIMÉTRICO - ED
 PO - 055 Rev: 6

DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DE HIGROSCOPIA - UH
 PO - 059 Rev: 10 / ASTM D 3173

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CINZAS - CZ
 PO - 060 Rev: 12 / ASTM D 3174

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE MATÉRIAS VOLÁTEIS - MV
 PO - 061 Rev: 9 / ASTM D 3175

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE ENXOFRE TOTAL - ST
 PO - 064 Rev: 12 / ASTM D 4239

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CARBONO - CA
 PO - 197 Rev: 2

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE HIDROGÊNIO - HI
 PO - 197 Rev: 2

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE NITROGÊNIO - NI
 PO - 197 Rev: 2

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE OXIGÊNIO - O2
 PO - 347 Rev: 0

Documento emitido às: **14:55:49** do dia **09/01/2019** (hora e data de Brasília).

Código de controle do documento: **e647.edcd.aab6.3aad**

Autenticidade poderá ser confirmada na página da instituição SATC na Internet, no endereço www.autentico.satc.edu.br.



SATC - Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina
 LAEC - Laboratório de Análises e Ensaio de Carvão
 Rua Pascoal Meller, 73, Universitário, Criciúma/SC - CEP.: 88.805-380
 Fone: 048 3431-7516 Fone/Fax: 048 3431-7515 E-mail: laec@satc.edu.br

RELATÓRIO DE ANÁLISES/ENSAIOS Nº: 0032/2019

Descrição da Amostra:	CR-02	AMOSTRAGENS	
Tipo da Amostra:	CARVÃO	Método:	X
Cliente:	COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA	Local da Coleta:	X
Endereço do Cliente:	RUA ESTELA	Data:	-
Contato:	JOSÉ RICARDO LEMES DE ALMEIDA	Representatividade:	X
Contratante:	COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA	Condições Climáticas Observações:	X
Data Recebimento:	04/01/2019		

Análises	Fração	(%)	UH (%)	CZ (%)	MV (%)	ST (%)	CA (%)	HI (%)	NI (%)	O2 (%)
ED	< 1,35	3,37	1,80	8,01	35,67	2,00	78,82	5,33	1,65	4,19
ED	> 1,35	96,63	-	-	-	-	-	-	-	-

Considerações: Os Resultados contidos neste relatório tem significado restrito à amostra analisada/ensaiada. Este documento só poderá ser reproduzido de forma integral e sem alteração do seu conteúdo original. Quando a amostragem não for realizada pelos colaboradores do LABSATC, as informações fornecidas referente a esta atividade são de responsabilidade do cliente/contratante. "Amostragem realizada pelo cliente".

DANIELA COSTA PEREIRA
 Signatário Autorizado

JEFFERSON MORONA
 Responsável Técnico
 CRQ 13.300701 - 13ª Região

Documento finalizado eletronicamente e assinado por DANIELA COSTA PEREIRA, na data de 09/01/2019, as 14:54:53.

Documento emitido às: **14:55:49** do dia **09/01/2019** (hora e data de Brasília).

Código de controle do documento: **e647.edcd.aab6.3aad**

Autenticidade poderá ser confirmada na página da instituição SATC na Internet, no endereço www.autentico.satc.edu.br.



SATC - Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina
 LAEC - Laboratório de Análises e Ensaios de Carvão
 Rua Pascoal Meller, 73, Universitário, Criciúma/SC - CEP.: 88.805-380
 Fone: 048 3431-7516 Fone/Fax: 048 3431-7515 E-mail: laec@satc.edu.br

RELATÓRIO DE ANÁLISES/ENSAIOS Nº: 1834/2019

Descrição da Amostra:	CR - 2 (<1,35)	AMOSTRAGENS	
Tipo da Amostra:	CARVÃO MINERAL	Método:	X
Cliente:	COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA	Local da Coleta:	X
Endereço do Cliente:	RUA ESTELA	Data:	-
Contato:	JOSÉ RICARDO LEMES DE ALMEIDA	Representatividade:	X
Contratante:	COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA	Condições Climáticas Observações:	X
Data Recebimento:	15/04/2019		

Amostra	Análises/Ensaios	Método / Referência	Resultado		Data da Análise	Especificações
Cabeça	DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DE HIGROSCOPIA	PO - 059 Rev: 10 / ASTM D 3173	1,96	%	16/04/2019	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR	PO - 063 Rev: 15 / ASTM D 5865-13 - Analisado	7623	Cal/g	17/04/2019	Temperatura(C): 24,10

Considerações: Os Resultados contidos neste relatório tem significado restrito à amostra analisada/ensaiada. Este documento só poderá ser reproduzido de forma integral e sem alteração do seu conteúdo original. Quando a amostragem não for realizada pelos colaboradores do LABSATC, as informações fornecidas referente a esta atividade são de responsabilidade do cliente/contratante. "Amostragem realizada pelo cliente".

DANIELA COSTA PEREIRA
 Signatário Autorizado

JEFFERSON MORONA
 Responsável Técnico
 CRQ 13.300701 - 13ª Região

Documento finalizado eletronicamente e assinado por DANIELA COSTA PEREIRA, na data de 17/04/2019, as 11:28:44.

Documento emitido às: **11:30:12** do dia **17/04/2019** (hora e data de Brasília).

Código de controle do documento: **8893.ac6b.1e94.b868**

Autenticidade poderá ser confirmada na página da instituição SATC na Internet, no endereço www.autentico.satc.edu.br.



SATC - Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina
 LAEC - Laboratório de Análises e Ensaio de Carvão
 Rua Pascoal Meller, 73, Universitário, Criciúma/SC - CEP.: 88.805-380
 Fone: 048 3431-7516 Fone/Fax: 048 3431-7515 E-mail: laec@satc.edu.br

RELATÓRIO DE ANÁLISES/ENSAIOS Nº: 0033/2019

Descrição da Amostra:	CR-03	AMOSTRAGENS	
Tipo da Amostra:	CARVÃO	Método:	X
Cliente:	COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA	Local da Coleta:	X
Endereço do Cliente:	RUA ESTELA	Data:	-
Contato:	JOSÉ RICARDO LEMES DE ALMEIDA	Representatividade:	X
Contratante:	COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA	Condições Climáticas Observações:	X
Data Recebimento:	04/01/2019		

ENSAIO DENSIMÉTRICO - ED
 PO - 055 Rev: 6

DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DE HIGROSCOPIA - UH
 PO - 059 Rev: 10 / ASTM D 3173

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CINZAS - CZ
 PO - 060 Rev: 12 / ASTM D 3174

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE MATÉRIAS VOLÁTEIS - MV
 PO - 061 Rev: 9 / ASTM D 3175

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE ENXOFRE TOTAL - ST
 PO - 064 Rev: 12 / ASTM D 4239

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CARBONO - CA
 PO - 197 Rev: 2

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE HIDROGÊNIO - HI
 PO - 197 Rev: 2

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE NITROGÊNIO - NI
 PO - 197 Rev: 2

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE OXIGÊNIO - O2
 PO - 347 Rev: 0

Documento emitido às: **14:55:22** do dia **09/01/2019** (hora e data de Brasília).

Código de controle do documento: **f6f8.4ae2.f59c.a1f4**

Autenticidade poderá ser confirmada na página da instituição SATC na Internet, no endereço www.autentico.satc.edu.br.



SATC - Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina
 LAEC - Laboratório de Análises e Ensaio de Carvão
 Rua Pascoal Meller, 73, Universitário, Criciúma/SC - CEP.: 88.805-380
 Fone: 048 3431-7516 Fone/Fax: 048 3431-7515 E-mail: laec@satc.edu.br

RELATÓRIO DE ANÁLISES/ENSAIOS Nº: 0033/2019

Descrição da Amostra:	CR-03	AMOSTRAGENS	
Tipo da Amostra:	CARVÃO	Método:	X
Cliente:	COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA	Local da Coleta:	X
Endereço do Cliente:	RUA ESTELA	Data:	-
Contato:	JOSÉ RICARDO LEMES DE ALMEIDA	Representatividade:	X
Contratante:	COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA	Condições Climáticas Observações:	X
Data Recebimento:	04/01/2019		

Análises	Fração	(%)	UH (%)	CZ (%)	MV (%)	ST (%)	CA (%)	HI (%)	NI (%)	O2 (%)
ED	< 1,35	11,59	0,98	7,95	33,45	1,47	81,66	5,36	1,73	1,83
ED	> 1,35	88,41	-	-	-	-	-	-	-	-

Considerações: Os Resultados contidos neste relatório tem significado restrito à amostra analisada/ensaiada. Este documento só poderá ser reproduzido de forma integral e sem alteração do seu conteúdo original. Quando a amostragem não for realizada pelos colaboradores do LABSATC, as informações fornecidas referente a esta atividade são de responsabilidade do cliente/contratante. "Amostragem realizada pelo cliente".

DANIELA COSTA PEREIRA
 Signatário Autorizado

JEFFERSON MORONA
 Responsável Técnico
 CRQ 13.300701 - 13ª Região

Documento finalizado eletronicamente e assinado por DANIELA COSTA PEREIRA, na data de 09/01/2019, as 14:54:26.

Documento emitido às: **14:55:22** do dia **09/01/2019** (hora e data de Brasília).

Código de controle do documento: **f6f8.4ae2.f59c.a1f4**

Autenticidade poderá ser confirmada na página da instituição SATC na Internet, no endereço www.autentico.satc.edu.br.



SATC - Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina
 LAEC - Laboratório de Análises e Ensaios de Carvão
 Rua Pascoal Meller, 73, Universitário, Criciúma/SC - CEP.: 88.805-380
 Fone: 048 3431-7516 Fone/Fax: 048 3431-7515 E-mail: laec@satc.edu.br

RELATÓRIO DE ANÁLISES/ENSAIOS Nº: 1835/2019

Descrição da Amostra:	CR - 3 (<1,35)	AMOSTRAGENS	
Tipo da Amostra:	CARVÃO MINERAL	Método:	X
Cliente:	COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA	Local da Coleta:	X
Endereço do Cliente:	RUA ESTELA	Data:	-
Contato:	JOSÉ RICARDO LEMES DE ALMEIDA	Representatividade:	X
Contratante:	COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA	Condições Climáticas Observações:	X
Data Recebimento:	15/04/2019		

Amostra	Análises/Ensaio	Método / Referência	Resultado		Data da Análise	Especificações
Cabeça	DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DE HIGROSCOPIA	PO - 059 Rev: 10 / ASTM D 3173	1,35	%	16/04/2019	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR	PO - 063 Rev: 15 / ASTM D 5865-13 - Analisado	7882	Cal/g	17/04/2019	Temperatura(C): 24,80

Considerações: Os Resultados contidos neste relatório tem significado restrito à amostra analisada/ensaiada. Este documento só poderá ser reproduzido de forma integral e sem alteração do seu conteúdo original. Quando a amostragem não for realizada pelos colaboradores do LABSATC, as informações fornecidas referente a esta atividade são de responsabilidade do cliente/contratante. "Amostragem realizada pelo cliente".

DANIELA COSTA PEREIRA
 Signatário Autorizado

JEFFERSON MORONA
 Responsável Técnico
 CRQ 13.300701 - 13ª Região

Documento finalizado eletronicamente e assinado por DANIELA COSTA PEREIRA, na data de 17/04/2019, as 11:29:13.

Documento emitido às: **11:30:42** do dia **17/04/2019** (hora e data de Brasília).

Código de controle do documento: **7027.3c66.e8ee.11fd**

Autenticidade poderá ser confirmada na página da instituição SATC na Internet, no endereço www.autentico.satc.edu.br.



SATC - Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina
 LAEC - Laboratório de Análises e Ensaios de Carvão
 Rua Pascoal Meller, 73, Universitário, Criciúma/SC - CEP.: 88.805-380
 Fone: 048 3431-7516 Fone/Fax: 048 3431-7515 E-mail: laec@satc.edu.br

RELATÓRIO DE ANÁLISES/ENSAIOS Nº: 0034/2019

Descrição da Amostra:	CR-04	AMOSTRAGENS	
Tipo da Amostra:	CARVÃO	Método:	X
Cliente:	COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA	Local da Coleta:	X
Endereço do Cliente:	RUA ESTELA	Data:	-
Contato:	JOSÉ RICARDO LEMES DE ALMEIDA	Representatividade:	X
Contratante:	COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA	Condições Climáticas Observações:	X
Data Recebimento:	04/01/2019		

ENSAIO DENSIMÉTRICO - ED
 PO - 055 Rev: 6

DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DE HIGROSCOPIA - UH
 PO - 059 Rev: 10 / ASTM D 3173

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CINZAS - CZ
 PO - 060 Rev: 12 / ASTM D 3174

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE MATÉRIAS VOLÁTEIS - MV
 PO - 061 Rev: 9 / ASTM D 3175

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE ENXOFRE TOTAL - ST
 PO - 064 Rev: 12 / ASTM D 4239

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CARBONO - CA
 PO - 197 Rev: 2

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE HIDROGÊNIO - HI
 PO - 197 Rev: 2

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE NITROGÊNIO - NI
 PO - 197 Rev: 2

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE OXIGÊNIO - O2
 PO - 347 Rev: 0

Documento emitido às: **14:54:51** do dia **09/01/2019** (hora e data de Brasília).

Código de controle do documento: **21c9.2448.8426.767d**

Autenticidade poderá ser confirmada na página da instituição SATC na Internet, no endereço www.autentico.satc.edu.br.



SATC - Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina
 LAEC - Laboratório de Análises e Ensaio de Carvão
 Rua Pascoal Meller, 73, Universitário, Criciúma/SC - CEP.: 88.805-380
 Fone: 048 3431-7516 Fone/Fax: 048 3431-7515 E-mail: laec@satc.edu.br

RELATÓRIO DE ANÁLISES/ENSAIOS Nº: 0034/2019

Descrição da Amostra:	CR-04	AMOSTRAGENS	
Tipo da Amostra:	CARVÃO	Método:	X
Cliente:	COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA	Local da Coleta:	X
Endereço do Cliente:	RUA ESTELA	Data:	-
Contato:	JOSÉ RICARDO LEMES DE ALMEIDA	Representatividade:	X
Contratante:	COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA	Condições Climáticas Observações:	X
Data Recebimento:	04/01/2019		

Análises	Fração	(%)	UH (%)	CZ (%)	MV (%)	ST (%)	CA (%)	HI (%)	NI (%)	O2 (%)
ED	< 1,35	20,76	1,30	8,01	40,06	1,70	78,68	5,53	1,73	4,35
ED	> 1,35	79,24	-	-	-	-	-	-	-	-

Considerações: Os Resultados contidos neste relatório tem significado restrito à amostra analisada/ensaiada. Este documento só poderá ser reproduzido de forma integral e sem alteração do seu conteúdo original. Quando a amostragem não for realizada pelos colaboradores do LABSATC, as informações fornecidas referente a esta atividade são de responsabilidade do cliente/contratante. "Amostragem realizada pelo cliente".

DANIELA COSTA PEREIRA
 Signatário Autorizado

JEFFERSON MORONA
 Responsável Técnico
 CRQ 13.300701 - 13ª Região

Documento finalizado eletronicamente e assinado por DANIELA COSTA PEREIRA, na data de 09/01/2019, as 14:53:55.

Documento emitido às: **14:54:51** do dia **09/01/2019** (hora e data de Brasília).

Código de controle do documento: **21c9.2448.8426.767d**

Autenticidade poderá ser confirmada na página da instituição SATC na Internet, no endereço www.autentico.satc.edu.br.



SATC - Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina
 LAEC - Laboratório de Análises e Ensaios de Carvão
 Rua Pascoal Meller, 73, Universitário, Criciúma/SC - CEP.: 88.805-380
 Fone: 048 3431-7516 Fone/Fax: 048 3431-7515 E-mail: laec@satc.edu.br

RELATÓRIO DE ANÁLISES/ENSAIOS Nº: 1836/2019

Descrição da Amostra:	CR - 4 (<1,35)	AMOSTRAGENS	
Tipo da Amostra:	CARVÃO MINERAL	Método:	X
Cliente:	COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA	Local da Coleta:	X
Endereço do Cliente:	RUA ESTELA	Data:	-
Contato:	JOSÉ RICARDO LEMES DE ALMEIDA	Representatividade:	X
Contratante:	COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA	Condições Climáticas Observações:	X
Data Recebimento:	15/04/2019		

Amostra	Análises/Ensaio	Método / Referência	Resultado		Data da Análise	Especificações
Cabeça	DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DE HIGROSCOPIA	PO - 059 Rev: 10 / ASTM D 3173	1,49	%	16/04/2019	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR	PO - 063 Rev: 15 / ASTM D 5865-13 - Analisado	7818	Cal/g	17/04/2019	Temperatura(C): 24,70

Considerações: Os Resultados contidos neste relatório tem significado restrito à amostra analisada/ensaiada. Este documento só poderá ser reproduzido de forma integral e sem alteração do seu conteúdo original. Quando a amostragem não for realizada pelos colaboradores do LABSATC, as informações fornecidas referente a esta atividade são de responsabilidade do cliente/contratante. "Amostragem realizada pelo cliente".

DANIELA COSTA PEREIRA
 Signatário Autorizado

JEFFERSON MORONA
 Responsável Técnico
 CRQ 13.300701 - 13ª Região

Documento finalizado eletronicamente e assinado por DANIELA COSTA PEREIRA, na data de 17/04/2019, as 11:29:39.

Documento emitido às: **11:31:08** do dia **17/04/2019** (hora e data de Brasília).

Código de controle do documento: **da77.5221.a043.4245**

Autenticidade poderá ser confirmada na página da instituição SATC na Internet, no endereço www.autentico.satc.edu.br.



SATC - Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina
 LAEC - Laboratório de Análises e Ensaios de Carvão
 Rua Pascoal Meller, 73, Universitário, Criciúma/SC - CEP.: 88.805-380
 Fone: 048 3431-7516 Fone/Fax: 048 3431-7515 E-mail: laec@satc.edu.br

RELATÓRIO DE ANÁLISES/ENSAIOS Nº: 0035/2019

Descrição da Amostra:	CR-05	AMOSTRAGENS	
Tipo da Amostra:	CARVÃO	Método:	X
Cliente:	COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA	Local da Coleta:	X
Endereço do Cliente:	RUA ESTELA	Data:	-
Contato:	JOSÉ RICARDO LEMES DE ALMEIDA	Representatividade:	X
Contratante:	COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA	Condições Climáticas Observações:	X
Data Recebimento:	04/01/2019		

ENSAIO DENSIMÉTRICO - ED
 PO - 055 Rev: 6

DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DE HIGROSCOPIA - UH
 PO - 059 Rev: 10 / ASTM D 3173

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CINZAS - CZ
 PO - 060 Rev: 12 / ASTM D 3174

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE MATÉRIAS VOLÁTEIS - MV
 PO - 061 Rev: 9 / ASTM D 3175

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE ENXOFRE TOTAL - ST
 PO - 064 Rev: 12 / ASTM D 4239

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CARBONO - CA
 PO - 197 Rev: 2

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE HIDROGÊNIO - HI
 PO - 197 Rev: 2

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE NITROGÊNIO - NI
 PO - 197 Rev: 2

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE OXIGÊNIO - O2
 PO - 347 Rev: 0

Documento emitido às: **14:54:21** do dia **09/01/2019** (hora e data de Brasília).

Código de controle do documento: **1e2b.1143.2bcf.d02f**

Autenticidade poderá ser confirmada na página da instituição SATC na Internet, no endereço www.autentico.satc.edu.br.



SATC - Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina
 LAEC - Laboratório de Análises e Ensaio de Carvão
 Rua Pascoal Meller, 73, Universitário, Criciúma/SC - CEP.: 88.805-380
 Fone: 048 3431-7516 Fone/Fax: 048 3431-7515 E-mail: laec@satc.edu.br

RELATÓRIO DE ANÁLISES/ENSAIOS Nº: 0035/2019

Descrição da Amostra:	CR-05	AMOSTRAGENS	
Tipo da Amostra:	CARVÃO	Método:	X
Cliente:	COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA	Local da Coleta:	X
Endereço do Cliente:	RUA ESTELA	Data:	-
Contato:	JOSÉ RICARDO LEMES DE ALMEIDA	Representatividade:	X
Contratante:	COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA	Condições Climáticas Observações:	X
Data Recebimento:	04/01/2019		

Análises	Fração	(%)	UH (%)	CZ (%)	MV (%)	ST (%)	CA (%)	HI (%)	NI (%)	O2 (%)
ED	< 1,35	0,65	2,40	7,37	31,56	2,04	79,15	5,13	1,60	4,71
ED	> 1,35	99,35	-	-	-	-	-	-	-	-

Considerações: Os Resultados contidos neste relatório tem significado restrito à amostra analisada/ensaiada. Este documento só poderá ser reproduzido de forma integral e sem alteração do seu conteúdo original. Quando a amostragem não for realizada pelos colaboradores do LABSATC, as informações fornecidas referente a esta atividade são de responsabilidade do cliente/contratante. "Amostragem realizada pelo cliente".

DANIELA COSTA PEREIRA
 Signatário Autorizado

JEFFERSON MORONA
 Responsável Técnico
 CRQ 13.300701 - 13ª Região

Documento finalizado eletronicamente e assinado por DANIELA COSTA PEREIRA, na data de 09/01/2019, as 14:53:25.

Documento emitido às: **14:54:21** do dia **09/01/2019** (hora e data de Brasília).

Código de controle do documento: **1e2b.1143.2bcf.d02f**

Autenticidade poderá ser confirmada na página da instituição SATC na Internet, no endereço www.autentico.satc.edu.br.



SATC - Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina
 LAEC - Laboratório de Análises e Ensaios de Carvão
 Rua Pascoal Meller, 73, Universitário, Criciúma/SC - CEP.: 88.805-380
 Fone: 048 3431-7516 Fone/Fax: 048 3431-7515 E-mail: laec@satc.edu.br

RELATÓRIO DE ANÁLISES/ENSAIOS Nº: 1837/2019

Descrição da Amostra:	CR - 5 (<1,35)	AMOSTRAGENS	
Tipo da Amostra:	CARVÃO MINERAL	Método:	X
Cliente:	COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA	Local da Coleta:	X
Endereço do Cliente:	RUA ESTELA	Data:	-
Contato:	JOSÉ RICARDO LEMES DE ALMEIDA	Representatividade:	X
Contratante:	COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA	Condições Climáticas Observações:	X
Data Recebimento:	15/04/2019		

Amostra	Análises/Ensaio	Método / Referência	Resultado		Data da Análise	Especificações
Cabeça	DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DE HIGROSCOPIA	PO - 059 Rev: 10 / ASTM D 3173	2,63	%	16/04/2019	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR	PO - 063 Rev: 15 / ASTM D 5865-13 - Analisado	7466	Cal/g	17/04/2019	Temperatura(C): 24,80

Considerações: Os Resultados contidos neste relatório tem significado restrito à amostra analisada/ensaiada. Este documento só poderá ser reproduzido de forma integral e sem alteração do seu conteúdo original. Quando a amostragem não for realizada pelos colaboradores do LABSATC, as informações fornecidas referente a esta atividade são de responsabilidade do cliente/contratante. "Amostragem realizada pelo cliente".

DANIELA COSTA PEREIRA
 Signatário Autorizado

JEFFERSON MORONA
 Responsável Técnico
 CRQ 13.300701 - 13ª Região

Documento finalizado eletronicamente e assinado por DANIELA COSTA PEREIRA, na data de 17/04/2019, as 11:30:04.

Documento emitido às: **11:31:32** do dia **17/04/2019** (hora e data de Brasília).

Código de controle do documento: **8460.4629.df6b.ae6a**

Autenticidade poderá ser confirmada na página da instituição SATC na Internet, no endereço www.autentico.satc.edu.br.



SATC - Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina
 LAEC - Laboratório de Análises e Ensaio de Carvão
 Rua Pascoal Meller, 73, Universitário, Criciúma/SC - CEP.: 88.805-380
 Fone: 048 3431-7516 Fone/Fax: 048 3431-7515 E-mail: laec@satc.edu.br

RELATÓRIO DE ANÁLISES/ENSAIOS Nº: 0036/2019

Descrição da Amostra:	CR-06	AMOSTRAGENS	
Tipo da Amostra:	CARVÃO	Método:	X
Cliente:	COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA	Local da Coleta:	X
Endereço do Cliente:	RUA ESTELA	Data:	-
Contato:	JOSÉ RICARDO LEMES DE ALMEIDA	Representatividade:	X
Contratante:	COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA	Condições Climáticas Observações:	X
Data Recebimento:	04/01/2019		

ENSAIO DENSIMÉTRICO - ED
 PO - 055 Rev: 6

DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DE HIGROSCOPIA - UH
 PO - 059 Rev: 10 / ASTM D 3173

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CINZAS - CZ
 PO - 060 Rev: 12 / ASTM D 3174

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE MATÉRIAS VOLÁTEIS - MV
 PO - 061 Rev: 9 / ASTM D 3175

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE ENXOFRE TOTAL - ST
 PO - 064 Rev: 12 / ASTM D 4239

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CARBONO - CA
 PO - 197 Rev: 2

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE HIDROGÊNIO - HI
 PO - 197 Rev: 2

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE NITROGÊNIO - NI
 PO - 197 Rev: 2

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE OXIGÊNIO - O2
 PO - 347 Rev: 0

Documento emitido às: **14:53:47** do dia **09/01/2019** (hora e data de Brasília).

Código de controle do documento: **a935.9287.a0ae.8d62**

Autenticidade poderá ser confirmada na página da instituição SATC na Internet, no endereço www.autentico.satc.edu.br.



SATC - Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina
 LAEC - Laboratório de Análises e Ensaios de Carvão
 Rua Pascoal Meller, 73, Universitário, Criciúma/SC - CEP.: 88.805-380
 Fone: 048 3431-7516 Fone/Fax: 048 3431-7515 E-mail: laec@satc.edu.br

RELATÓRIO DE ANÁLISES/ENSAIOS Nº: 0036/2019

Descrição da Amostra:	CR-06	AMOSTRAGENS	
Tipo da Amostra:	CARVÃO	Método:	X
Cliente:	COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA	Local da Coleta:	X
Endereço do Cliente:	RUA ESTELA	Data:	-
Contato:	JOSÉ RICARDO LEMES DE ALMEIDA	Representatividade:	X
Contratante:	COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA	Condições Climáticas Observações:	X
Data Recebimento:	04/01/2019		

Análises	Fração	(%)	UH (%)	CZ (%)	MV (%)	ST (%)	CA (%)	HI (%)	NI (%)	O2 (%)
ED	< 1,35	52,00	2,03	8,22	38,47	1,51	77,62	5,51	1,73	5,41
ED	> 1,35	48,00	-	-	-	-	-	-	-	-

Considerações: Os Resultados contidos neste relatório tem significado restrito à amostra analisada/ensaiada. Este documento só poderá ser reproduzido de forma integral e sem alteração do seu conteúdo original. Quando a amostragem não for realizada pelos colaboradores do LABSATC, as informações fornecidas referente a esta atividade são de responsabilidade do cliente/contratante. "Amostragem realizada pelo cliente".

DANIELA COSTA PEREIRA
 Signatário Autorizado

JEFFERSON MORONA
 Responsável Técnico
 CRQ 13.300701 - 13ª Região

Documento finalizado eletronicamente e assinado por DANIELA COSTA PEREIRA, na data de 09/01/2019, as 14:52:51.

Documento emitido às: **14:53:47** do dia **09/01/2019** (hora e data de Brasília).

Código de controle do documento: **a935.9287.a0ae.8d62**

Autenticidade poderá ser confirmada na página da instituição SATC na Internet, no endereço www.autentico.satc.edu.br.



SATC - Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina
 LAEC - Laboratório de Análises e Ensaios de Carvão
 Rua Pascoal Meller, 73, Universitário, Criciúma/SC - CEP.: 88.805-380
 Fone: 048 3431-7516 Fone/Fax: 048 3431-7515 E-mail: laec@satc.edu.br

RELATÓRIO DE ANÁLISES/ENSAIOS Nº: 1838/2019

Descrição da Amostra:	CR - 6 (<1,35)	AMOSTRAGENS	
Tipo da Amostra:	CARVÃO MINERAL	Método:	X
Cliente:	COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA	Local da Coleta:	X
Endereço do Cliente:	RUA ESTELA	Data:	-
Contato:	JOSÉ RICARDO LEMES DE ALMEIDA	Representatividade:	X
Contratante:	COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA	Condições Climáticas Observações:	X
Data Recebimento:	15/04/2019		

Amostra	Análises/Ensaios	Método / Referência	Resultado		Data da Análise	Especificações
Cabeça	DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DE HIGROSCOPIA	PO - 059 Rev: 10 / ASTM D 3173	2,18	%	16/04/2019	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR	PO - 063 Rev: 15 / ASTM D 5865-13 - Analisado	7621	Cal/g	17/04/2019	Temperatura(C): 24,90

Considerações: Os Resultados contidos neste relatório tem significado restrito à amostra analisada/ensaiada. Este documento só poderá ser reproduzido de forma integral e sem alteração do seu conteúdo original. Quando a amostragem não for realizada pelos colaboradores do LABSATC, as informações fornecidas referente a esta atividade são de responsabilidade do cliente/contratante. "Amostragem realizada pelo cliente".

DANIELA COSTA PEREIRA
 Signatário Autorizado

JEFFERSON MORONA
 Responsável Técnico
 CRQ 13.300701 - 13ª Região

Documento finalizado eletronicamente e assinado por DANIELA COSTA PEREIRA, na data de 17/04/2019, as 11:30:30.

Documento emitido às: **11:31:58** do dia **17/04/2019** (hora e data de Brasília).

Código de controle do documento: **c68d.e5bc.a64e.33dc**

Autenticidade poderá ser confirmada na página da instituição SATC na Internet, no endereço www.autentico.satc.edu.br.



SATC - Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina
 LAEC - Laboratório de Análises e Ensaios de Carvão
 Rua Pascoal Meller, 73, Universitário, Criciúma/SC - CEP.: 88.805-380
 Fone: 048 3431-7516 Fone/Fax: 048 3431-7515 E-mail: laec@satc.edu.br

RELATÓRIO DE ANÁLISES/ENSAIOS Nº: 0037/2019

Descrição da Amostra:	CR-07	AMOSTRAGENS	
Tipo da Amostra:	CARVÃO	Método:	X
Cliente:	COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA	Local da Coleta:	X
Endereço do Cliente:	RUA ESTELA	Data:	-
Contato:	JOSÉ RICARDO LEMES DE ALMEIDA	Representatividade:	X
Contratante:	COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA	Condições Climáticas Observações:	X
Data Recebimento:	04/01/2019		

ENSAIO DENSIMÉTRICO - ED
 PO - 055 Rev: 6

DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DE HIGROSCOPIA - UH
 PO - 059 Rev: 10 / ASTM D 3173

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CINZAS - CZ
 PO - 060 Rev: 12 / ASTM D 3174

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE MATÉRIAS VOLÁTEIS - MV
 PO - 061 Rev: 9 / ASTM D 3175

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE ENXOFRE TOTAL - ST
 PO - 064 Rev: 12 / ASTM D 4239

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CARBONO - CA
 PO - 197 Rev: 2

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE HIDROGÊNIO - HI
 PO - 197 Rev: 2

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE NITROGÊNIO - NI
 PO - 197 Rev: 2

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE OXIGÊNIO - O2
 PO - 347 Rev: 0

Documento emitido às: **14:53:08** do dia **09/01/2019** (hora e data de Brasília).

Código de controle do documento: **0179.2b18.da65.dd33**

Autenticidade poderá ser confirmada na página da instituição SATC na Internet, no endereço www.autentico.satc.edu.br.



SATC - Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina
 LAEC - Laboratório de Análises e Ensaio de Carvão
 Rua Pascoal Meller, 73, Universitário, Criciúma/SC - CEP.: 88.805-380
 Fone: 048 3431-7516 Fone/Fax: 048 3431-7515 E-mail: laec@satc.edu.br

RELATÓRIO DE ANÁLISES/ENSAIOS Nº: 0037/2019

Descrição da Amostra:	CR-07	AMOSTRAGENS	
Tipo da Amostra:	CARVÃO	Método:	X
Cliente:	COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA	Local da Coleta:	X
Endereço do Cliente:	RUA ESTELA	Data:	-
Contato:	JOSÉ RICARDO LEMES DE ALMEIDA	Representatividade:	X
Contratante:	COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA	Condições Climáticas Observações:	X
Data Recebimento:	04/01/2019		

Análises	Fração	(%)	UH (%)	CZ (%)	MV (%)	ST (%)	CA (%)	HI (%)	NI (%)	O2 (%)
ED	< 1,35	0,97	1,76	6,87	37,63	1,56	80,32	5,58	1,73	3,94
ED	> 1,35	99,03	-	-	-	-	-	-	-	-

Considerações: Os Resultados contidos neste relatório tem significado restrito à amostra analisada/ensaiada. Este documento só poderá ser reproduzido de forma integral e sem alteração do seu conteúdo original. Quando a amostragem não for realizada pelos colaboradores do LABSATC, as informações fornecidas referente a esta atividade são de responsabilidade do cliente/contratante. "Amostragem realizada pelo cliente".

DANIELA COSTA PEREIRA
 Signatário Autorizado

JEFFERSON MORONA
 Responsável Técnico
 CRQ 13.300701 - 13ª Região

Documento finalizado eletronicamente e assinado por DANIELA COSTA PEREIRA, na data de 09/01/2019, as 14:52:12.

Documento emitido às: **14:53:08** do dia **09/01/2019** (hora e data de Brasília).

Código de controle do documento: **0179.2b18.da65.dd33**

Autenticidade poderá ser confirmada na página da instituição SATC na Internet, no endereço www.autentico.satc.edu.br.



SATC - Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina
 LAEC - Laboratório de Análises e Ensaios de Carvão
 Rua Pascoal Meller, 73, Universitário, Criciúma/SC - CEP.: 88.805-380
 Fone: 048 3431-7516 Fone/Fax: 048 3431-7515 E-mail: laec@satc.edu.br

RELATÓRIO DE ANÁLISES/ENSAIOS Nº: 1839/2019

Descrição da Amostra:	CR - 7 (<1,35)	AMOSTRAGENS	
Tipo da Amostra:	CARVÃO MINERAL	Método:	X
Cliente:	COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA	Local da Coleta:	X
Endereço do Cliente:	RUA ESTELA	Data:	-
Contato:	JOSÉ RICARDO LEMES DE ALMEIDA	Representatividade:	X
Contratante:	COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA	Condições Climáticas Observações:	X
Data Recebimento:	15/04/2019		

Amostra	Análises/Ensaios	Método / Referência	Resultado		Data da Análise	Especificações
Cabeça	DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DE HIGROSCOPIA	PO - 059 Rev: 10 / ASTM D 3173	1,92	%	16/04/2019	-
Cabeça	DETERMINAÇÃO DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR	PO - 063 Rev: 15 / ASTM D 5865-13 - Analisado	7833	Cal/g	17/04/2019	Temperatura(C): 25,00

Considerações: Os Resultados contidos neste relatório tem significado restrito à amostra analisada/ensaiada. Este documento só poderá ser reproduzido de forma integral e sem alteração do seu conteúdo original. Quando a amostragem não for realizada pelos colaboradores do LABSATC, as informações fornecidas referente a esta atividade são de responsabilidade do cliente/contratante. "Amostragem realizada pelo cliente".

DANIELA COSTA PEREIRA
 Signatário Autorizado

JEFFERSON MORONA
 Responsável Técnico
 CRQ 13.300701 - 13ª Região

Documento finalizado eletronicamente e assinado por DANIELA COSTA PEREIRA, na data de 17/04/2019, as 11:30:57.

Documento emitido às: **11:32:26** do dia **17/04/2019** (hora e data de Brasília).

Código de controle do documento: **5304.b382.97a1.54ec**

Autenticidade poderá ser confirmada na página da instituição SATC na Internet, no endereço www.autentico.satc.edu.br.

ANEXO 3

Material amostrado tal-qual

Relatórios da determinação da Análise Química das cinzas por espectrometria de fluorescência de raios X e espectrometria de absorção atômica

Sample : CR-01
 Operator:
 Comment : Curva corrigida para o SO3
 Group : STD Cz Sid Americ c
 Date : 2018-12-20 16:56:33

Measurement Condition

Instrument: EDX-7000 Atmosphere: Vac. Collimator: 5(mm) Sample Cup: Polypropylene

Analyte	TG kV	uA	FI	Acq. (keV)	Anal. (keV)	Time(sec)	DT(%)
Na	Rh 15	372-Auto	----	0 - 20	0.84- 1.24	Live- 100	30
Mg	Rh 15	372-Auto	----	0 - 20	1.05- 1.45	Live- 100	30
Al	Rh 15	372-Auto	----	0 - 20	1.29- 1.69	Live- 100	30
Si	Rh 15	372-Auto	----	0 - 20	1.54- 1.94	Live- 100	30
P	Rh 15	372-Auto	----	0 - 20	1.81- 2.21	Live- 100	30
K	Rh 15	372-Auto	----	0 - 20	3.11- 3.51	Live- 100	30
Ca	Rh 15	372-Auto	----	0 - 20	3.49- 3.89	Live- 100	30
Ti	Rh 50	65-Auto	----	0 - 40	4.30- 4.70	Live- 100	30
Fe	Rh 50	65-Auto	----	0 - 40	6.20- 6.60	Live- 100	30
S	Rh 15	372-Auto	----	0 - 20	2.11- 2.51	Live- 100	30

Qualitative Result

Element: Na, Mg, Al, Si, P, K, Ca, Ti, Fe, S

Peak List

Channel	Line	keV	Net Int. (cps/uA)	
Na	NaKa	1.04	0.0014	QF
Mg	MgKa	1.25	0.0514	QF
Al	AlKa	1.49	8.6859	QF
Si	SiKa	1.74	29.8848	QF
P	P Ka	2.01	0.0230	QF
K	K Ka	3.31	6.2156	QF
Ca	CaKa	3.69	0.5800	QF
Ti	TiKa	4.50	15.8741	QF
Fe	FeKa	6.40	543.1571	QF
S	S Ka	2.31	0.3489	QF

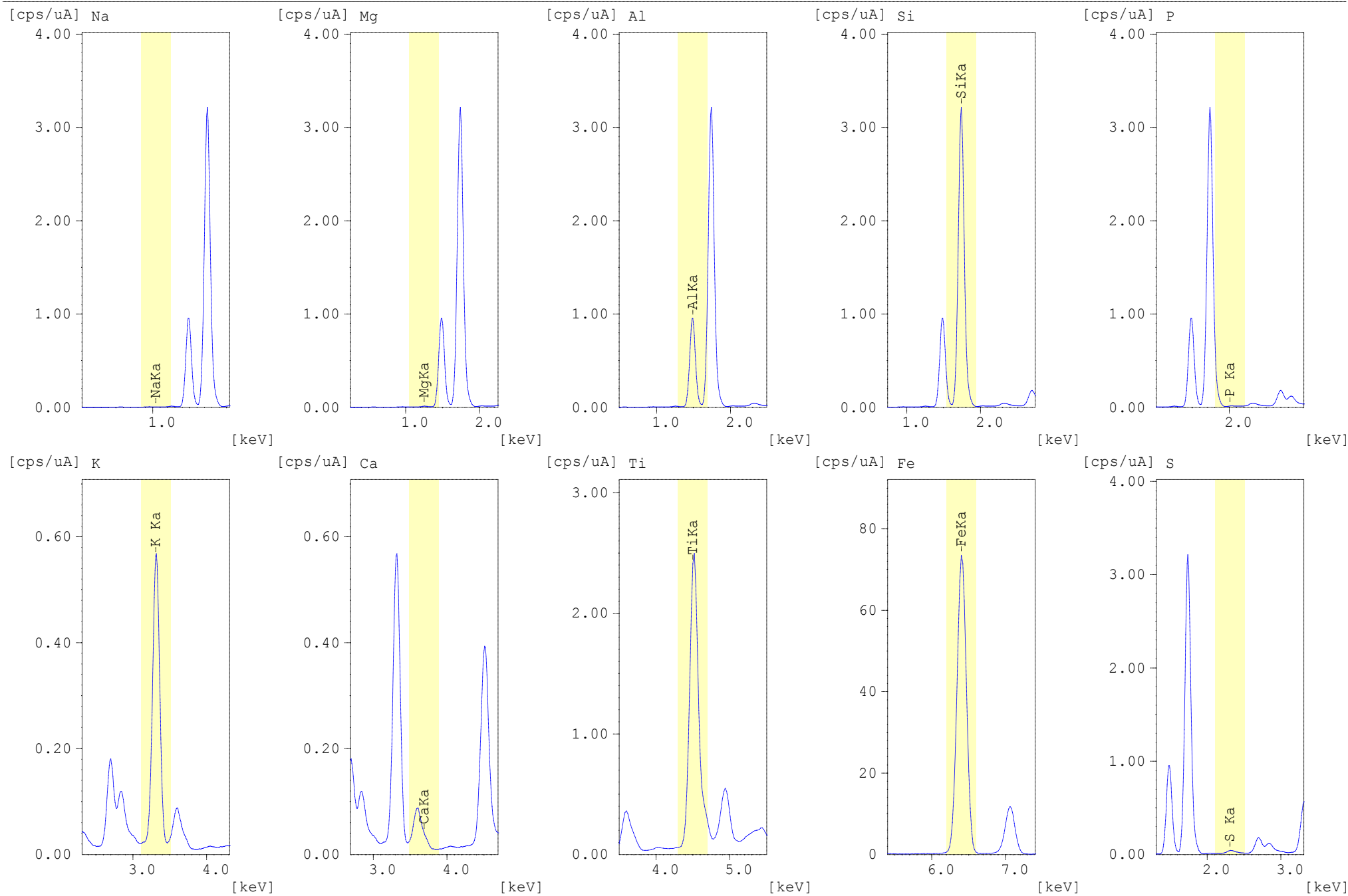
Quantitative Result

Analyte	Result	[3-sigma]	Proc.-Calc.	Line	Int. (cps/uA)
Na2O	0.227 %	[0.292]	Quan-EC	NaKa	0.0014
MgO	1.160 %	[0.301]	Quan-EC	MgKa	0.0514
Al2O3	27.293 %	[0.068]	Quan-EC	AlKa	8.6859
SiO2	63.259 %	[0.173]	Quan-EC	SiKa	29.8848
P2O5	0.013 %	[0.012]	Quan-EC	P Ka	0.0230
K2O	2.773 %	[0.017]	Quan-EC	K Ka	6.2156
CaO	0.039 %	[0.008]	Quan-EC	CaKa	0.5800
TiO2	1.270 %	[0.012]	Quan-EC	TiKa	15.8741
Fe2O3	15.227 %	[0.024]	Quan-EC	FeKa	543.1571
SO3	0.275 %	[0.008]	Quan-EC	S Ka	0.3489

Sample : CR-01
Operator:

Group : STD Cz Sid Americ c
Comment : Curva corrigida para o SO3

Date : 2018-12-20 16:56:33
01/01



CR-01		
Elementos	Valor	% cinza
Na2O (%)	0,227	0,084
MgO (%)	1,160	0,431
Al2O3 (%)	27,293	10,145
SiO2 (%)	63,259	23,515
P2O5 (%)	0,013	0,005
K2O (%)	2,773	1,031
CaO (%)	0,039	0,014
TiO2 (%)	1,270	0,472
Fe2O3 (%)	15,227	5,660
SO3 (%)	0,275	0,102
Total elem.	111,536	41,460
P.F (%)	58,540	
Total(%)		100,000

Total elem. 41,460

Quantitative Result

Analyte	Result
Na2O	0.227 %
MgO	1.160 %
Al2O3	27.293 %
SiO2	63.259 %
P2O5	0.013 %
K2O	2.773 %
CaO	0.039 %
TiO2	1.270 %
Fe2O3	15.227 %
SO3	0.275 %

Sample : CR-02
 Operator:
 Comment : Curva corrigida para o SO3
 Group : STD Cz Sid Americ c
 Date : 2018-12-20 17:03:32

Measurement Condition

Instrument: EDX-7000 Atmosphere: Vac. Collimator: 5(mm) Sample Cup: Polypropylene

Analyte	TG kV	uA	FI	Acq. (keV)	Anal. (keV)	Time (sec)	DT (%)
Na	Rh 15	337-Auto	----	0 - 20	0.84- 1.24	Live- 100	30
Mg	Rh 15	337-Auto	----	0 - 20	1.05- 1.45	Live- 100	30
Al	Rh 15	337-Auto	----	0 - 20	1.29- 1.69	Live- 100	30
Si	Rh 15	337-Auto	----	0 - 20	1.54- 1.94	Live- 100	30
P	Rh 15	337-Auto	----	0 - 20	1.81- 2.21	Live- 100	30
K	Rh 15	337-Auto	----	0 - 20	3.11- 3.51	Live- 100	30
Ca	Rh 15	337-Auto	----	0 - 20	3.49- 3.89	Live- 100	30
Ti	Rh 50	59-Auto	----	0 - 40	4.30- 4.70	Live- 100	30
Fe	Rh 50	59-Auto	----	0 - 40	6.20- 6.60	Live- 100	30
S	Rh 15	337-Auto	----	0 - 20	2.11- 2.51	Live- 100	30

Qualitative Result

Element: Na, Mg, Al, Si, P, K, Ca, Ti, Fe, S

Peak List

Channel	Line	keV	Net Int. (cps/uA)	
Na	NaKa	1.04	0.0057	QF
Mg	MgKa	1.25	0.0692	QF
Al	AlKa	1.49	6.2863	QF
Si	SiKa	1.74	30.9559	QF
P	P Ka	2.01	0.0183	QF
K	K Ka	3.31	6.5932	QF
Ca	CaKa	3.69	6.3745	QF
Ti	TiKa	4.50	9.1409	QF
Fe	FeKa	6.40	603.3589	QF
S	S Ka	2.31	5.1870	QF

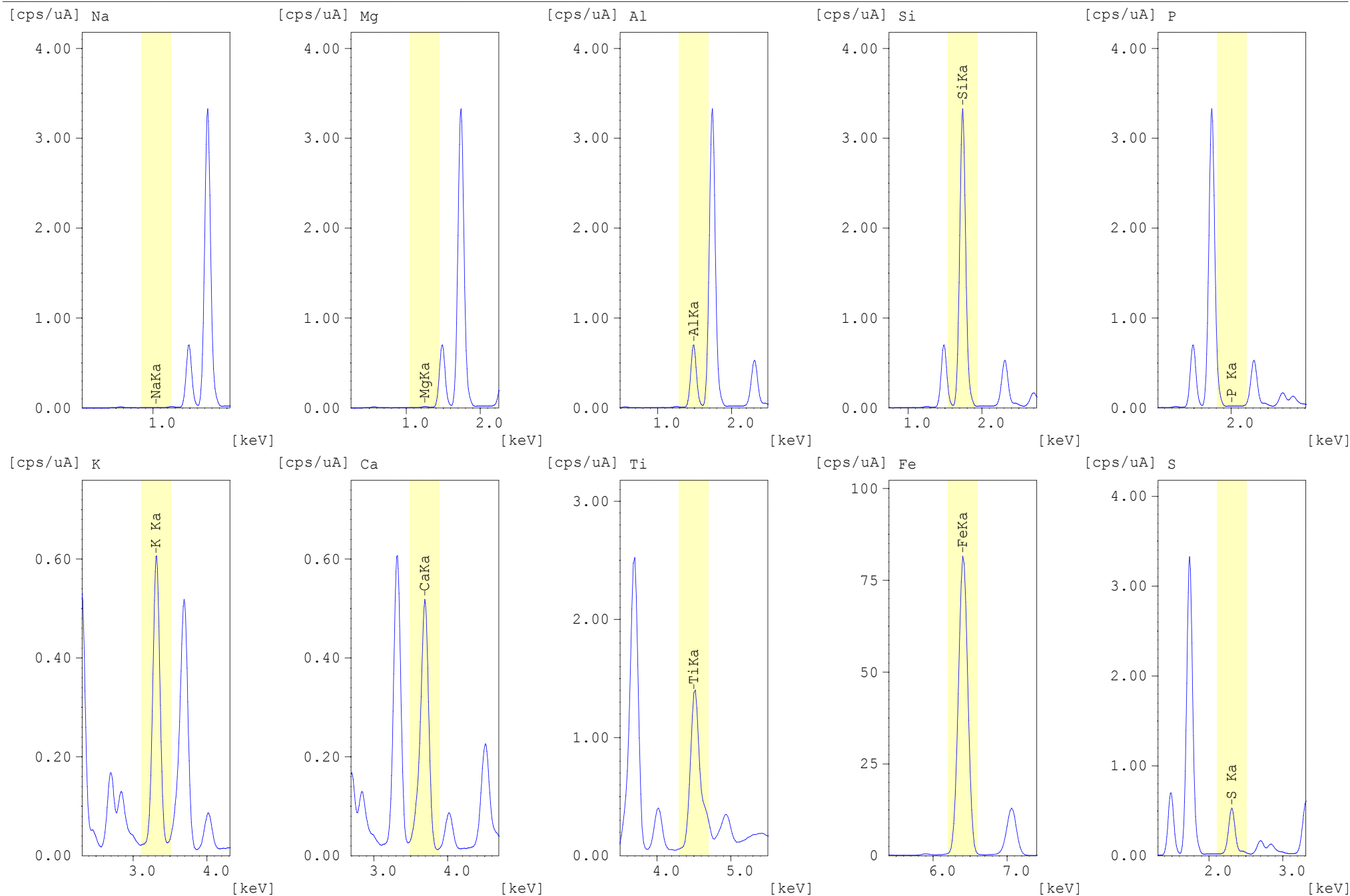
Quantitative Result

Analyte	Result	[3-sigma]	Proc.-Calc.	Line	Int. (cps/uA)
Na2O	0.534 %	[0.328]	Quan-EC	NaKa	0.0057
MgO	2.139 %	[0.352]	Quan-EC	MgKa	0.0692
Al2O3	23.728 %	[0.062]	Quan-EC	AlKa	6.2863
SiO2	65.434 %	[0.186]	Quan-EC	SiKa	30.9559
P2O5	0.006 %	[0.016]	Quan-EC	P Ka	0.0183
K2O	2.939 %	[0.019]	Quan-EC	K Ka	6.5932
CaO	2.515 %	[0.018]	Quan-EC	CaKa	6.3745
TiO2	0.727 %	[0.010]	Quan-EC	TiKa	9.1409
Fe2O3	16.915 %	[0.027]	Quan-EC	FeKa	603.3589
SO3	3.105 %	[0.023]	Quan-EC	S Ka	5.1870

Sample : CR-02
Operator:

Group : STD Cz Sid Americ c
Comment : Curva corrigida para o SO3

Date : 2018-12-20 17:03:32
01/01



CR-02		
Elementos	Valor	% cinza
Na2O (%)	0,534	0,199
MgO (%)	2,139	0,796
Al2O3 (%)	23,728	8,828
SiO2 (%)	65,434	24,346
P2O5 (%)	0,006	0,002
K2O (%)	2,939	1,094
CaO (%)	2,515	0,936
TiO2 (%)	0,727	0,270
Fe2O3 (%)	16,915	6,294
SO3 (%)	3,105	1,155
Total elem.	118,042	43,920
P.F (%)	56,080	
Total(%)		100,000

Quantitative Result

Analyte	Result
Na2O	0.534 %
MgO	2.139 %
Al2O3	23.728 %
SiO2	65.434 %
P2O5	0.006 %
K2O	2.939 %
CaO	2.515 %
TiO2	0.727 %
Fe2O3	16.915 %
SO3	3.105 %

Total elem. 43,920

Sample : CR-03
 Operator:
 Comment : Curva corrigida para o SO3
 Group : STD Cz Sid Americ c
 Date : 2018-12-20 17:09:12

Measurement Condition

Instrument: EDX-7000 Atmosphere: Vac. Collimator: 5(mm) Sample Cup: Polypropylene

Analyte	TG kV	uA	FI	Acq. (keV)	Anal. (keV)	Time(sec)	DT(%)
Na	Rh 15	337-Auto	----	0 - 20	0.84- 1.24	Live- 100	30
Mg	Rh 15	337-Auto	----	0 - 20	1.05- 1.45	Live- 100	30
Al	Rh 15	337-Auto	----	0 - 20	1.29- 1.69	Live- 100	30
Si	Rh 15	337-Auto	----	0 - 20	1.54- 1.94	Live- 100	30
P	Rh 15	337-Auto	----	0 - 20	1.81- 2.21	Live- 100	30
K	Rh 15	337-Auto	----	0 - 20	3.11- 3.51	Live- 100	30
Ca	Rh 15	337-Auto	----	0 - 20	3.49- 3.89	Live- 100	30
Ti	Rh 50	59-Auto	----	0 - 40	4.30- 4.70	Live- 100	30
Fe	Rh 50	59-Auto	----	0 - 40	6.20- 6.60	Live- 100	30
S	Rh 15	337-Auto	----	0 - 20	2.11- 2.51	Live- 100	30

Qualitative Result

Element: Na, Mg, Al, Si, P, K, Ca, Ti, Fe, S

Peak List

Channel	Line	keV	Net Int. (cps/uA)	
Na	NaKa	1.04	0.0017	QF
Mg	MgKa	1.25	0.0283	QF
Al	AlKa	1.49	7.8218	QF
Si	SiKa	1.74	27.0567	QF
P	P Ka	2.01	0.0285	QF
K	K Ka	3.31	4.0583	QF
Ca	CaKa	3.69	8.4942	QF
Ti	TiKa	4.50	13.2357	QF
Fe	FeKa	6.40	610.6430	QF
S	S Ka	2.31	5.4529	QF

Quantitative Result

Analyte	Result	[3-sigma]	Proc.-Calc.	Line	Int. (cps/uA)
Na2O	0.249 %	[0.319]	Quan-EC	NaKa	0.0017
MgO	ND %	[0.311]	Quan-EC	MgKa	0.0283
Al2O3	26.009 %	[0.068]	Quan-EC	AlKa	7.8218
SiO2	57.514 %	[0.174]	Quan-EC	SiKa	27.0567
P2O5	0.023 %	[0.018]	Quan-EC	P Ka	0.0285
K2O	1.825 %	[0.015]	Quan-EC	K Ka	4.0583
CaO	3.421 %	[0.021]	Quan-EC	CaKa	8.4942
TiO2	1.057 %	[0.012]	Quan-EC	TiKa	13.2357
Fe2O3	17.120 %	[0.027]	Quan-EC	FeKa	610.6430
SO3	3.261 %	[0.023]	Quan-EC	S Ka	5.4529

Sample : CR-03

Group : STD Cz Sid Americ c

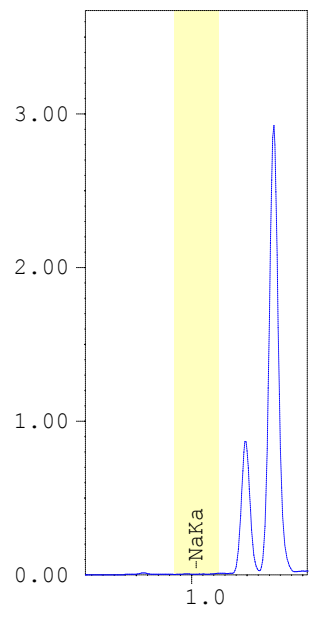
Date : 2018-12-20 17:09:12

Operator:

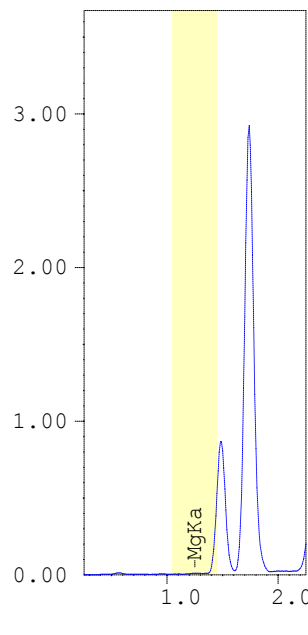
Comment : Curva corrigida para o SO3

01/01

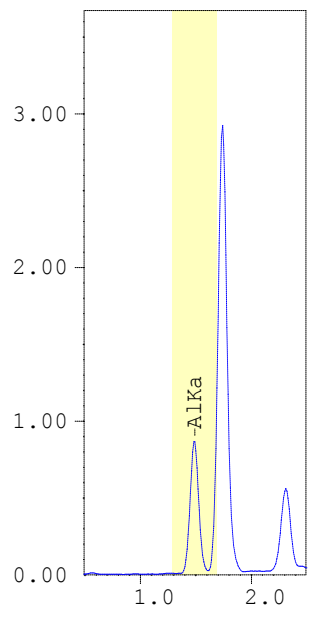
[cps/uA] Na



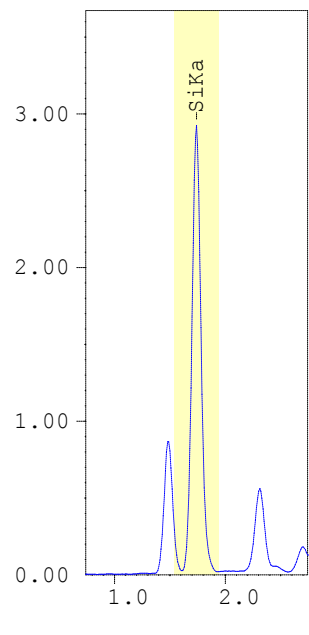
[cps/uA] Mg



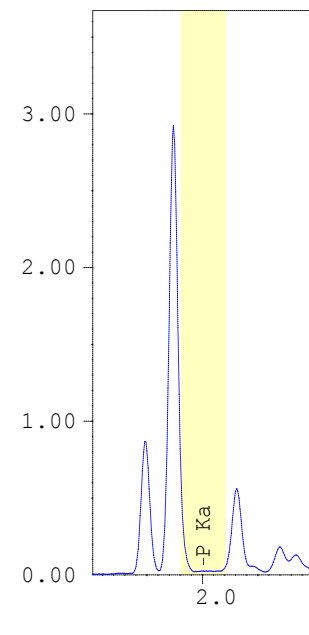
[cps/uA] Al



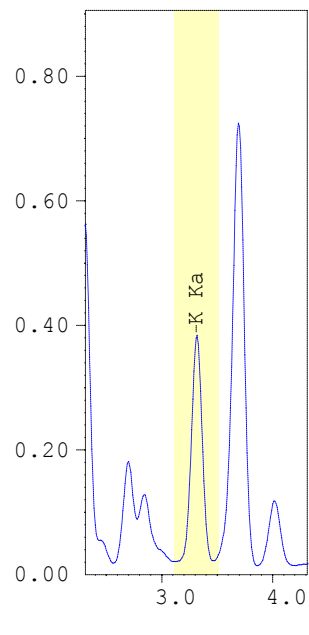
[cps/uA] Si



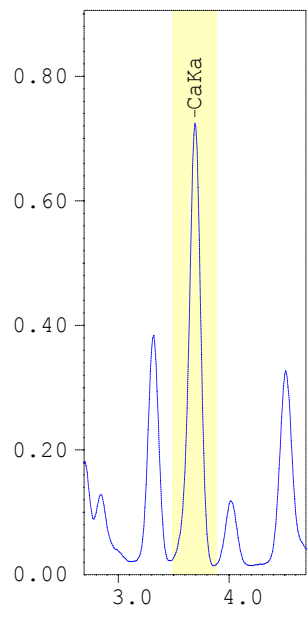
[cps/uA] P



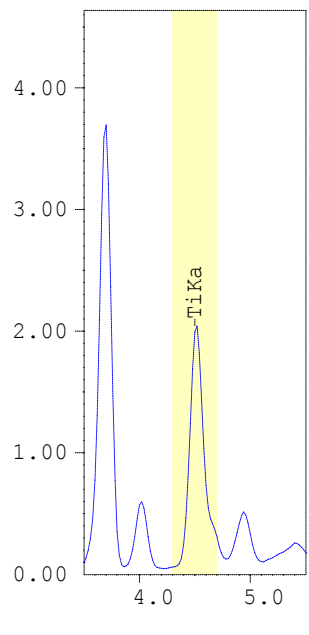
[cps/uA] K



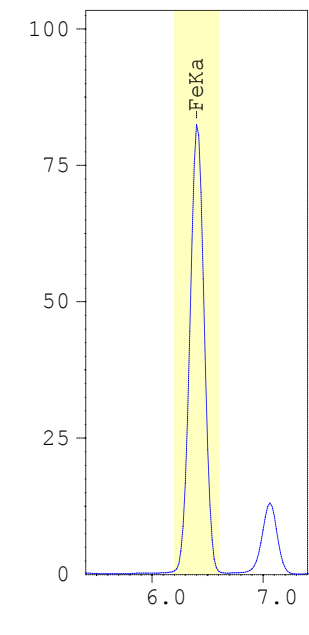
[cps/uA] Ca



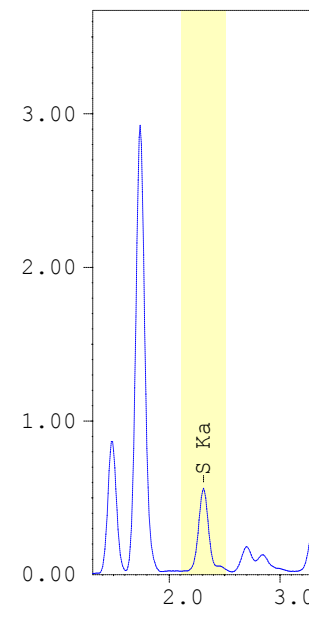
[cps/uA] Ti



[cps/uA] Fe



[cps/uA] S



CR-03		
Elementos	Valor	% cinza
Na2O (%)	0,249	0,090
MgO (%)	0,000	0,000
Al2O3 (%)	26,009	9,447
SiO2 (%)	57,514	20,891
P2O5 (%)	0,023	0,008
K2O (%)	1,825	0,663
CaO (%)	3,421	1,243
TiO2 (%)	1,057	0,384
Fe2O3 (%)	17,120	6,219
SO3 (%)	3,261	1,185
Total elem.	110,479	40,130
P.F (%)	59,870	
Total(%)		100,000

Quantitative Result

Analyte	Result
Na2O	0.249 %
MgO	ND %
Al2O3	26.009 %
SiO2	57.514 %
P2O5	0.023 %
K2O	1.825 %
CaO	3.421 %
TiO2	1.057 %
Fe2O3	17.120 %
SO3	3.261 %

Total elem. 40,130

Sample : CR-04
 Operator:
 Comment : Curva corrigida para o SO3
 Group : STD Cz Sid Americ c
 Date : 2018-12-21 14:38:31

Measurement Condition

Instrument: EDX-7000 Atmosphere: Vac. Collimator: 5(mm) Sample Cup: Polypropylene

Analyte	TG kV	uA	FI	Acq. (keV)	Anal. (keV)	Time (sec)	DT (%)
Na	Rh 15	207-Auto	----	0 - 20	0.84- 1.24	Live- 100	31
Mg	Rh 15	207-Auto	----	0 - 20	1.05- 1.45	Live- 100	31
Al	Rh 15	207-Auto	----	0 - 20	1.29- 1.69	Live- 100	31
Si	Rh 15	207-Auto	----	0 - 20	1.54- 1.94	Live- 100	31
P	Rh 15	207-Auto	----	0 - 20	1.81- 2.21	Live- 100	31
K	Rh 15	207-Auto	----	0 - 20	3.11- 3.51	Live- 100	31
Ca	Rh 15	207-Auto	----	0 - 20	3.49- 3.89	Live- 100	31
Ti	Rh 50	29-Auto	----	0 - 40	4.30- 4.70	Live- 100	30
Fe	Rh 50	29-Auto	----	0 - 40	6.20- 6.60	Live- 100	30
S	Rh 15	207-Auto	----	0 - 20	2.11- 2.51	Live- 100	31

Qualitative Result

Element: Na, Mg, Al, Si, P, K, Ca, Ti, Fe, S

Peak List

Channel	Line	keV	Net Int. (cps/uA)	
Na	NaKa	1.04	0.0000	QF
Mg	MgKa	1.25	0.0175	QF
Al	AlKa	1.49	4.8185	QF
Si	SiKa	1.74	18.2674	QF
P	P Ka	2.01	0.2478	QF
K	K Ka	3.31	2.8809	QF
Ca	CaKa	3.69	0.6093	QF
Ti	TiKa	4.50	12.8595	QF
Fe	FeKa	6.40	1655.0809	QF
S	S Ka	2.31	0.4616	QF

Quantitative Result

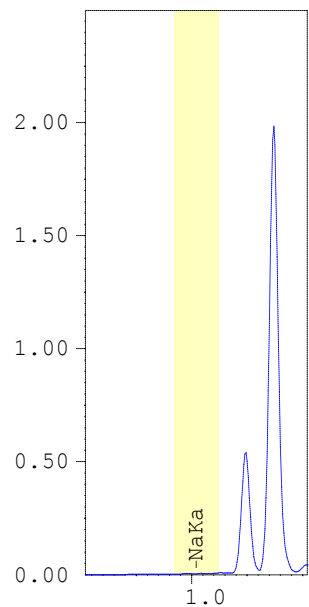
Analyte	Result	[3-sigma]	Proc.-Calc.	Line	Int. (cps/uA)
Na2O	0.129 %	[0.412]	Quan-EC	NaKa	0.0000
MgO	ND %	[0.378]	Quan-EC	MgKa	0.0175
Al2O3	21.547 %	[0.069]	Quan-EC	AlKa	4.8185
SiO2	39.660 %	[0.182]	Quan-EC	SiKa	18.2674
P2O5	0.383 %	[0.027]	Quan-EC	P Ka	0.2478
K2O	1.308 %	[0.016]	Quan-EC	K Ka	2.8809
CaO	0.052 %	[0.010]	Quan-EC	CaKa	0.6093
TiO2	1.027 %	[0.018]	Quan-EC	TiKa	12.8595
Fe2O3	46.419 %	[0.063]	Quan-EC	FeKa	1655.0809
SO3	0.341 %	[0.012]	Quan-EC	S Ka	0.4616

Sample : CR-04
Operator:

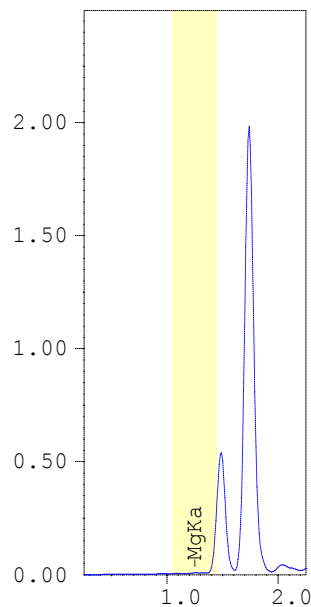
Group : STD Cz Sid Americ c
Comment : Curva corrigida para o SO3

Date : 2018-12-21 14:38:31
01/01

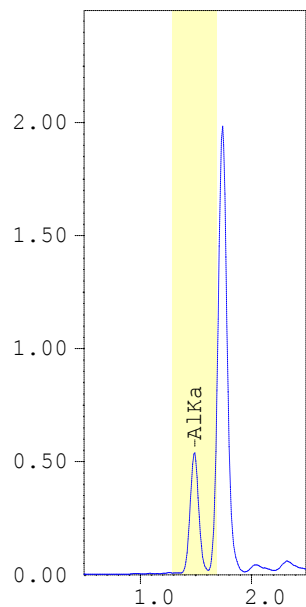
[cps/uA] Na



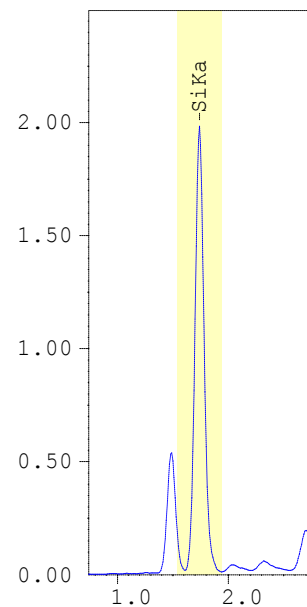
[cps/uA] Mg



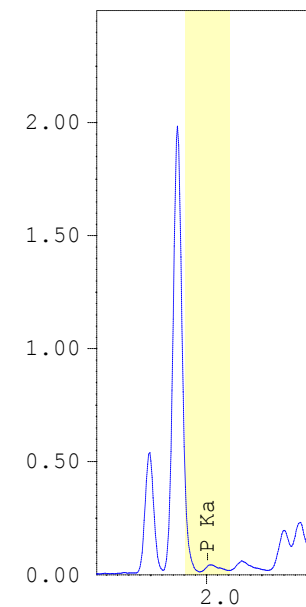
[cps/uA] Al



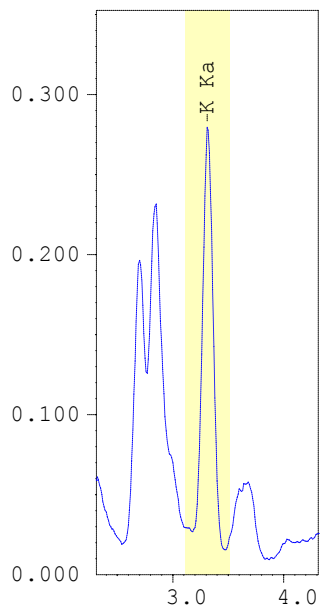
[cps/uA] Si



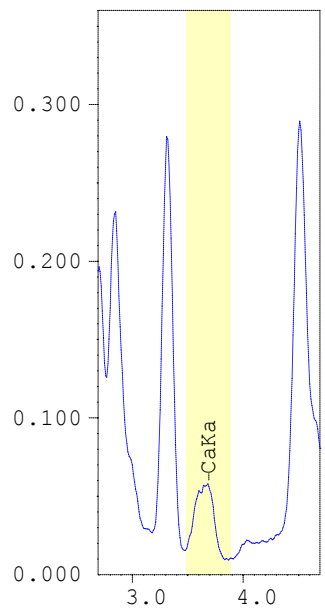
[cps/uA] P



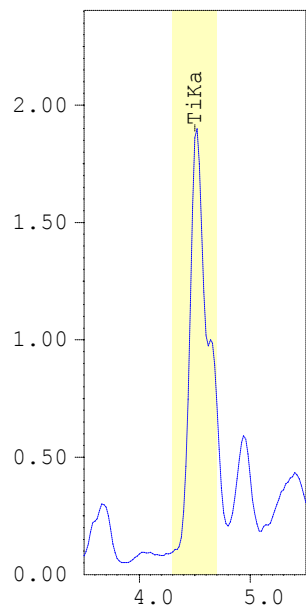
[cps/uA] K



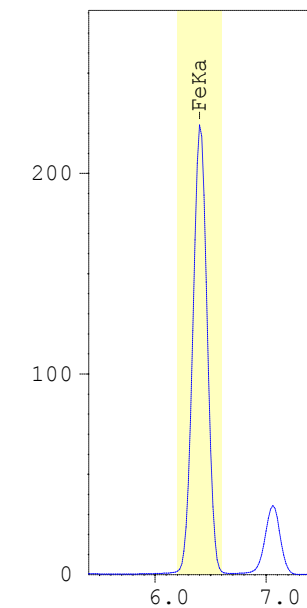
[cps/uA] Ca



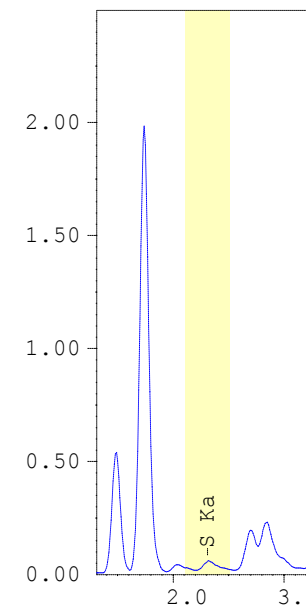
[cps/uA] Ti



[cps/uA] Fe



[cps/uA] S



CR-04		
Elementos	Valor	% cinza
Na2O (%)	0,129	0,036
MgO (%)	0,000	0,000
Al2O3 (%)	21,547	6,025
SiO2 (%)	39,660	11,090
P2O5 (%)	0,383	0,107
K2O (%)	1,308	0,366
CaO (%)	0,052	0,015
TiO2 (%)	1,027	0,287
Fe2O3 (%)	46,419	12,980
SO3 (%)	0,341	0,095
Total elem.	110,866	31,000
P.F (%)	69,000	
Total(%)		100,000

Quantitative Result

Analyte	Result
Na2O	0.129 %
MgO	ND %
Al2O3	21.547 %
SiO2	39.660 %
P2O5	0.383 %
K2O	1.308 %
CaO	0.052 %
TiO2	1.027 %
Fe2O3	46.419 %
SO3	0.341 %

Total elem. 31,000

Sample : CR-05
 Operator:
 Comment : Curva corrigida para o SO3
 Group : STD Cz Sid Americ c
 Date : 2018-12-21 14:45:31

Measurement Condition

 Instrument: EDX-7000 Atmosphere: Vac. Collimator: 5(mm) Sample Cup: Polypropylene

Analyte	TG kV	uA	FI	Acq. (keV)	Anal. (keV)	Time (sec)	DT (%)
Na	Rh 15	430-Auto	----	0 - 20	0.84- 1.24	Live- 100	29
Mg	Rh 15	430-Auto	----	0 - 20	1.05- 1.45	Live- 100	29
Al	Rh 15	430-Auto	----	0 - 20	1.29- 1.69	Live- 100	29
Si	Rh 15	430-Auto	----	0 - 20	1.54- 1.94	Live- 100	29
P	Rh 15	430-Auto	----	0 - 20	1.81- 2.21	Live- 100	29
K	Rh 15	430-Auto	----	0 - 20	3.11- 3.51	Live- 100	29
Ca	Rh 15	430-Auto	----	0 - 20	3.49- 3.89	Live- 100	29
Ti	Rh 50	76-Auto	----	0 - 40	4.30- 4.70	Live- 100	30
Fe	Rh 50	76-Auto	----	0 - 40	6.20- 6.60	Live- 100	30
S	Rh 15	430-Auto	----	0 - 20	2.11- 2.51	Live- 100	29

Qualitative Result

 Element: Na, Mg, Al, Si, P, K, Ca, Ti, Fe, S

Peak List

Channel	Line	keV	Net Int. (cps/uA)	
Na	NaKa	1.04	0.0047	QF
Mg	MgKa	1.25	0.0664	QF
Al	AlKa	1.49	6.6079	QF
Si	SiKa	1.74	33.6703	QF
P	P Ka	2.01	0.0168	QF
K	K Ka	3.31	7.0874	QF
Ca	CaKa	3.69	3.7189	QF
Ti	TiKa	4.50	9.8175	QF
Fe	FeKa	6.40	333.2012	QF
S	S Ka	2.31	3.0277	QF

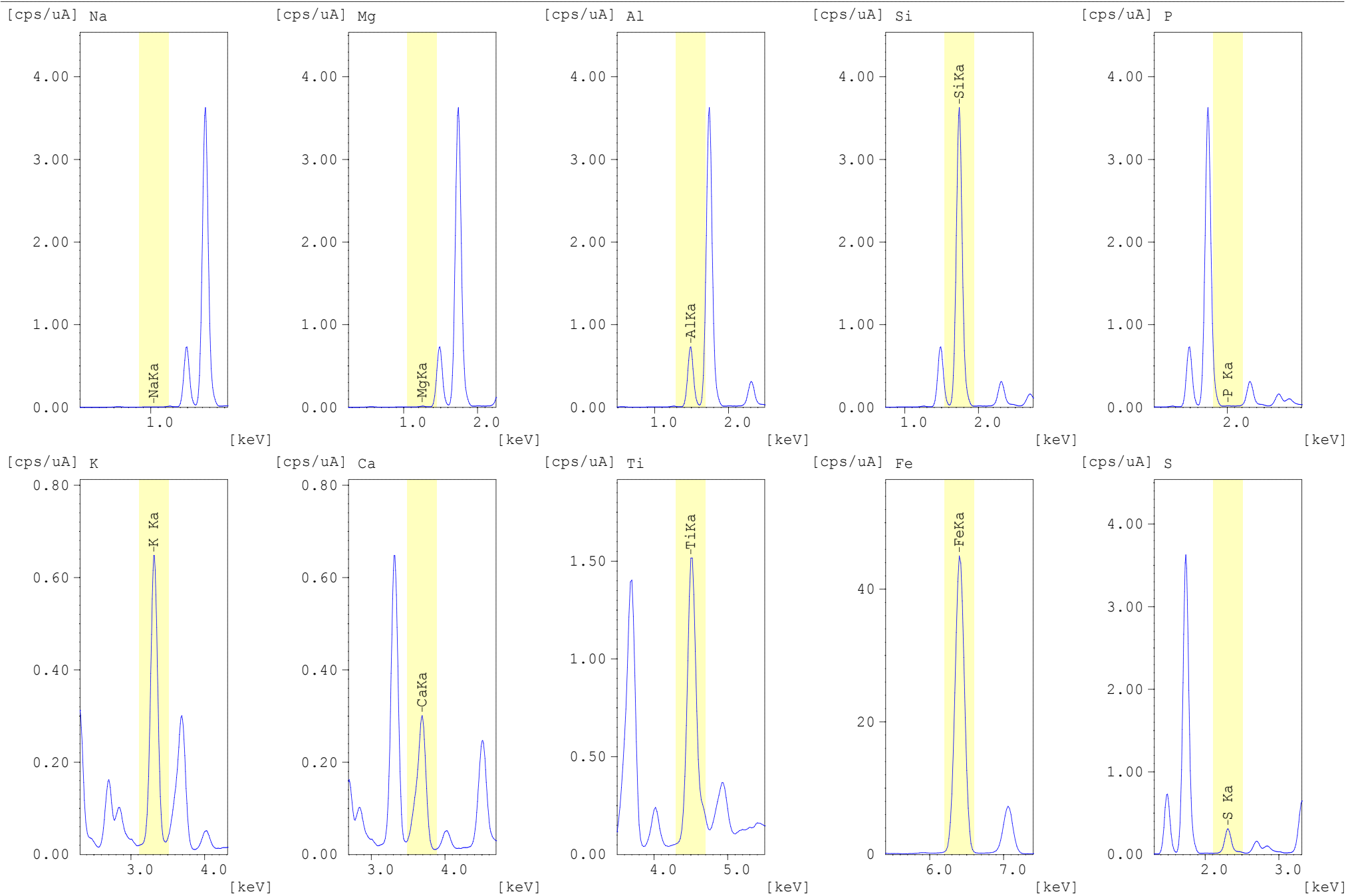
Quantitative Result

Analyte	Result	[3-sigma]	Proc.-Calc.	Line	Int. (cps/uA)
Na2O	0.461 %	[0.278]	Quan-EC	NaKa	0.0047
MgO	1.985 %	[0.301]	Quan-EC	MgKa	0.0664
Al2O3	24.206 %	[0.056]	Quan-EC	AlKa	6.6079
SiO2	70.948 %	[0.171]	Quan-EC	SiKa	33.6703
P2O5	0.003 %	[0.013]	Quan-EC	P Ka	0.0168
K2O	3.156 %	[0.017]	Quan-EC	K Ka	7.0874
CaO	1.380 %	[0.013]	Quan-EC	CaKa	3.7189
TiO2	0.781 %	[0.009]	Quan-EC	TiKa	9.8175
Fe2O3	9.337 %	[0.018]	Quan-EC	FeKa	333.2012
SO3	1.842 %	[0.016]	Quan-EC	S Ka	3.0277

Sample : CR-05
Operator:

Group : STD Cz Sid Americ c
Comment : Curva corrigida para o SO3

Date : 2018-12-21 14:45:31
01/01



CR-05		
Elementos	Valor	% cinza
Na2O (%)	0,461	0,213
MgO (%)	1,985	0,919
Al2O3 (%)	24,206	11,206
SiO2 (%)	70,948	32,844
P2O5 (%)	0,003	0,001
K2O (%)	3,156	1,461
CaO (%)	1,380	0,639
TiO2 (%)	0,781	0,362
Fe2O3 (%)	9,337	4,322
SO3 (%)	1,842	0,853
Total elem.	114,099	52,820
P.F (%)	47,180	
Total(%)		100,000

Quantitative Result

Analyte	Result
Na2O	0.461 %
MgO	1.985 %
Al2O3	24.206 %
SiO2	70.948 %
P2O5	0.003 %
K2O	3.156 %
CaO	1.380 %
TiO2	0.781 %
Fe2O3	9.337 %
SO3	1.842 %

Total elem. 52,820

Sample : CR-06
 Operator:
 Comment : Curva corrigida para o SO3
 Group : STD Cz Sid Americ c
 Date : 2018-12-21 14:51:02

Measurement Condition

 Instrument: EDX-7000 Atmosphere: Vac. Collimator: 5(mm) Sample Cup: Polypropylene

Analyte	TG kV	uA	FI	Acq. (keV)	Anal. (keV)	Time(sec)	DT(%)
Na	Rh 15	193-Auto	----	0 - 20	0.84- 1.24	Live- 100	30
Mg	Rh 15	193-Auto	----	0 - 20	1.05- 1.45	Live- 100	30
Al	Rh 15	193-Auto	----	0 - 20	1.29- 1.69	Live- 100	30
Si	Rh 15	193-Auto	----	0 - 20	1.54- 1.94	Live- 100	30
P	Rh 15	193-Auto	----	0 - 20	1.81- 2.21	Live- 100	30
K	Rh 15	193-Auto	----	0 - 20	3.11- 3.51	Live- 100	30
Ca	Rh 15	193-Auto	----	0 - 20	3.49- 3.89	Live- 100	30
Ti	Rh 50	28-Auto	----	0 - 40	4.30- 4.70	Live- 100	30
Fe	Rh 50	28-Auto	----	0 - 40	6.20- 6.60	Live- 100	30
S	Rh 15	193-Auto	----	0 - 20	2.11- 2.51	Live- 100	30

Qualitative Result

 Element: Na, Mg, Al, Si, P, K, Ca, Ti, Fe, S

Peak List

Channel	Line	keV	Net Int. (cps/uA)	
Na	NaKa	1.04	0.0000	QF
Mg	MgKa	1.25	0.0149	QF
Al	AlKa	1.49	4.5364	QF
Si	SiKa	1.74	16.3082	QF
P	P Ka	2.01	0.1810	QF
K	K Ka	3.31	3.0811	QF
Ca	CaKa	3.69	0.6226	QF
Ti	TiKa	4.50	14.3450	QF
Fe	FeKa	6.40	1708.1094	QF
S	S Ka	2.31	0.3684	QF

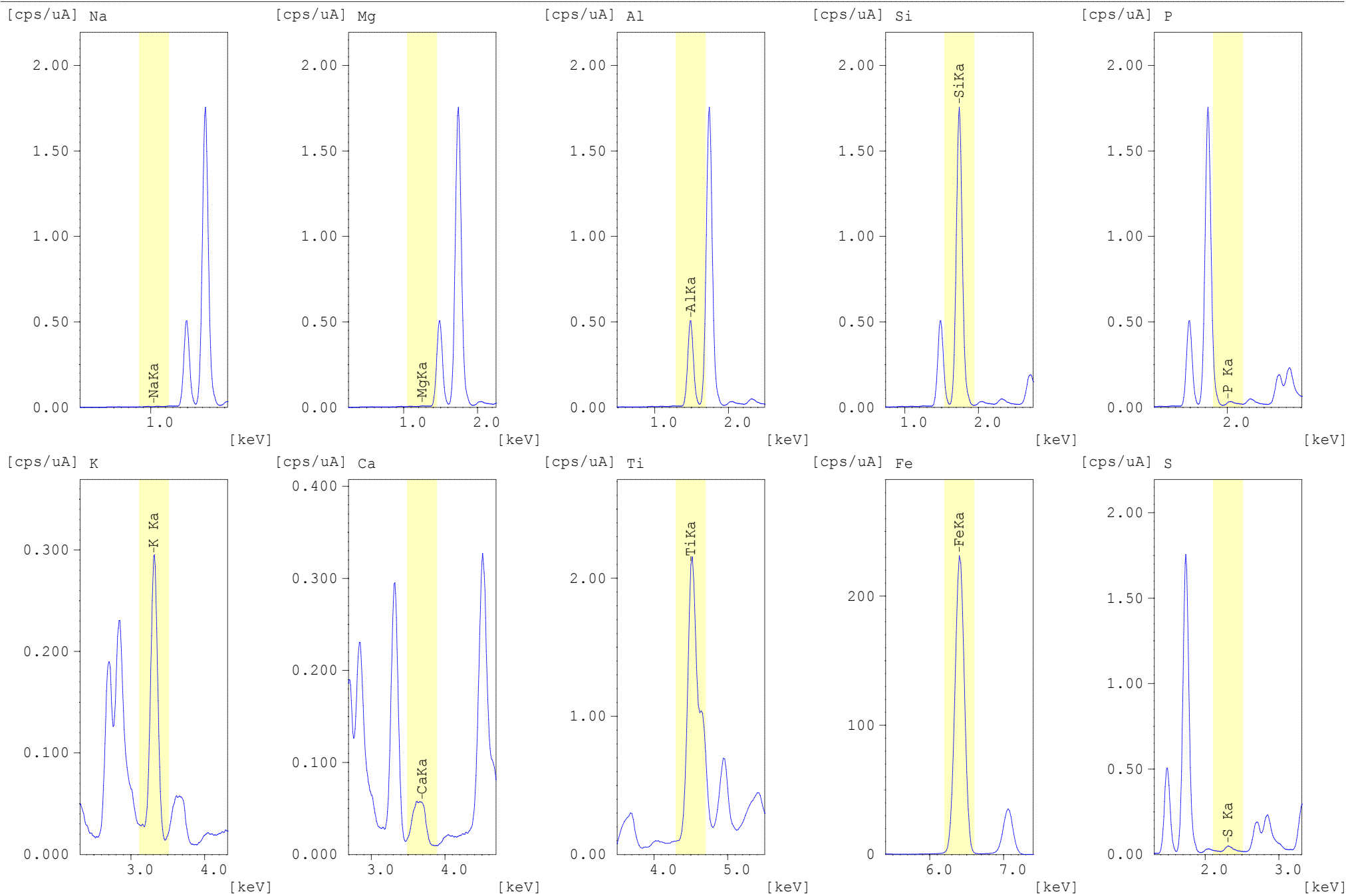
Quantitative Result

Analyte	Result	[3-sigma]	Proc.-Calc.	Line	Int. (cps/uA)
Na2O	0.129 %	[0.422]	Quan-EC	NaKa	0.0000
MgO	ND %	[0.371]	Quan-EC	MgKa	0.0149
Al2O3	21.128 %	[0.069]	Quan-EC	AlKa	4.5364
SiO2	35.680 %	[0.178]	Quan-EC	SiKa	16.3082
P2O5	0.274 %	[0.024]	Quan-EC	P Ka	0.1810
K2O	1.396 %	[0.018]	Quan-EC	K Ka	3.0811
CaO	0.057 %	[0.010]	Quan-EC	CaKa	0.6226
TiO2	1.147 %	[0.019]	Quan-EC	TiKa	14.3450
Fe2O3	47.906 %	[0.065]	Quan-EC	FeKa	1708.1094
SO3	0.287 %	[0.011]	Quan-EC	S Ka	0.3684

Sample : CR-06
Operator:

Group : STD Cz Sid Americ c
Comment : Curva corrigida para o SO3

Date : 2018-12-21 14:51:02
01/01



CR-06		
Elementos	Valor	% cinza
Na2O (%)	0,129	0,025
MgO (%)	0,000	0,000
Al2O3 (%)	21,128	4,159
SiO2 (%)	35,680	7,023
P2O5 (%)	0,274	0,054
K2O (%)	1,396	0,275
CaO (%)	0,057	0,011
TiO2 (%)	1,147	0,226
Fe2O3 (%)	47,906	9,430
SO3 (%)	0,287	0,056
Total elem.	108,004	21,260
P.F (%)	78,740	
Total(%)		100,000

Quantitative Result

Analyte	Result
Na2O	0.129 %
MgO	ND %
Al2O3	21.128 %
SiO2	35.680 %
P2O5	0.274 %
K2O	1.396 %
CaO	0.057 %
TiO2	1.147 %
Fe2O3	47.906 %
SO3	0.287 %

Total elem. 21,260

Sample : CR-07
 Operator:
 Comment : Curva corrigida para o SO3
 Group : STD Cz Sid Americ c
 Date : 2018-12-21 14:56:39

Measurement Condition

Instrument: EDX-7000 Atmosphere: Vac. Collimator: 5(mm) Sample Cup: Polypropylene

Analyte	TG kV	uA	FI	Acq. (keV)	Anal. (keV)	Time(sec)	DT(%)
Na	Rh 15	430-Auto	----	0 - 20	0.84- 1.24	Live- 100	29
Mg	Rh 15	430-Auto	----	0 - 20	1.05- 1.45	Live- 100	29
Al	Rh 15	430-Auto	----	0 - 20	1.29- 1.69	Live- 100	29
Si	Rh 15	430-Auto	----	0 - 20	1.54- 1.94	Live- 100	29
P	Rh 15	430-Auto	----	0 - 20	1.81- 2.21	Live- 100	29
K	Rh 15	430-Auto	----	0 - 20	3.11- 3.51	Live- 100	29
Ca	Rh 15	430-Auto	----	0 - 20	3.49- 3.89	Live- 100	29
Ti	Rh 50	76-Auto	----	0 - 40	4.30- 4.70	Live- 100	30
Fe	Rh 50	76-Auto	----	0 - 40	6.20- 6.60	Live- 100	30
S	Rh 15	430-Auto	----	0 - 20	2.11- 2.51	Live- 100	29

Qualitative Result

Element: Na, Mg, Al, Si, P, K, Ca, Ti, Fe, S

Peak List

Channel	Line	keV	Net Int. (cps/uA)	
Na	NaKa	1.04	0.0082	QF
Mg	MgKa	1.25	0.0588	QF
Al	AlKa	1.49	5.9794	QF
Si	SiKa	1.74	31.0754	QF
P	P Ka	2.01	0.0070	QF
K	K Ka	3.31	6.8909	QF
Ca	CaKa	3.69	3.5500	QF
Ti	TiKa	4.50	9.7607	QF
Fe	FeKa	6.40	377.5315	QF
S	S Ka	2.31	2.6938	QF

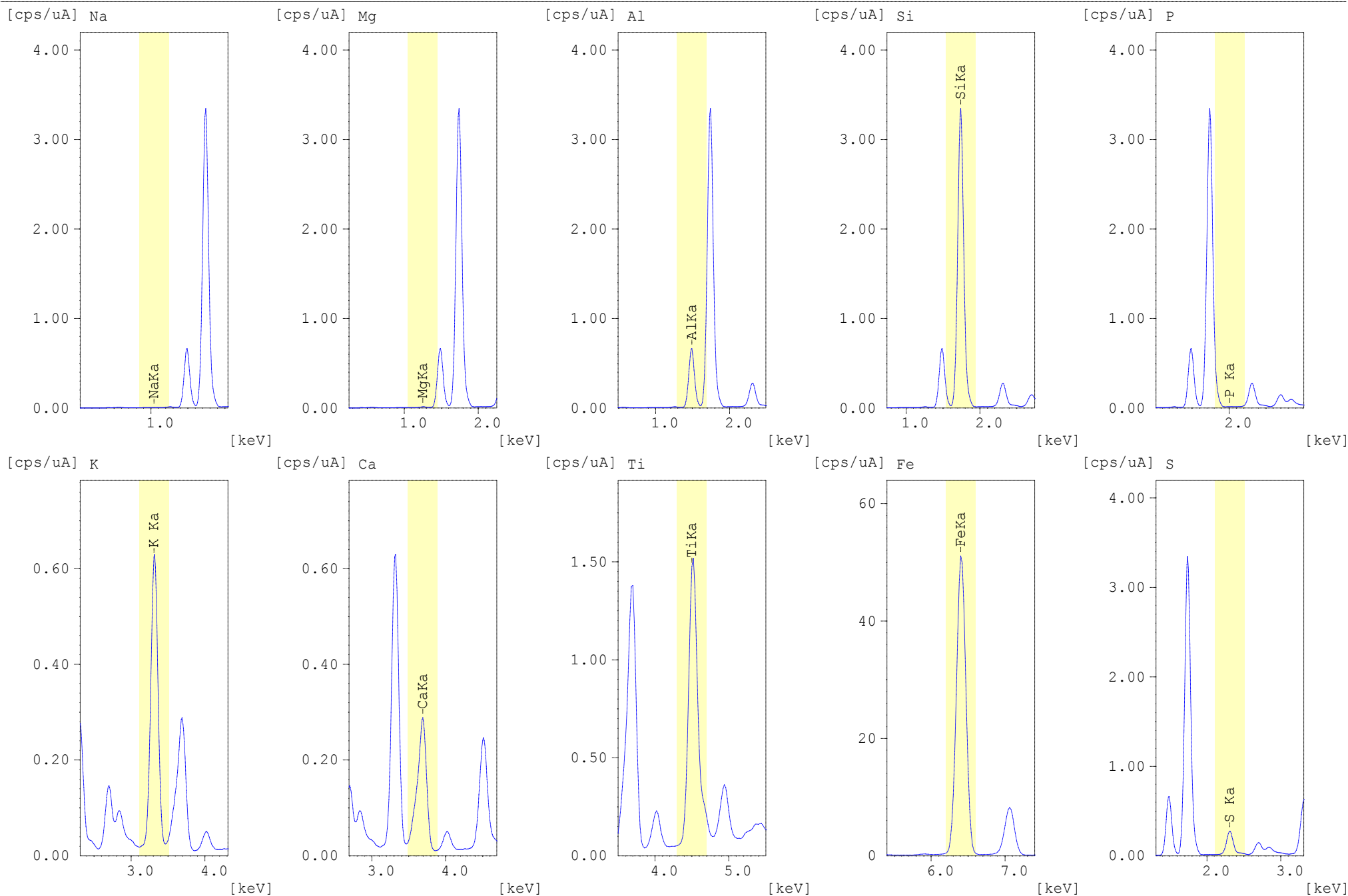
Quantitative Result

Analyte	Result	[3-sigma]	Proc.-Calc.	Line	Int. (cps/uA)
Na2O	0.711 %	[0.282]	Quan-EC	NaKa	0.0082
MgO	1.564 %	[0.287]	Quan-EC	MgKa	0.0588
Al2O3	23.272 %	[0.053]	Quan-EC	AlKa	5.9794
SiO2	65.677 %	[0.164]	Quan-EC	SiKa	31.0754
P2O5	ND %	[0.012]	Quan-EC	P Ka	0.0070
K2O	3.069 %	[0.017]	Quan-EC	K Ka	6.8909
CaO	1.308 %	[0.013]	Quan-EC	CaKa	3.5500
TiO2	0.777 %	[0.009]	Quan-EC	TiKa	9.7607
Fe2O3	10.580 %	[0.019]	Quan-EC	FeKa	377.5315
SO3	1.647 %	[0.015]	Quan-EC	S Ka	2.6938

Sample : CR-07
Operator:

Group : STD Cz Sid Americ c
Comment : Curva corrigida para o SO3

Date : 2018-12-21 14:56:39
01/01



CR-07		
Elementos	Valor	% cinza
Na2O (%)	0,711	0,318
MgO (%)	1,564	0,700
Al2O3 (%)	23,272	10,423
SiO2 (%)	65,677	29,414
P2O5 (%)	0,000	0,000
K2O (%)	3,069	1,374
CaO (%)	1,308	0,586
TiO2 (%)	0,777	0,348
Fe2O3 (%)	10,580	4,738
SO3 (%)	1,647	0,738
Total elem.	108,605	48,640
P.F (%)	51,360	
Total(%)		100,000

Quantitative Result

Analyte	Result
Na2O	0.711 %
MgO	1.564 %
Al2O3	23.272 %
SiO2	65.677 %
P2O5	ND %
K2O	3.069 %
CaO	1.308 %
TiO2	0.777 %
Fe2O3	10.580 %
SO3	1.647 %

Total elem. 48,640

ANEXO 4

Material amostrado lavado na fração <1,35

Relatórios da determinação da Análise Química das cinzas por espectrometria de fluorescência de raios X e espectrometria de absorção atômica

Criciúma, 23 de Abril de 2019.

À , José Ricardo lemes de Almeida

Cliente: COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA

RELATÓRIO DE ANÁLISE Nº 1832/2019

DETERMINAÇÃO DA ANÁLISE QUÍMICA POR ESPECTROMETRIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X E ESPECTROMETRIA DE ABSORÇÃO ATÔMICA

Informamos através desta os resultados da análise química (FRX Semi-Quantitativo) solicitada:

Descrição da amostra: CR – 1 (<1,35)

Quantitative Result

Analyte	Result	[3-sigma]	Proc.-Calc.	Line	Int. (cps/uA)
Na2O	0.664 %	[0.286]	Quan-EC	NaKa	0.0076
MgO	0.343 %	[0.243]	Quan-EC	MgKa	0.0366
Al2O3	23.025 %	[0.047]	Quan-EC	AlKa	5.8129
SiO2	45.333 %	[0.122]	Quan-EC	SiKa	21.0599
P2O5	0.409 %	[0.018]	Quan-EC	P Ka	0.2630
K2O	2.264 %	[0.013]	Quan-EC	K Ka	5.0563
CaO	0.440 %	[0.008]	Quan-EC	CaKa	1.5176
TiO2	1.674 %	[0.013]	Quan-EC	TiKa	20.8746
Fe2O3	4.759 %	[0.013]	Quan-EC	FeKa	170.0123
SO3	0.657 %	[0.011]	Quan-EC	S Ka	1.0009

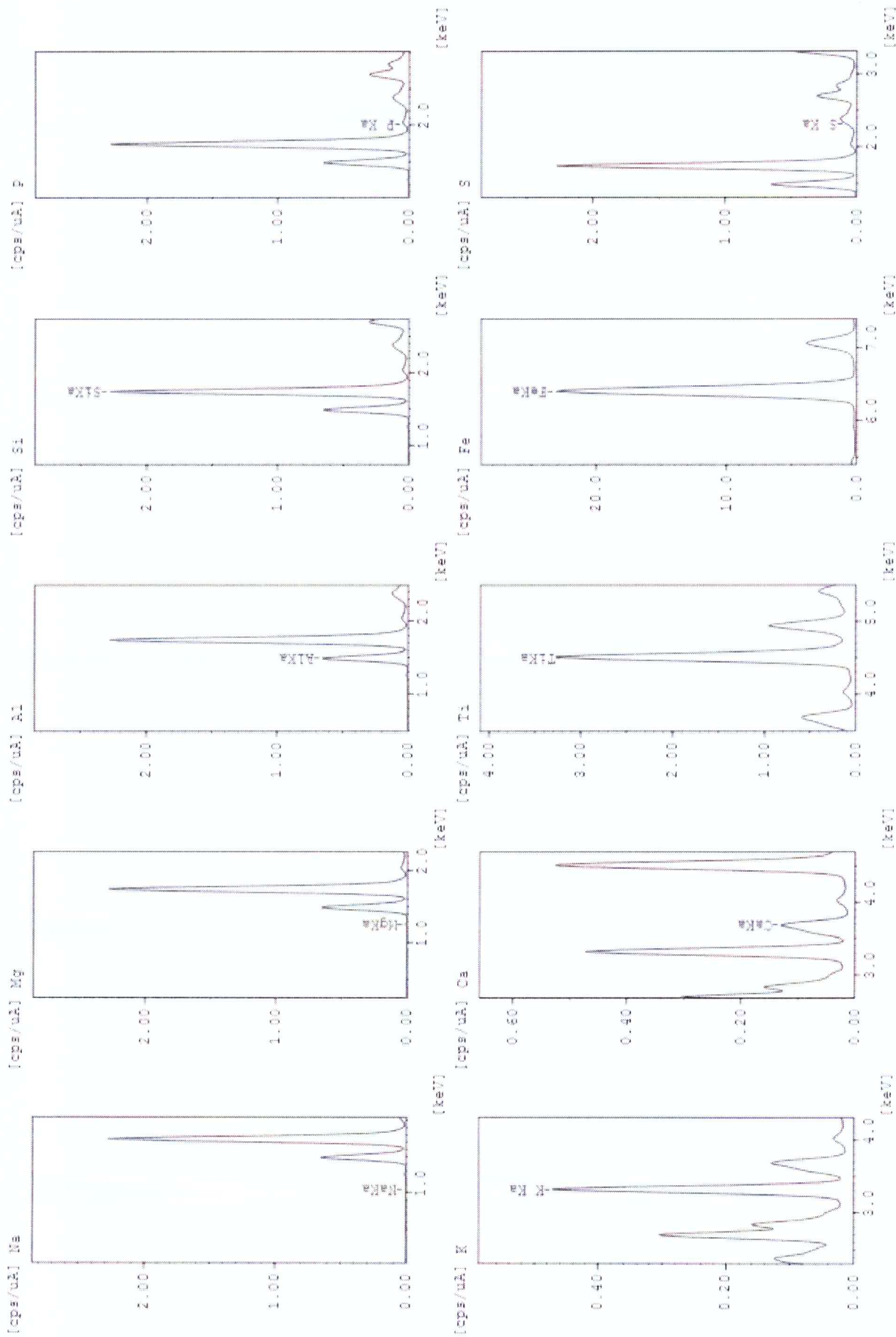


Elementos	% Cinza
Na ₂ O (%)	0,83
MgO (%)	0,43
Al ₂ O ₃ (%)	28,94
SiO ₂ (%)	56,97
P ₂ O ₅ (%)	0,51
K ₂ O (%)	2,85
CaO (%)	0,55
TiO ₂ (%)	2,10
Fe ₂ O ₃ (%)	5,98
SO ₃ (%)	0,83
Total Cinza (%)	100,00

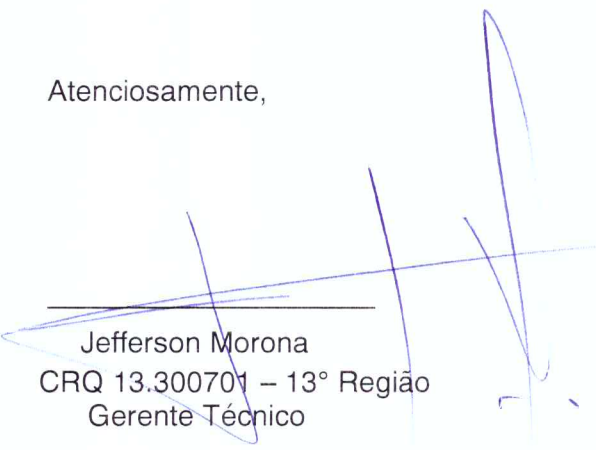


SATC
Centro Tecnológico

LABSATC
Laboratório



Atenciosamente,



Jefferson Morona
CRQ 13.300701 – 13° Região
Gerente Técnico

Criciúma, 23 de Abril de 2019.

À , José Ricardo lemes de Almeida

Cliente: COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA

RELATÓRIO DE ANÁLISE Nº 1834/2019

DETERMINAÇÃO DA ANÁLISE QUÍMICA POR ESPECTROMETRIA DE FLUORESCÊNCIA DE
 RAIOS X

E ESPECTROMETRIA DE ABSORÇÃO ATÔMICA

Informamos através desta os resultados da análise química (FRX Semi-Quantitativo) solicitada:

Descrição da amostra: CR – 2 (<1,35)

Quantitative Result

Analyte	Result	[3-sigma]	Proc.-Calc.	Line	Int. (cps/uA)
Na2O	0.738 %	[0.289]	Quan-EC	NaKa	0.0086
MgO	0.662 %	[0.271]	Quan-EC	MgKa	0.0424
Al2O3	22.926 %	[0.090]	Quan-EC	AlKa	5.7466
SiO2	52.649 %	[0.141]	Quan-EC	SiKa	24.6619
P2O5	0.290 %	[0.018]	Quan-EC	P Ka	0.1909
K2O	2.219 %	[0.014]	Quan-EC	K Ka	4.9546
CaO	1.478 %	[0.013]	Quan-EC	CaKa	3.9477
TiO2	2.018 %	[0.015]	Quan-EC	TiKa	25.1355
Fe2O3	7.203 %	[0.016]	Quan-EC	FeKa	257.1183
SO3	1.330 %	[0.014]	Quan-EC	S Ka	2.1518

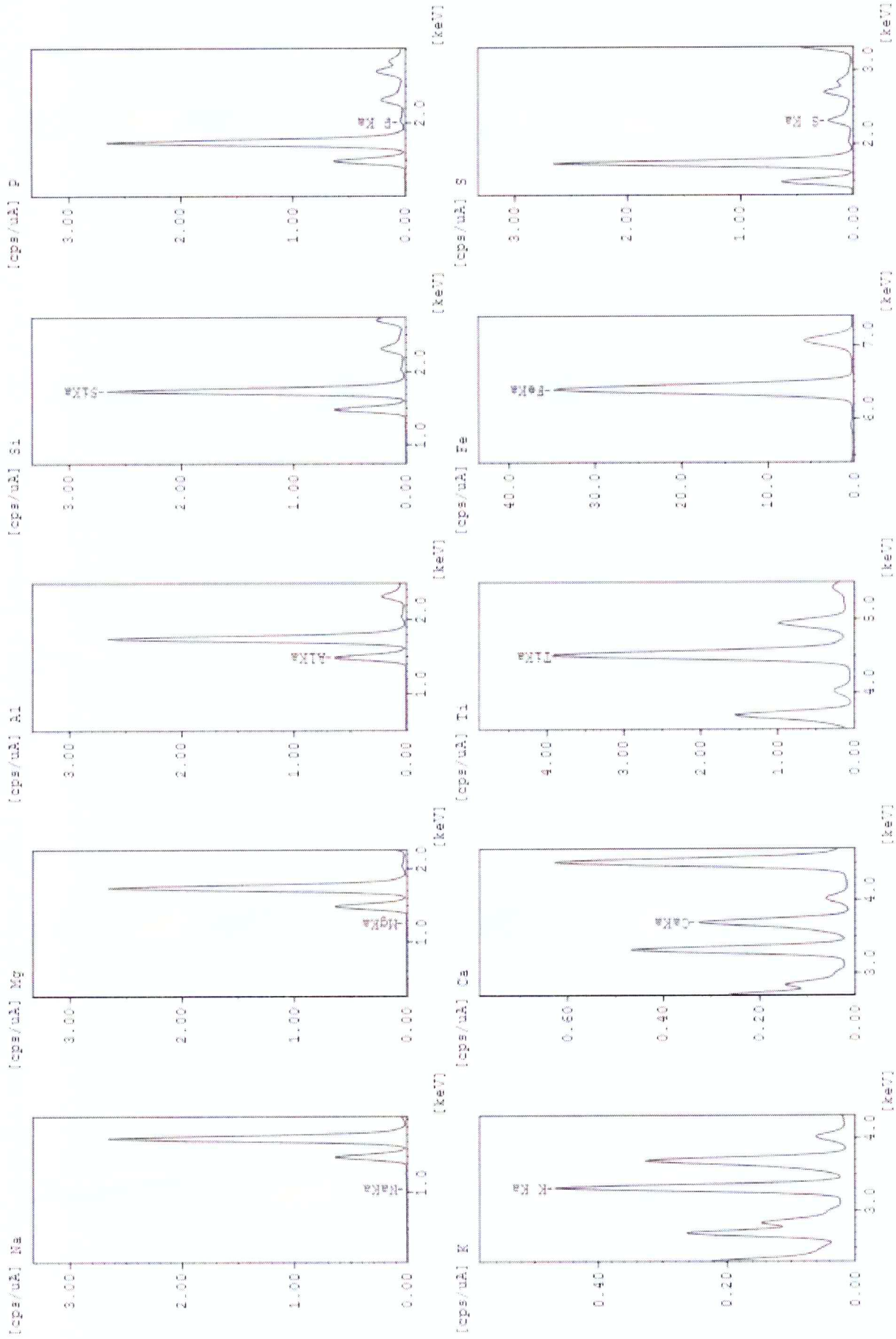


Elementos	% Cinza
Na ₂ O (%)	0,81
MgO (%)	0,72
Al ₂ O ₃ (%)	25,05
SiO ₂ (%)	57,53
P ₂ O ₅ (%)	0,32
K ₂ O (%)	2,42
CaO (%)	1,62
TiO ₂ (%)	2,21
Fe ₂ O ₃ (%)	7,87
SO ₃ (%)	1,45
Total Cinza (%)	100,00



SATC
Centro Tecnológico

LABSATC
Laboratório





SATC
Centro Tecnológico

LABSATC
Laboratório

Atenciosamente,

Jefferson Morona
CRQ 13.300701 – 13ª Região
Gerente Técnico

Criciúma, 23 de Abril de 2019.

À , José Ricardo lemes de Almeida

Cliente: COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA

RELATÓRIO DE ANÁLISE Nº 1835/2019

DETERMINAÇÃO DA ANÁLISE QUÍMICA POR ESPECTROMETRIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X E ESPECTROMETRIA DE ABSORÇÃO ATÔMICA

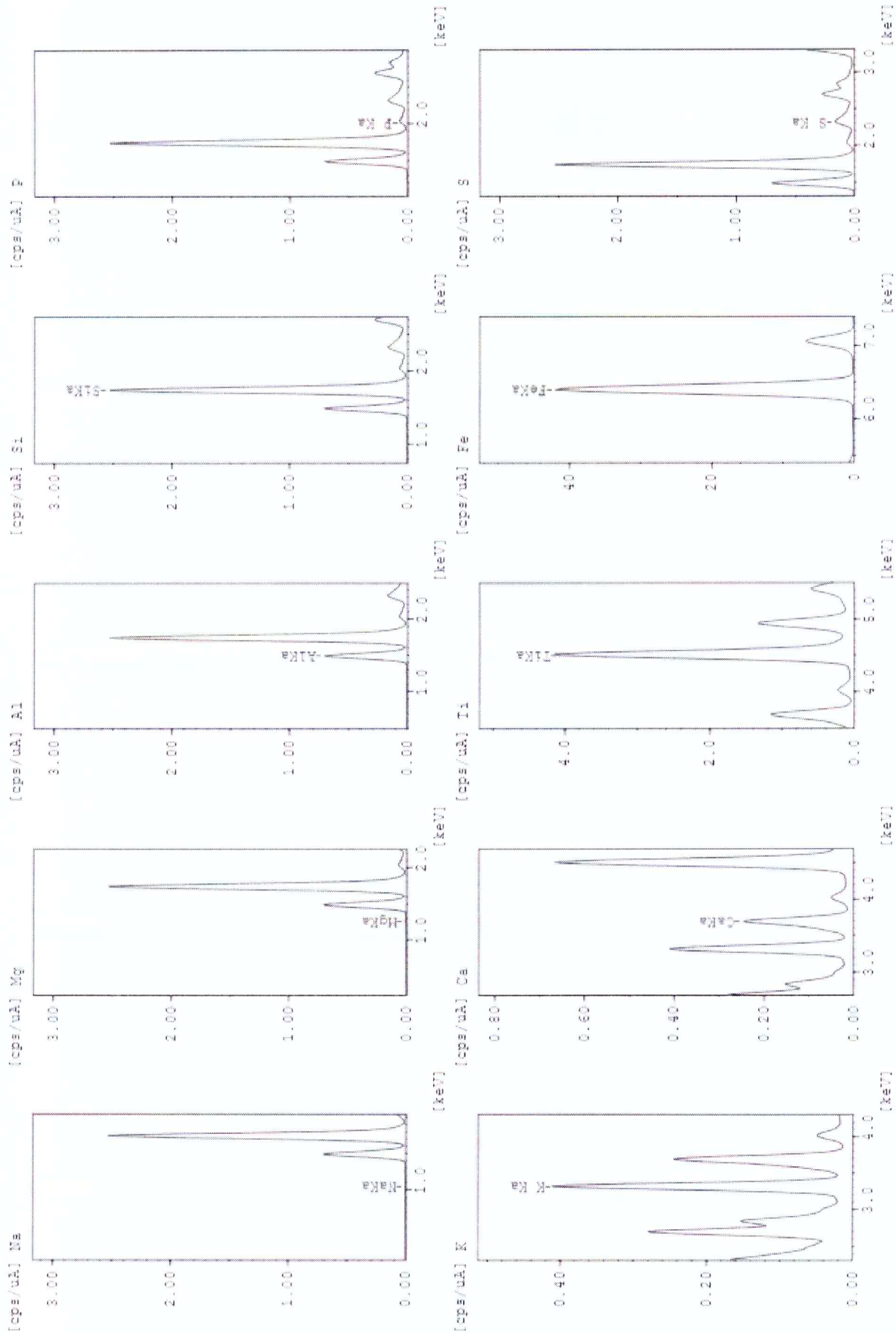
Informamos através desta os resultados da análise química (FRX Semi-Quantitativo) solicitada:

Descrição da amostra: CR – 3 (<1,35)

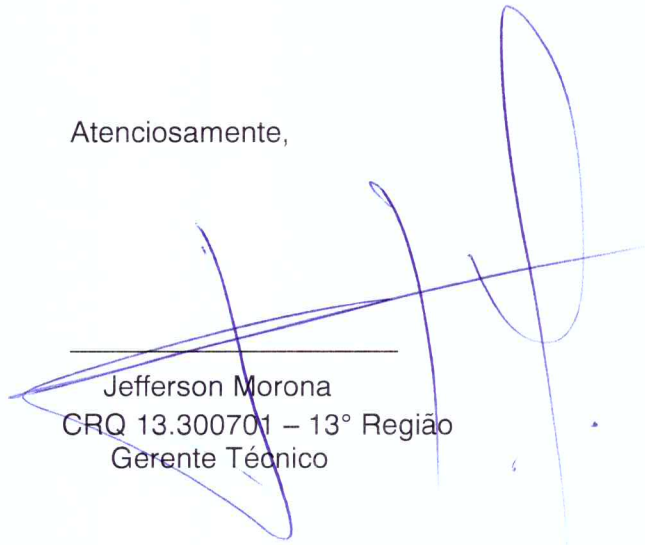
Quantitative Result

Analyte	Result	[3-sigma]	Proc.-Calc.	Line	Int. (cps/uA)
Na2O	0.436 %	[0.307]	Quan-EC	NaKa	0.0048
MgO	ND %	[0.276]	Quan-EC	MgKa	0.0284
Al2O3	23.742 %	[0.054]	Quan-EC	AlKa	6.2957
SiO2	50.108 %	[0.143]	Quan-EC	SiKa	23.4107
P2O5	0.631 %	[0.023]	Quan-EC	P Ka	0.3980
K2O	1.940 %	[0.014]	Quan-EC	K Ka	4.3198
CaO	1.064 %	[0.012]	Quan-EC	CaKa	2.9778
TiO2	2.146 %	[0.016]	Quan-EC	TiKa	26.7179
Fe2O3	8.682 %	[0.019]	Quan-EC	FeKa	309.8558
SO3	1.020 %	[0.014]	Quan-EC	S Ka	1.8222

Elementos	% Cinza
Na ₂ O (%)	0,49
MgO (%)	0,00
Al ₂ O ₃ (%)	26,45
SiO ₂ (%)	55,82
P ₂ O ₅ (%)	0,70
K ₂ O (%)	2,16
CaO (%)	1,19
TiO ₂ (%)	2,39
Fe ₂ O ₃ (%)	9,67
SO ₃ (%)	1,14
Total Cinza (%)	100,00



Atenciosamente,



Jefferson Morona
CRQ 13.300701 – 13° Região
Gerente Técnico

Criciúma, 25 de Abril de 2019.

À , José Ricardo lemes de Almeida

Cliente: COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA

RELATÓRIO DE ANÁLISE Nº 1836/2019

DETERMINAÇÃO DA ANÁLISE QUÍMICA POR ESPECTROMETRIA DE FLUORESCÊNCIA DE
RAIOS X

E ESPECTROMETRIA DE ABSORÇÃO ATÔMICA

Informamos através desta os resultados da análise química (FRX Semi-Quantitativo) solicitada:

Descrição da amostra: CR – 4 (<1,35)

Quantitative Result

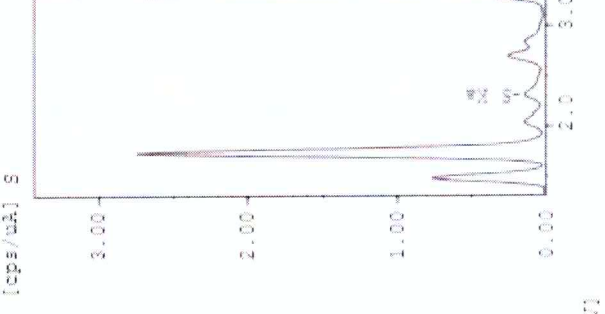
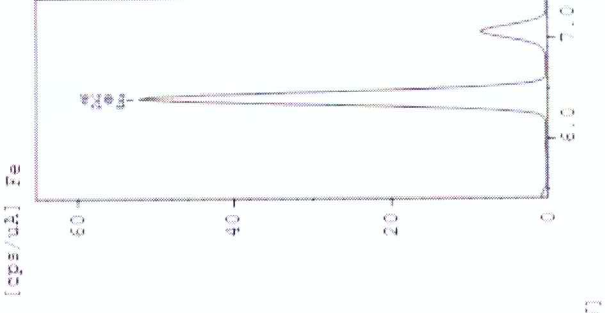
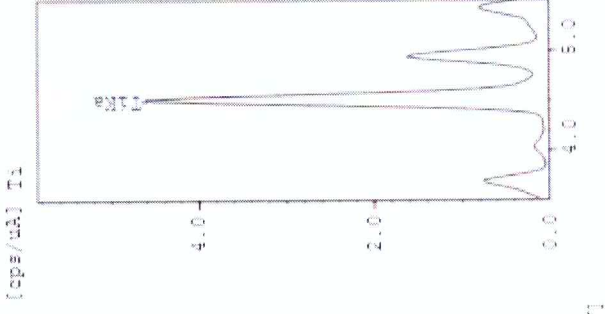
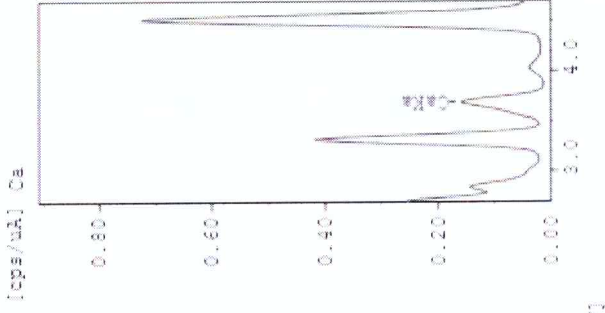
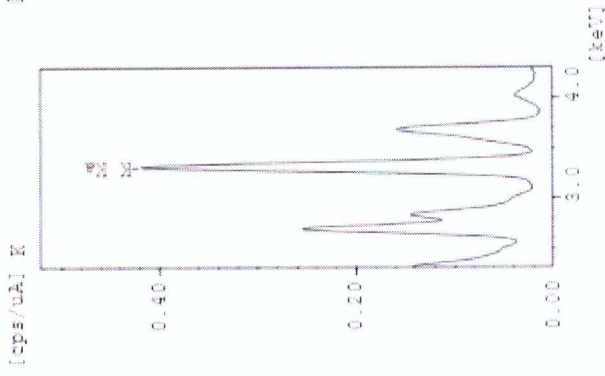
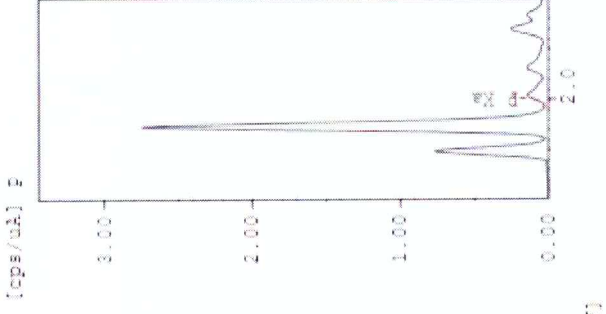
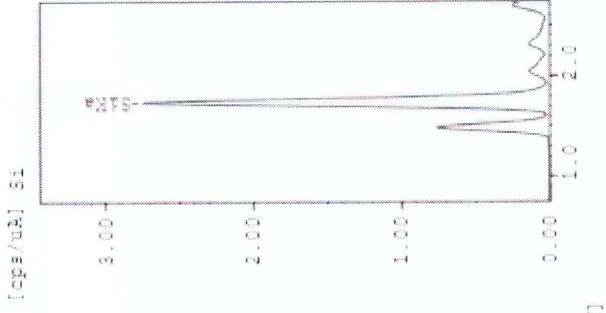
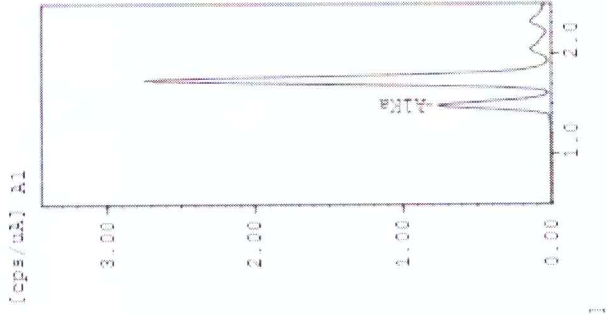
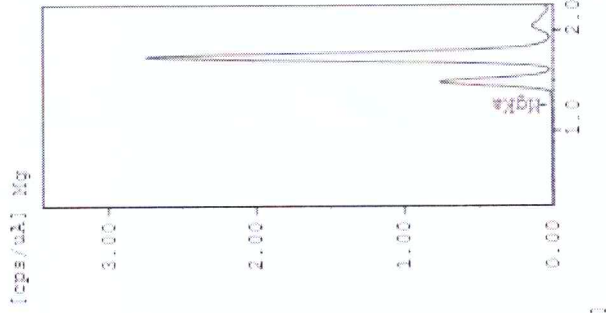
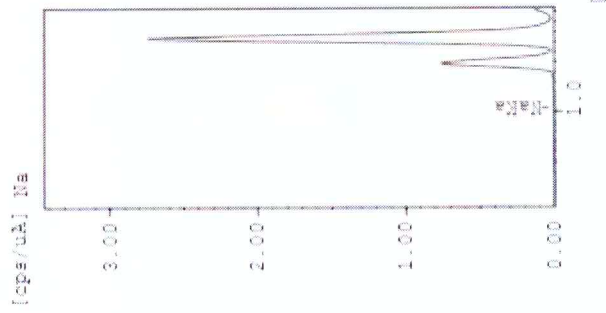
Analyte	Result	[3-sigma]	Proc.-Calc.	Line	Int. (cps/uA)
Na2O	0.877 %	[0.303]	Quan-EC	NaKa	0.0106
MgO	ND	[0.293]	Quan-EC	MgKa	0.0196
Al2O3	24.433 %	[0.057]	Quan-EC	AlKa	6.7949
SiO2	53.946 %	[0.149]	Quan-EC	SiKa	25.2509
P2O5	1.895 %	[0.033]	Quan-EC	P Ka	1.1659
K2O	1.994 %	[0.014]	Quan-EC	K Ka	4.4416
CaO	0.622 %	[0.010]	Quan-EC	CaKa	1.9433
TiO2	2.374 %	[0.018]	Quan-EC	TiKa	29.5534
Fe2O3	10.805 %	[0.022]	Quan-EC	FeKa	385.5512
SO3	0.798 %	[0.012]	Quan-EC	S Ka	1.2431

Elementos	% Cinza
Na ₂ O (%)	0,90
MgO (%)	0,00
Al ₂ O ₃ (%)	25,06
SiO ₂ (%)	55,12
P ₂ O ₅ (%)	1,94
K ₂ O (%)	2,04
CaO (%)	0,64
TiO ₂ (%)	2,43
Fe ₂ O ₃ (%)	11,06
SO ₃ (%)	0,82
Total Cinza (%)	100,00

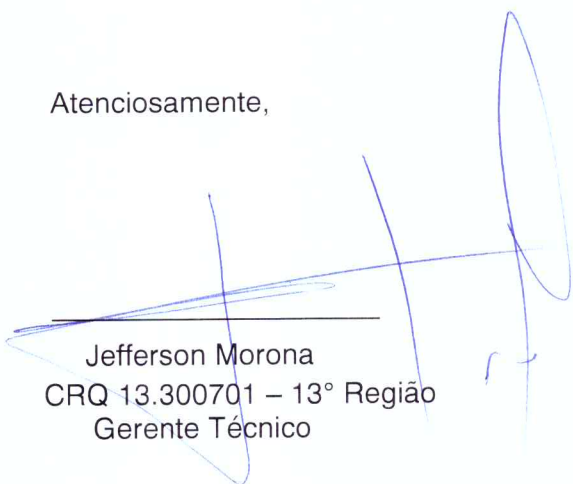


SATC
Centro Tecnológico

LABSATC
Laboratório



Atenciosamente,



Jefferson Morona
CRQ 13.300701 – 13° Região
Gerente Técnico

Criciúma, 25 de Abril de 2019.

À , José Ricardo lemes de Almeida

Cliente: COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA

RELATÓRIO DE ANÁLISE Nº 1837/2019

DETERMINAÇÃO DA ANÁLISE QUÍMICA POR ESPECTROMETRIA DE FLUORESCÊNCIA DE
 RAIOS X

E ESPECTROMETRIA DE ABSORÇÃO ATÔMICA

Informamos através desta os resultados da análise química (FRX Semi-Quantitativo) solicitada:

Descrição da amostra: CR – 5 (<1,35)

Quantitative Result

Analyte	Result	[3-sigma]	Proc.-Calc.	Line	Int. (cps/uA)
Na2O	0.487 %	[0.327]	Quan-EC	NaKa	0.0051
MgO	ND %	[0.279]	Quan-EC	MgKa	0.0229
Al2O3	19.957 %	[0.045]	Quan-EC	AlKa	3.7478
SiO2	46.605 %	[0.146]	Quan-EC	SiKa	21.6862
P2O5	0.220 %	[0.019]	Quan-EC	P Ka	0.1486
K2O	1.986 %	[0.015]	Quan-EC	K Ka	4.4237
CaO	1.277 %	[0.013]	Quan-EC	CaKa	3.4757
TiO2	2.271 %	[0.017]	Quan-EC	TiKa	28.2762
Fe2O3	11.883 %	[0.022]	Quan-EC	FeKa	423.9694
SO3	1.921 %	[0.018]	Quan-EC	S Ka	3.1622



SATC
Centro Tecnológico

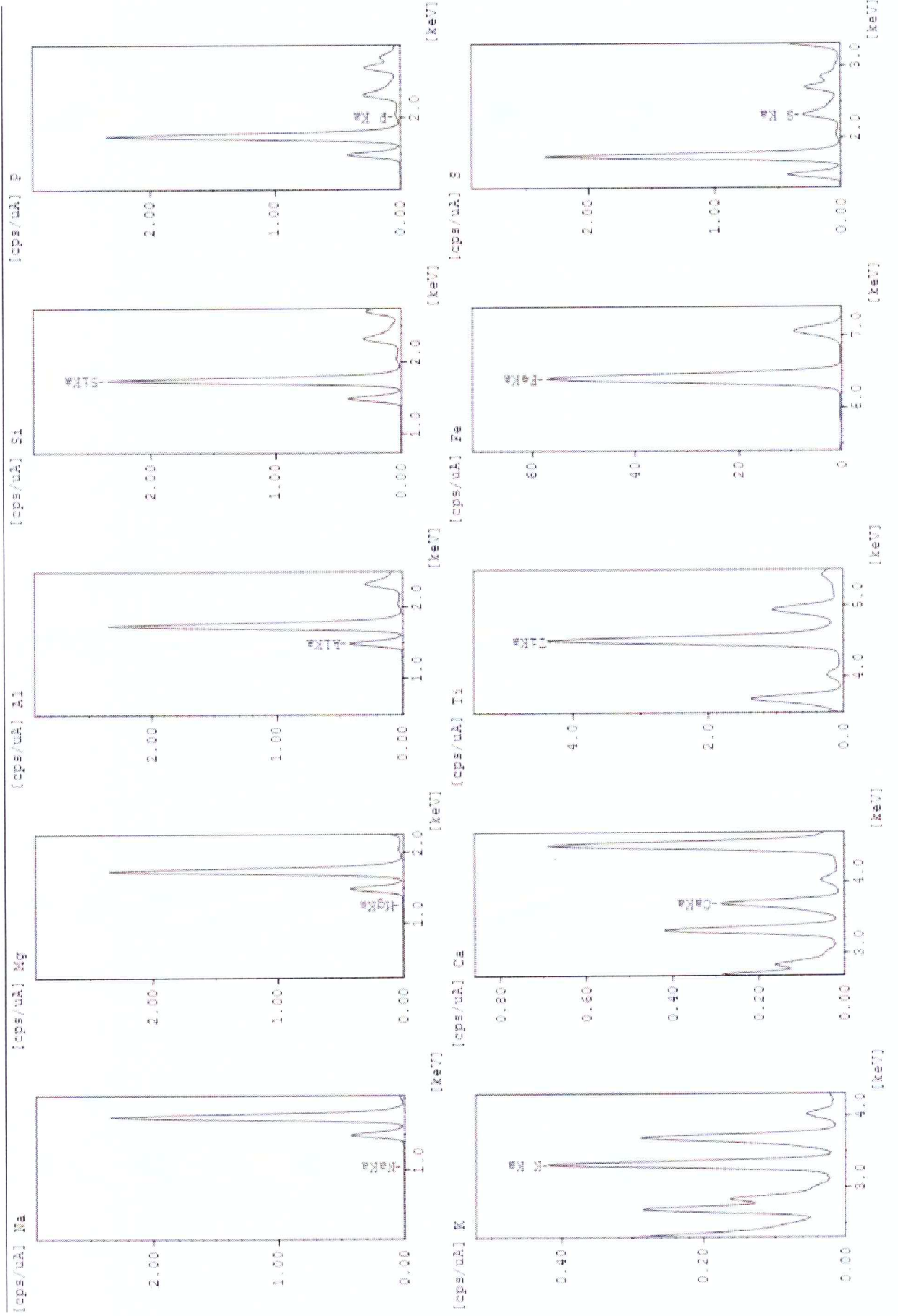
LABSATC
Laboratório

Elementos	% Cinza
Na ₂ O (%)	0,56
MgO (%)	0,00
Al ₂ O ₃ (%)	23,04
SiO ₂ (%)	53,81
P ₂ O ₅ (%)	0,25
K ₂ O (%)	2,29
CaO (%)	1,47
TiO ₂ (%)	2,62
Fe ₂ O ₃ (%)	13,72
SO ₃ (%)	2,22
Total Cinza (%)	100,00



SATC
Centro Tecnológico

LABSATC
Laboratório





SATC
Centro Tecnológico

LABSATC
Laboratório

Atenciosamente,

Jefferson Morona
CRQ 13.300701 – 13ª Região
Gerente Técnico

Criciúma, 25 de Abril de 2019.

À , José Ricardo lemes de Almeida

Cliente: COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA

RELATÓRIO DE ANÁLISE Nº 1838/2019

DETERMINAÇÃO DA ANÁLISE QUÍMICA POR ESPECTROMETRIA DE FLUORESCÊNCIA DE
RAIOS X

E ESPECTROMETRIA DE ABSORÇÃO ATÔMICA

Informamos através desta os resultados da análise química (FRX Semi-Quantitativo) solicitada:

Descrição da amostra: CR – 6 (<1,35)

Quantitative Result

Analyte	Result	[3-sigma]	Proc.-Calc.	Line	Int. (cps/uA)
Na2O	0.626	[0.334]	Quan-EC	NaKa	0.0070
MgO	ND	[0.289]	Quan-EC	MgKa	0.0224
Al2O3	22.911	[0.056]	Quan-EC	AlKa	5.7367
SiO2	44.211	[0.144]	Quan-EC	SiKa	20.5078
P2O5	0.594	[0.024]	Quan-EC	P Ka	0.3757
K2O	1.721	[0.014]	Quan-EC	K Ka	3.8204
CaO	0.302	[0.009]	Quan-EC	CaKa	1.1962
TiO2	1.637	[0.015]	Quan-EC	TiKa	20.4126
Fe2O3	14.573	[0.026]	Quan-EC	FeKa	519.8589
SO3	0.954	[0.014]	Quan-EC	S Ka	1.5096

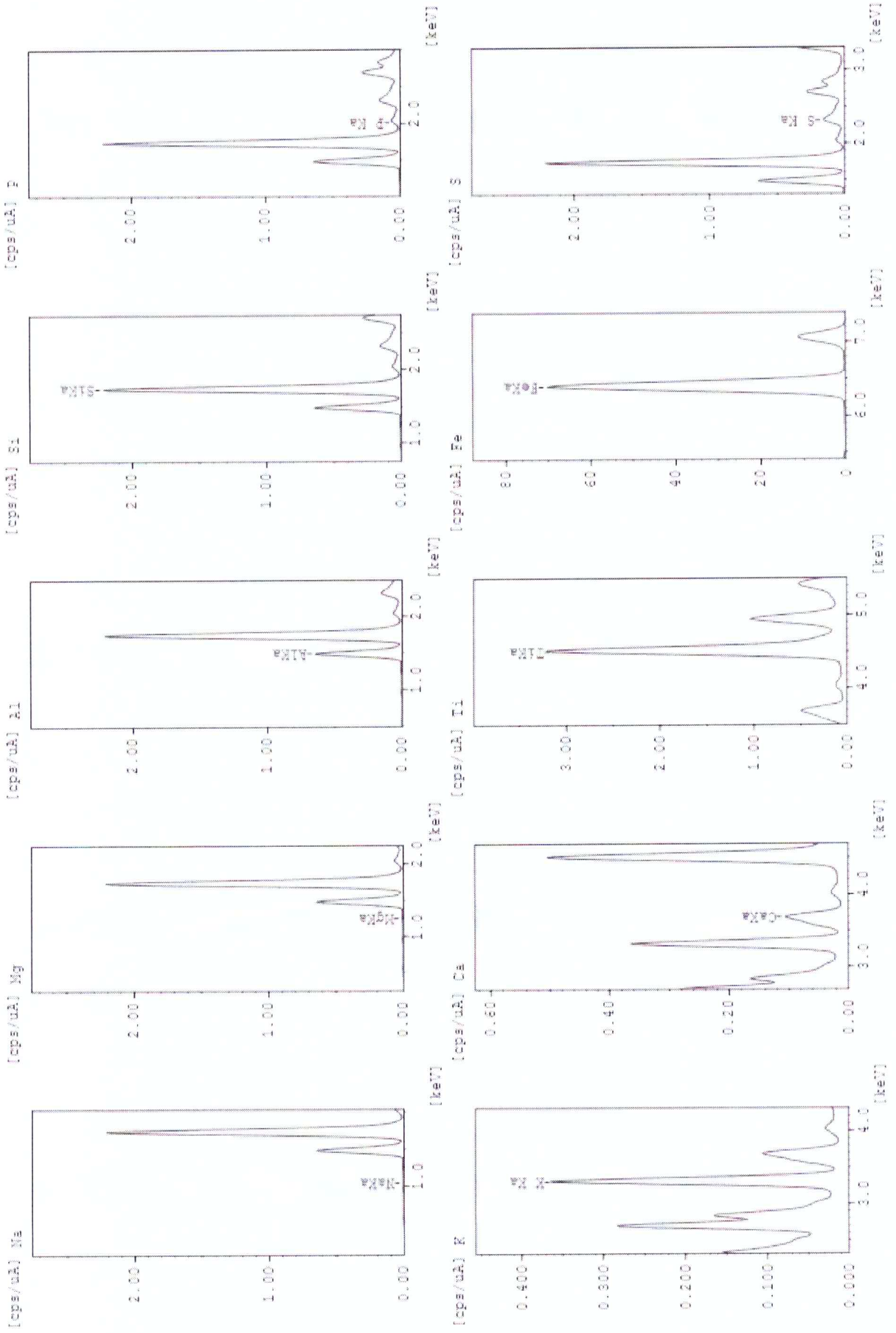


Elementos	% Cinza
Na ₂ O (%)	0,72
MgO (%)	0,00
Al ₂ O ₃ (%)	26,18
SiO ₂ (%)	50,51
P ₂ O ₅ (%)	0,68
K ₂ O (%)	1,97
CaO (%)	0,35
TiO ₂ (%)	1,87
Fe ₂ O ₃ (%)	16,65
SO ₃ (%)	1,09
Total Cinza (%)	100,00



SATC
Centro Tecnológico

LABSATC
Laboratório





SATC
Centro Tecnológico

LABSATC
Laboratório

Atenciosamente,

Jefferson Morona
CRQ 13.300701 – 13ª Região
Gerente Técnico

Criciúma, 25 de Abril de 2019.

À , José Ricardo Iemes de Almeida

Cliente: COLÉGIO BANDEIRANTES LTDA

RELATÓRIO DE ANÁLISE Nº 1839/2019

DETERMINAÇÃO DA ANÁLISE QUÍMICA POR ESPECTROMETRIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X

E ESPECTROMETRIA DE ABSORÇÃO ATÔMICA

Informamos através desta os resultados da análise química (FRX Semi-Quantitativo) solicitada:

Descrição da amostra: CR – 7 (<1,35)

Quantitative Result

Analyte	Result	[3-sigma]	Proc.-Calc.	Line	Int. (cps/uA)
Na2O	0.295	[0.288]	Quan-EC	NaKa	0.0023
MgO	ND	[0.270]	Quan-EC	MgKa	0.0202
Al2O3	21.523	[0.048]	Quan-EC	AlKa	4.8022
SiO2	43.891	[0.134]	Quan-EC	SiKa	20.3504
P2O5	0.597	[0.023]	Quan-EC	P Ka	0.3778
K2O	1.710	[0.013]	Quan-EC	K Ka	3.7952
CaO	0.948	[0.011]	Quan-EC	CaKa	2.7072
TiO2	2.125	[0.016]	Quan-EC	TiKa	26.4619
Fe2O3	10.146	[0.020]	Quan-EC	FeKa	362.0405
SO3	1.324	[0.015]	Quan-EC	S Ka	2.1411

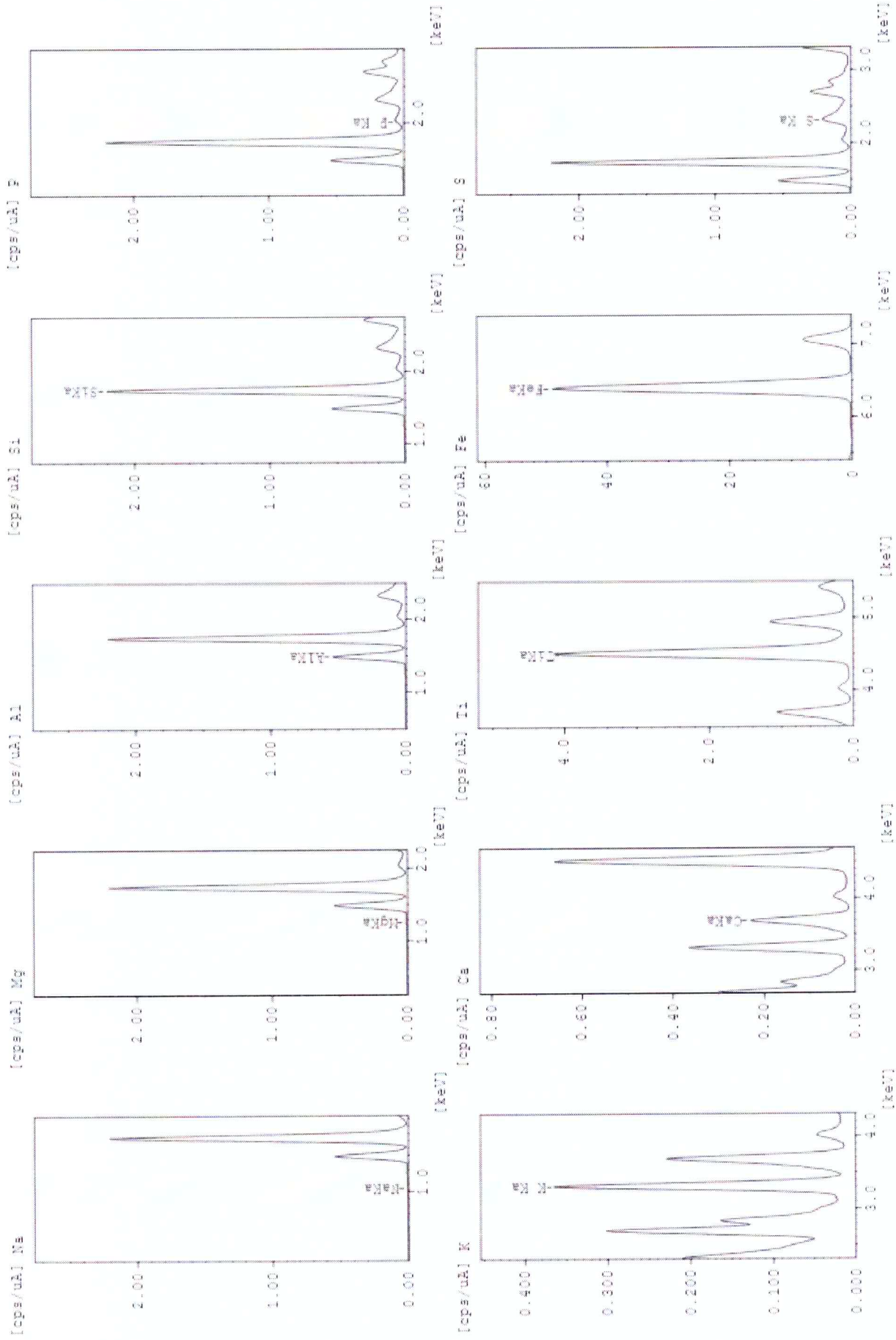


Elementos	% Cinza
Na ₂ O (%)	0,36
MgO (%)	0,00
Al ₂ O ₃ (%)	26,07
SiO ₂ (%)	53,16
P ₂ O ₅ (%)	0,72
K ₂ O (%)	2,07
CaO (%)	1,15
TiO ₂ (%)	2,57
Fe ₂ O ₃ (%)	12,29
SO ₃ (%)	1,60
Total Cinza (%)	100,00

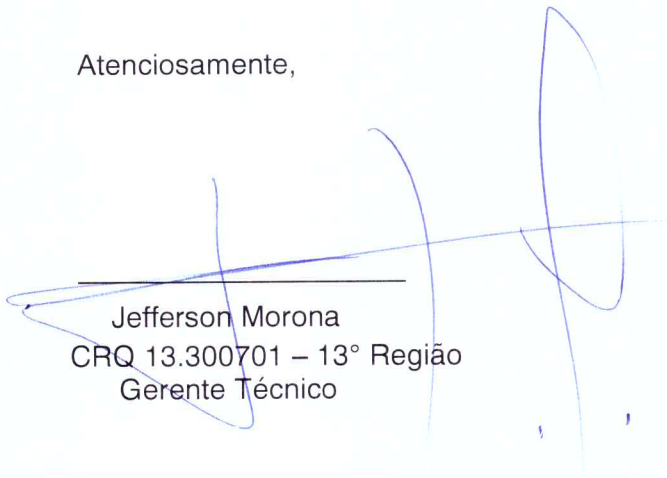


SATC
Centro Tecnológico

LABSATC
Laboratório



Atenciosamente,



Jefferson Morona
CRQ 13.300701 – 13ª Região
Gerente Técnico

ANEXO 5

Material amostrado tal-qual

Relatórios da Análise Petrográfica: Poder Refletor da vitrinite e Composição Petrográfica

0,66	0,68	0,74	0,66
0,66	0,58	0,66	0,66
0,66	0,66	0,51	0,66
0,66	0,66	0,58	0,58
0,66	0,66	0,66	0,58
0,66	0,58	0,58	0,58
0,58	0,66	0,82	0,58
0,58	0,58	0,82	0,74
0,58	0,66	0,58	0,66
0,58	0,74	0,66	
0,66	0,82	0,74	
0,58	0,74	0,58	
0,66	0,58	0,66	
0,74	0,74	0,58	
0,74	0,74	0,58	
0,74	0,58	0,74	
0,82	0,74	0,82	
0,58	0,58	0,66	
0,66	0,51	0,90	
0,74	0,58	0,66	

Sample
CR1

Standards
High routine

Number of Points
68

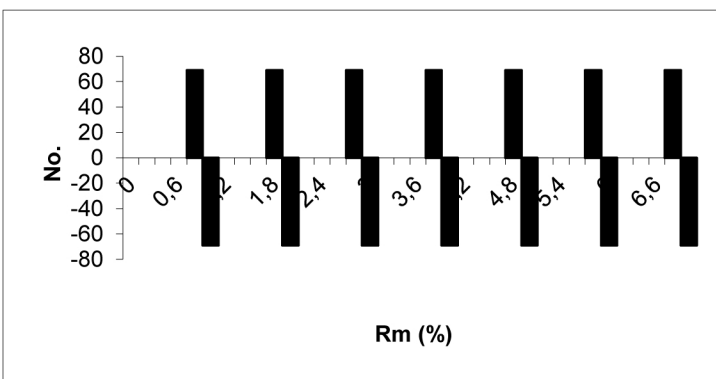
Mean Rm (%)
0,66

Standard Deviation
0,08

Spore Colour (TAI)

Fluorescence

Rm (%)



Kerogen Type

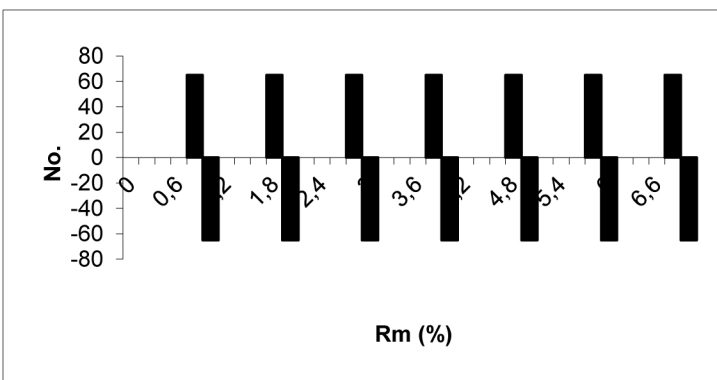
- % Hylogen (vitrinite)
- % Melanogen (inertinite)
- % Phyrogen (exinite)
- % AOM

Comments

0,65	0,80	0,70	0,80
0,65	0,80	0,70	0,70
0,65	0,65	0,70	0,70
0,65	0,65	0,70	0,65
0,65	0,70	0,70	0,65
0,65	0,70	0,75	
0,80	0,70	0,75	
0,85	0,70	0,80	
0,70	0,60	0,75	
0,70	0,70	0,75	
0,70	0,70	0,70	
0,70	0,70	0,70	
0,70	0,75	0,65	
0,70	0,80	0,65	
0,70	0,70	0,65	
0,70	0,80	0,65	
0,70	0,70	0,70	
0,70	0,60	0,70	
0,70	0,65	0,70	
0,65	0,65	0,65	

Sample
CR2
Standards
High routine
Number of Points
64
Mean Rm (%)
0,70
Standard Deviation
0,05
Spore Colour (TAI)
Fluorescence

Rm (%)



Kerogen Type
% Hylogen (vitrinite)
% Melanogen (inertinite)
% Phyrogen (exinite)
% AOM

Comments

0,90	0,90	1,14	0,85
0,80	0,80	0,90	0,85
0,85	0,90	0,85	0,75
0,85	0,90	0,75	0,80
0,9	0,85	0,96	0,80
0,85	0,85	1,08	0,75
0,96	0,85	0,90	0,80
0,85	0,85	0,85	
0,85	0,90	0,90	
0,85	0,80	0,80	
0,85	0,85	0,90	
0,9	0,90	0,80	
1,02	0,85	0,80	
1,02	0,85	0,80	
0,85	0,85	1,08	
0,85	0,85	0,96	
0,85	0,90	1,08	
0,9	0,75	0,75	
0,9	0,85	0,85	
0,8	0,9	0,85	

Sample
CR3

Standards
High routine

Number of Points
66

Mean Rm (%)
0,87

Standard Deviation
0,08

Spore Colour (TAI)

Fluorescence

Rm (%)



Kerogen Type

- % Hylogen (vitrinite)
- % Melanogen (inertinite)
- % Phyrogen (exinite)
- % AOM

Comments

0,65	0,60	0,60	0,60
0,65	0,60	0,65	0,60
0,65	0,60	0,65	0,65
0,65	0,70	0,65	0,65
0,75	0,70	0,65	0,65
0,65	0,70	0,65	0,65
0,6	0,60	0,65	0,70
0,75	0,60	0,65	0,70
0,65	0,65	0,70	0,70
0,6	0,65	0,70	0,70
0,6	0,70	0,70	0,60
0,7	0,70	0,75	0,60
0,7	0,65	0,65	0,60
0,65	0,70	0,65	0,60
0,65	0,70	0,65	0,65
0,65	0,60	0,65	0,65
0,7	0,65	0,70	0,65
0,6	0,70	0,70	
0,65	0,65	0,70	
0,6	0,65	0,6	

Sample
CR4

Standards
High routine

Number of Points
76

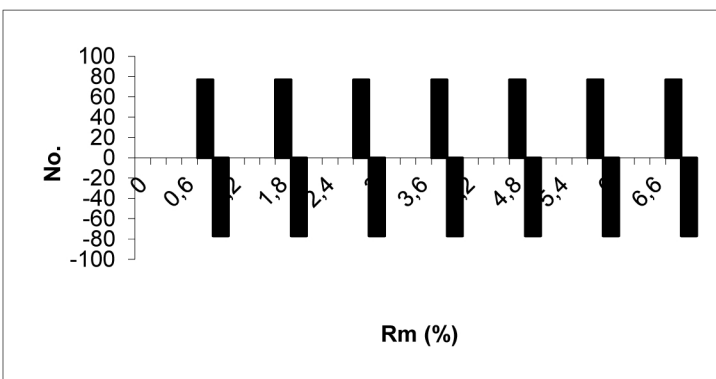
Mean Rm (%)
0,66

Standard Deviation
0,04

Spore Colour (TAI)

Fluorescence

Rm (%)



Kerogen Type

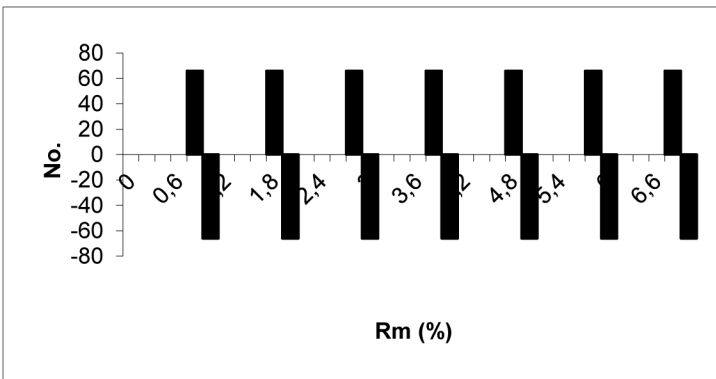
- % Hylogen (vitrinite)
- % Melanogen (inertinite)
- % Phyrogen (exinite)
- % AOM

Comments

0,56	0,56	0,63	0,63
0,56	0,56	0,63	0,76
0,56	0,56	0,56	0,76
0,63	0,56	0,70	0,76
0,63	0,76	0,83	0,76
0,63	0,76	0,83	0,63
0,63	0,76	0,70	
0,76	0,76	0,70	
0,76	0,76	0,70	
0,76	0,76	0,70	
0,70	0,76	0,70	
0,70	0,76	0,70	
0,70	0,76	0,70	
0,70	0,76	0,63	
0,63	0,76	0,63	
0,63	0,76	0,63	
0,63	0,70	0,63	
0,63	0,70	0,76	
0,63	0,70	0,63	
0,63	0,63	0,63	

Sample
CR5
Standards
High routine
Number of Points
65
Mean Rm (%)
0,68
Standard Deviation
0,07
Spore Colour (TAI)
Fluorescence

Rm (%)



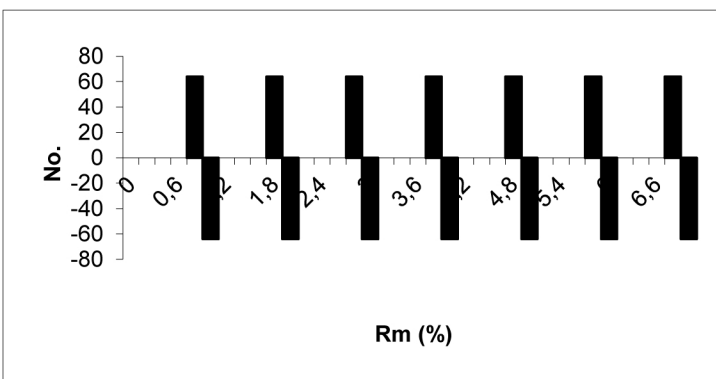
Kerogen Type
% Hylogen (vitrinite)
% Melanogen (inertinite)
% Phyrogen (exinite)
% AOM

Comments

0,70	0,65	0,66	0,66
0,70	0,54	0,58	0,74
0,70	0,54	0,58	0,74
0,70	0,66	0,58	0,66
0,70	0,66	0,58	
0,80	0,66	0,58	
0,75	0,66	0,58	
0,60	0,66	0,58	
0,65	0,58	0,66	
0,65	0,58	0,58	
0,65	0,58	0,58	
0,65	0,58	0,58	
0,65	0,58	0,58	
0,75	0,58	0,58	
0,75	0,58	0,66	
0,70	0,66	0,66	
0,70	0,66	0,66	
0,70	0,66	0,66	
0,65	0,66	0,66	
0,65	0,66	0,66	

Sample
CR6
Standards
High routine
Number of Points
63
Mean Rm (%)
0,64
Standard Deviation
0,06
Spore Colour (TAI)
Fluorescence

Rm (%)



Kerogen Type
% Hylogen (vitrinite)
% Melanogen (inertinite)
% Phyrogen (exinite)
% AOM

Comments

0,74	0,74	0,74	0,66	0,74
0,74	0,74	0,66	0,74	0,74
0,66	0,82	0,66	0,74	0,74
0,66	0,74	0,66	0,74	0,74
0,66	0,66	0,66	0,74	0,74
0,66	0,58	0,66	0,74	0,74
0,66	0,74	0,66	0,74	
0,82	0,74	0,66	0,66	
0,74	0,74	0,58	0,58	
0,82	0,74	0,82	0,58	
0,74	0,74	0,82	0,58	
0,74	0,74	0,82	0,58	
0,74	0,66	0,82	0,66	
0,58	0,66	0,66	0,66	
0,58	0,66	0,66	0,66	
0,66	0,82	0,66	0,66	
0,66	0,74	0,66	0,66	
0,74	0,74	0,66	0,66	
0,66	0,74	0,66	0,66	
0,66	0,74	0,66	0,74	

Sample
CR7

Standards
High routine

Number of Points
85

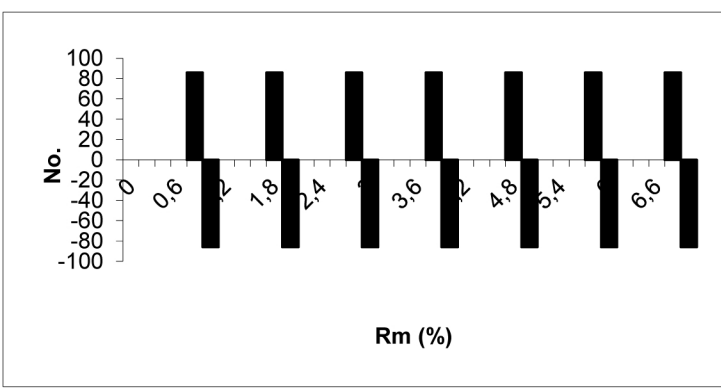
Mean Rm (%)
0,70

Standard Deviation
0,06

Spore Colour (TAI)

Fluorescence

Rm (%)



Kerogen Type

- % Hylogen (vitrinite)
- % Melanogen (inertinite)
- % Phyrogen (exinite)
- % AOM

Comments

CONTAGEM DOS MACERAIS				
PLUG N°	CR-1			
	Cnts	N. p ^{tos}	%	s/MM
TELINITA		23	5,399	7,21
COLOTELINITA		44	10,33	13,793
COLODETRINITA		85	19,95	26,646
VITRODETRINITA		46	10,8	14,42
Total vitrinita		198,00	46,48	62,069
FUSINITA		20	4,695	6,27
S-FUSINITA		37	8,685	11,60
INERTODETRINITA		9	2,113	2,82
FUNGINITA			0	0
MICRINITA			0	0
Total Inertinita		66	15,49	20,69
ESPORINITA		22	5,164	6,90
CUTINITA		11	2,582	3,45
ALGINITA			0	0,00
BETUMINITA		12	2,817	3,76
LIPTPDETRINITA		10	2,347	3,13
Total Liptinita		55	12,91	17,24
Mat Mineral		88	20,66	
Pirita		19	4,46	
Total Minerais		107	25,12	
Total Pontos		426,00	100	100

total S/ MM

Total de Pontos s/ MM 319,00

Total de Pontos Contados 426,00

Total de Pontos s/ MM 319,00

Obs: TODAS as Betuminita associada a argila

CONTAGEM DOS MACERAIS

PLUG N°	CR-2			
	Cnts	N. p^{tos}	%	s/MM
TELINITA		3	0,75	0,8219
COLOTELINITA		46	11,5	12,603
COLODETRINITA		67	16,75	18,356
VITRODETRINITA		47	11,75	12,877
Total vitrinita		163,00	40,75	44,658
FUSINITA		36	9	9,86
S-FUSINITA		39	9,75	10,68
INERTODETRINITA		23	5,75	6,30
FUNGINITA			0	0
MICRINITA			0	0
Total Inertinita		98	24,5	26,85
ESPORINITA		42	10,5	11,51
CUTINITA		15	3,75	4,11
ALGINITA			0	0,00
BETUMINITA		24	6	6,58
LIPTPDETRINITA		23	5,75	6,30
Total Liptinita		104	26	28,49
Mat Mineral		33	8,25	
Pirita		2	0,5	
Total Minerais		35	8,75	
Total Pontos		400,00	100	100

total S/ MM

Total de Pontos s/ MM 365,00

Total de Pontos Contados 400,00

Total de Pontos s/ MM 365,00

Obs: TODAS as Betuminita associada a argila

CONTAGEM DOS MACERAIS

PLUG N°	CR-3			
	Cnts	N. p^{tos}	%	s/MM
TELINITA		12	2,892	3,3613
COLOTELINITA		55	13,25	15,406
COLODETRINITA		95	22,89	26,611
VITRODETRINITA		50	12,05	14,006
Total vitrinita		212,00	51,08	59,384
FUSINITA		44	10,6	12,32
S-FUSINITA		36	8,675	10,08
INERTODETRINITA		19	4,578	5,32
FUNGINITA		2	0,482	0,5602
MICRINITA			0	0
Total Inertinita		101	24,34	28,29
ESPORINITA		12	2,892	3,36
CUTINITA		2	0,482	0,56
ALGINITA			0	0,00
BETUMINITA		22	5,301	6,16
LIPTPDETRINITA		8	1,928	2,24
Total Liptinita		44	10,6	12,32
Mat Mineral		51	12,29	
Pirita		7	1,687	
Total Minerais		58	13,98	
Total Pontos		415,00	100	100

total S/ MM

Total de Pontos s/ MM 357,00

Total de Pontos Contados 415,00

Total de Pontos s/ MM 357,00

Obs: Betuminita impregnando a argila principalmente e não impregnando secundariamente

CONTAGEM DOS MACERAIS				
PLUG N°	CR-4			
	Cnts	N. p ^{tos}	%	s/MM
TELINITA		2	0,489	0,5682
COLOTELINITA		118	28,85	33,523
COLODETRINITA		126	30,81	35,795
VITRODETRINITA		15	3,667	4,2614
Total vitrinita		261,00	63,81	74,148
FUSINITA		19	4,645	5,40
S-FUSINITA		18	4,401	5,11
INERTODETRINITA		5	1,222	1,42
FUNGINITA		2	0,489	0,5682
MICRINITA			0	0
Total Inertinita		44	10,76	12,50
ESPORINITA		34	8,313	9,66
CUTINITA		5	1,222	1,42
ALGINITA			0	0,00
BETUMINITA		8	1,956	2,27
LIPTPDETRINITA			0	0,00
Total Liptinita		47	11,49	13,35
Mat Mineral		20	4,89	
Pirita		37	9,046	
Total Minerais		57	13,94	
Total Pontos		409,00	100	100

total S/ MM

Total de Pontos s/ MM 352,00

Total de Pontos Contados 409,00

Total de Pontos s/ MM 352,00

Obs: Betuminita impregnando a argila principalmente e não impregnando secundariamente

CONTAGEM DOS MACERAIS

PLUG N°	CR-5			
	Cnts	N. p ^{tos}	%	s/MM
TELINITA			0	0
COLOTELINITA		19	4,75	6,44
COLODETRINITA		55	13,75	18,64
VITRODETRINITA		66	16,50	22,37
Total vitrinita		140	35,00	47,46
FUSINITA		3	0,75	1,02
S-FUSINITA		62	15,50	21,02
INERTODETRINITA		23	5,75	7,80
FUNGINITA			0,00	0,00
MICRINITA			0,00	0,00
Total Inertinita		88	22,00	29,83
ESPORINITA		23	5,75	7,80
CUTINITA		13	3,25	4,02
ALGINITA			0,00	0,00
BETUMINITA		10	2,50	3,39
LIPTPDETRINITA		21	5,25	7,12
Total Liptinita		67	16,75	22,71
Mat Mineral		90	22,50	
Pirita		15	3,75	
Total Minerais		105	26,25	
Total Pontos		400,00	100,00	100,00

Total de Pontos s/ MM 295,00

Total de Pontos contados 400,00

Total de Pontos s/ MM 295,00

CONTAGEM DOS MACERAIS

PLUG N°	CR-6			
	Cnts	N. p ^{tos}	%	s/MM
TELINITA		4	1	1,1429
COLOTELINITA		159	39,75	45,429
COLODETRINITA		98	24,5	28
VITRODETRINITA		31	7,75	8,8571
Total vitrinita		292,00	73	83,429
FUSINITA		13	3,25	3,71
S-FUSINITA		7	1,75	2,00
INERTODETRINITA		4	1	1,14
FUNGINITA			0	0
MICRINITA			0	0
Total Inertinita		24	6	6,86
ESPORINITA		19	4,75	5,43
CUTINITA		9	2,25	2,57
ALGINITA			0	0,00
BETUMINITA		0	0	0,00
LIPTPDETRINITA		6	1,5	1,71
Total Liptinita		34	8,5	9,71
Mat Mineral		31	7,75	
Pirita		19	4,75	
Total Minerais		50	12,5	
Total Pontos		400,00	100	100

total S/ MM

Total de Pontos s/ MM 350,00

Total de Pontos Contados 400,00

Total de Pontos s/ MM 350,00

Obs: TODAS as Betuminita associada a argila

CONTAGEM DOS MACERAIS

PLUG N°	CR-7			
	Cnts	N. p^{tos}	%	s/MM
TELINITA		4	0,948	1,105
COLOTELINITA		26	6,161	7,1823
COLODETRINITA		57	13,51	15,746
VITRODETRINITA		54	12,8	14,917
Total vitrinita		141,00	33,41	38,95
FUSINITA		51	12,09	14,09
S-FUSINITA		46	10,9	12,71
INERTODETRINITA		20	4,739	5,52
FUNGINITA			0	0
MICRINITA			0	0
Total Inertinita		117	27,73	32,32
ESPORINITA		30	7,109	8,29
CUTINITA		18	4,265	4,97
ALGINITA			0	0,00
BETUMINITA		35	8,294	9,67
LIPTPDETRINITA		21	4,976	5,80
Total Liptinita		104	24,64	28,73
Mat Mineral		54	12,8	
Pirita		6	1,422	
Total Minerais		60	14,22	
Total Pontos		422,00	100	100

total S/ MM

Total de Pontos s/ MM 362,00

Total de Pontos Contados 422,00

Total de Pontos s/ MM 362,00

Obs: TODAS as Betuminita associada a argila

ANEXO 6

Material amostrado tal-qual

Relatórios da Geoquímica Orgânica: COT (Carbono Orgânico Total) e Pirólise (Rock-Eval)

ID	Massa (mg)	S1 (mg/g)	S2(mg/g)	S3 (mg/g)	Tmax(°C)	COT %	IH	IO	
prof marcus	PADRAO IFP2.R00	74,6	0,22	12,27	0,73	414	0		
prof marcus	CR-01.R00	32	3,4	71,08	0,36	436	29,70	239	1,21
prof marcos	CR-02.R00	30,6	3,75	143,36	0,86	441	50,20	286	1,71
prof marcus	CR-03.R00	29,6	7,77	136,45	0,19	456	52,00	262	0,37
prof marcus	CR-04.R00	31,3	11,61	192,55	0,21	442	60,80	317	0,35
prof marcus	CR-05.R00	32	1,43	95,75	0,34	441	37,00	259	0,92
prof marcus	CR-06.R00	30,1	8,49	204,04	0,85	443	61,40	332	1,38
prof marcus	CR-07.R00	31,6	7,63	108,33	0,27	450	37,99	285	0,71

PADRÃO IFP
S2 = 11.93 - 12.93 mg/g
TMAX = 414 - 418 °C



Prof. Egberto Pereira
Coordenador do
Laboratório
de Estratigrafia
Química e Geoquímica
Orgânica da UERJ

LECO SC 632 (001)	Data 12/04/2018				% COT	% S	
Referência	Desvio Padrão						
LECO-COT 502-308 Lote1019	2,42 ± 0,05	2,37	a		2,47	2,44	
Micro Analysis S-OAS-175032 B2150	0,85±0,04	0,81	a		0,89		0,86
PADRÃO SECUNDÁRIO	4,03 ± 0,08	3,95	a		4,11	4,03	0,13
Profundidade	Barquinha	Barq.+Amost.	Descar.	Peso	R.I	COT %	S %
AMOSTRA CR001	37,406	37,531	37,525	0,125	95	29,70	4,75
AMOSTRA CR002	37,193	37,319	37,319	0,126	100	50,20	1,72
AMOSTRA CR003	37,019	37,144	37,144	0,125	100	52,00	1,44
AMOSTRA CR004	38,805	38,930	38,930	0,125	100	60,80	8,12
AMOSTRA CR005	36,923	37,049	37,048	0,126	99	37,00	3,38
AMOSTRA CR006	38,895	39,020	39,017	0,125	98	61,40	6,54
AMOSTRA CR007	38,267	38,392	38,390	0,125	98	37,99	1,49
PADRÃO SECUNDÁRIO	37,889	38,139	38,117	0,250	91	4,07	0,31



Prof. Egberto Pereira
 Coordenador do
 Laboratório
 de Estratigrafia
 Química e Geoquímica
 Orgânica da UERJ

ANEXO 7

Resultados dos estudos Palinológicos



Palynology of Bonito and Barro Branco coal seams from Rio Bonito Formation (Lower Permian of Paraná Basin) in the Criciúma coal region, southernmost Brazil

Z. Pereira^{a,*}, M. Mendes^b, P.A. Souza^c, C. Rodrigues^d, P. Fernandes^e, M. Ade^f, C. Araújo^f, J.R.L. Almeida^{d,g}, E.M. Santos^g, H.V. Rocha^{d,g}, V.E.S. Santos^g, B.P. Araújo^g, L. Garavaglia^h, M.J. Lemos de Sousa^d

^a LNEG, Rua da Amieira, 4465-965 S, Mamede de Infesta, Portugal

^b LNEG, Bairro da Vale d'Oca Apartado 14, 7601-909, Aljustrel, Portugal

^c Departamento de Estratigrafia e Paleontologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Campus do Vale Av. Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, Brazil

^d FP-ENAS, Universidade Fernando Pessoa, Praça de 9 de Abril 349, 4249-004, Porto, Portugal

^e CIMA - Centro de Investigação Marinha e Ambiental, Universidade do Algarve, Campus de Gambelas, 8005-139, Faro, Portugal

^f Departamento de Estratigrafia e Paleontologia, Curso de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rua São Francisco Xavier, 524, Sala 2010A, Pavilhão Reitor João Lyra Filho, Maracanã, CEP 20550-013, Rio de Janeiro, Brazil

^g IEE - Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, Av. Prof. Luciano Gualberto, 1289 - Butantã, São Paulo, SP, 05508-010, Brazil

^h SATC - Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina, Rua Pascoal Meller, 73, Bairro Universitário, CEP 88805-380, CP 232, Criciúma, Santa Catarina, Brazil

ARTICLE INFO

Keywords:

Spores
Pollen
Palynostratigraphy
Cisuralian
Criciúma coal seams
Brazil

ABSTRACT

Seven coal seams were sampled from several mines and outcrops of the Rio Bonito Formation, Bonito and Barro Branco coal seams, in the coal mining region of Criciúma, Paraná Basin, Santa Catarina State (Brazil), for a detailed palynostratigraphic study. The coal seams sampled yield abundant, diverse and moderately to well preserved palynological assemblages. A total of twenty-seven spore species, fourteen pollen species and four microplanktonic or chlorophyceae algae and fungi species were identified. The palyno-assemblages recovered in the Bonito and Barro Branco coal seams are assigned to the *Vittatina costabilis* Interval Zone, *Protohaploxypinus goraiensis* Subzone of the Paraná Basin, of Asselian? to Artinskian age (Lower Permian). The microflora assemblages identified in these coal seams are very similar in composition, presenting a dominance of arborescent and herbaceous lycophytes. The Barro Branco coal seam shows a relatively higher frequency of algae like composition than in the Bonito coal seam, suggesting a possible fluvial or lagoonal facies influence.

1. Introduction

The Paraná is a large intracratonic basin in Brazil and bears important coal seams within the Permian Rio Bonito Formation. The present contribution is a detailed study of the Bonito and Barro Branco coal seams at the Criciúma coal region, southern area of Santa Catarina State (Fig. 1). In Criciúma region, the main coal seams are assigned to the Tubarão Supergroup that includes the Guatá Subgroup: the Rio Bonito Formation (Paraguçu Member - Bonito coal seam and Siderópolis Member - Barro Branco Coal seam) (Fig. 1).

The Tubarão Supergroup, in the southern Paraná Basin (PB), has been intensely studied by means of paleoflora (Iannuzzi, 2010;

Bernardes-de-Oliveira et al., 2016) and palynostratigraphy (Daemon and Quadros, 1970; Marques-Toigo, 1988, 1991; Souza et al., 2003; Souza and Marques-Toigo, 2003, 2005; Souza, 2006; Boardman et al., 2012a, 2012b; di Pasquo et al., 2018) amongst others.

The main target of the present project is characterizing the potential of coal seams from Rio Bonito Formation for CO₂ sequestration, using a multidisciplinary approach that includes vitrinite reflectance, maceral composition, organic geochemistry (proximate and ultimate analyses, pyrolysis (Rock-Eval), sorption isotherms and palynostratigraphy. The World Energy Strategy new scenario is facing several demanding challenges to ensure the three main targets, a secure, competitive and sustainable energy, although supported by a climate strategy.

* Corresponding author.

E-mail address: zelia.pereira@lneg.pt (Z. Pereira).

<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.01.009>

Received 27 November 2018; Received in revised form 11 January 2019; Accepted 11 January 2019

Available online 15 January 2019

0895-9811/ © 2019 Published by Elsevier Ltd.

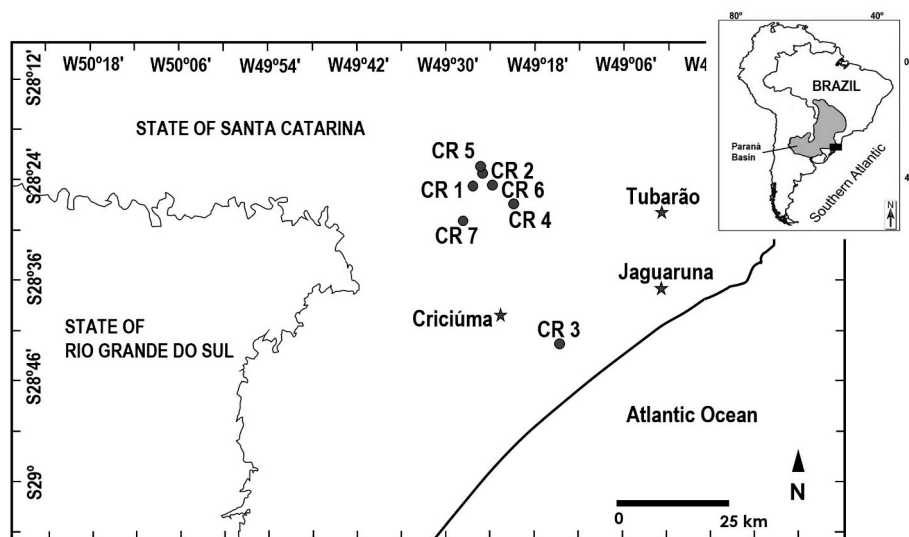


Fig. 1. a. Map of the studied area with location of studied sections and samples. b. Stratigraphic log with studied samples at the Siderópolis Member coal beds (Rio Bonito Formation) in Santa Catarina. Modified from Iannuzzi (2010) and Bernardes-de-Oliveira et al., 2016.

Nevertheless, in 2015 COP21 (2015 Paris Climate Conference), it was stated that this climate strategy can only be overcome by applying the CCS (Carbon Capture and Storage) Technologies. In this context, Brazil, due to their internationally well-known coalfields, can play a major role in the CCS technologies scope, which is the ultimate goal of this project, but not the main objective of the present study.

A total of 7 coal seams were sampled, from several mines and outcrops of the Criciúma coal region, Santa Catarina State for the detailed studies above mentioned. This work is the first contribution to these studies, where is presented a comprehensive study of the Cisuralian (Lower Permian) palynology of the key samples collected in the Bonito and Barro Branco coal seams at Rio Bonito Formation, with emphasis on spores and pollen assemblages significant for establishment the biostratigraphic setting, age correlations and environmental interpretations.

2. Geological setting

The PB is a large elongated intracratonic Paleozoic basin (ca. 1,700,000 km²), located in central-southeastern South America with portions of the basin found in Brazil, Uruguay, Argentina and Paraguay (Zalán et al., 1990). PB contains upwards to 8000 m thickness of sedimentary and igneous rocks. Stratigraphic studies of the PB began, in Brazil, with the study of White (1908). Since then, several lithostratigraphic works were published, but only in 1974 and onwards comprehensive compilations of the stratigraphic column of PB were published by Schneider et al. (1974), Zalán et al. (1990) and the last stratigraphic review was done by Milani et al. (2007).

According to Zalán et al. (1990) and Milani et al. (2007), the PB was established over a cooling continental crust after the Brasiliano Orogenic Cycle (700–450 Ma). The resulting thermal subsidence, which began between the Cambrian and Ordovician Periods, caused sedimentation to begin in the Silurian and finishing in the Cretaceous with several breaks or unconformities in the sedimentary record.

Milani (1997) applying sequence stratigraphic concepts to PB have identified 6 s order sequences and has named them from the bottom to the top as: Rio Ivaí (Ordovician-Silurian), Paraná (Devonian), Gondwana I (late Carboniferous - early Triassic), Gondwana II (Triassic), Gondwana III (late Triassic - early Cretaceous) and Baurú (late Cretaceous), which were incorporated in the stratigraphic chart erected by Milani et al. (2007).

The South Brazilian coal measures occur in the Gondwana I Supersequence, lithostratigraphically corresponding to Rio Bonito

Formation, which includes, in ascending stratigraphic order, the Triunfo, Paraguassu and Siderópolis members. The Rio Bonito Formation overlies the Itararé Group, and is overlain by the Palermo Formation. These three lithostratigraphical units conform the Tubarão Supergroup, representing, in general aspect, a major transgressive and regressive cycle in the PB.

The main coal seams, in Santa Catarina State and Criciúma region, from bottom to top, include Bonito, Rio Bonito, Ponte Alta, Irapuá, Barro Branco and Treviso coal seams and are assigned to Rio Bonito Formation, Siderópolis Member and subordinately in the Triunfo Member, being associated to fluvio-deltaic (Triunfo Member) and lagoon-barrier to estuarine (Paraguaçu Member) systems according to White (1908), Medeiros and Thomas Filho (1973), Krebs and Menezes Filho (1984, unpublished data), Aboarrage and Lopes (1986), Della Fávera et al. (1992, 1994), Holz et al. (2010) and Iannuzzi (2010). These coal seams are interbedded with shale and siltstone layers and they are defined by different authors (Marques-Toigo and Corrêa da Silva, 1984; Miltzarek and Corrêa da Silva, 1992) as impure coals, due to their high mineral matter contents which are related to their estuarine-barrier shoreface depositional environment conditions.

3. Material and methods

For this study two coal seams from the Criciúma coal region were selected, including several mines and outcrops for a detailed study (see Fig. 1): Bonito coal seam (recorded as samples CR2, CR5 and CR7) and Barro Branco coal seam (recorded as samples CR1, CR3, CR4 and CR6), in a total of 7 coal seams.

The sample CR1 was collected in an outcrop of Barro Branco coal seam, near from Rio Bonito River, which is characterized by coal beds thickness of 40–50 cm interbedded with thin beds of siltstone and shale. In the Lauro Muller Mine, it was collected the sample CR2 from the Bonito coal seam, which is mainly characterized by thin coal beds 5–15 cm thick interbedded with shale and siltstone. The sample CR3 was collected in the 101 Mine from Barro Branco coal seam represented by coal beds of 20–30 cm of thickness interbedded by silty and shaly deposits. The sample CR4 was collected in an outcrop from the Barro Branco coal seam in the Carbonífera Siderópolis Mine and the coal bed sampled has a thickness of 2 m. In Bonito I Mine, it was collected the sample CR5 from Bonito coal seam, which is characterized by thin interbedding layers of coal, siltstone, shale and occasionally sandstone. The sample CR6 collected in an outcrop near from Salame River showed high levels of weathering however this outcrop is represented by a thick

coal bed of, approximately, 1 m and thin layers of siltstone and shale. The sample CR7 was collected in the Bonito coal seam at Fontanela Mine, which is represented by thin interbedded coal, siltstone and shale layers. Coal seams from the South Brazil are mainly characterized by sequences of thin coal layers interbedded by siltstone and shale, which was defined as banded (barcode) coals by Marques-Toigo and Corrêa da Silva (1984) and Miltzarek and Corrêa da Silva (1992).

The palynological samples were treated with standard palynological laboratory procedures to extract and concentrate the organic residues. The organic residues were oxidized using fuming nitric acid for about 1–2 min (Wood et al., 1996; Riding and Warny, 2008). Residues were mounted in slides and subsequently examined, where taxonomic study and photomicrographs are made using optical light BX40 Olympus microscope equipped with an Olympus C5050 digital camera facility. Selected palynomorphs are illustrated in Plates I to III. All samples, residues, and slides are held in the Collection of the Geological Survey of Portugal, LNEG, S. Mamede de Infesta.

For biostratigraphic interpretations were used previous palynostratigraphy scheme of Souza and Marques-Toigo (2003, 2005) and Souza (2006).

4. Palynostratigraphy

In this section, the palynomorph assemblages from the two studied coal seams Bonito and Barro Branco assigned to the Rio Bonito Formation, Criciúma region, southern PB, sampled for this study are described. Relative frequencies of selected groups were obtained for each sample, after counting at least 200 palynomorphs and are presented in Fig. 2. Stratigraphic relevant taxa studied are presented in Fig. 3 and in Plates I to III.

The analysed samples yield abundant, diverse and moderately to well preserved palynological assemblages. A total of 24 spore species, 14 pollen species and 4 microplanktonic or chlorophyceae algae species were identified.

The recovered assemblages are subdivided in two assemblages assigned to each coal seam studied. In general, the spore-pollen assemblages are very similar however a few differences are described below, from base to top:

4.1. Bonito coal seam

The three palynological samples analysed show a relative similarity to each other, with dominance of spores when compare with pollen grains. CR5 sample is the most productive level, with the most well preserved palynomorphs.

Assemblage recovered in CR2, CR5 and CR7 is dominated by a trilete spore palynoflora (89.3–96.6%), with some arborescent and herbaceous lycopsida such as *Cristatisporites inconstans*, *C. lestai*, *Cristatisporites* spp., *Kraeuselisporites* sp. and dominant *Lundbladispora* genus (*L. braziliensis*, *L. riobonitensis* and *Lundbladispora* spp.). *Spelaotriletes triangulus*, *Vallatisporites arcuatus* and *Vallatisporites* spp.

also occur.

Frequent spore tetrad occurs, mainly those of *Lundbladispora*. Filicopsida vegetation group (24.7–31.3%) is represented by *Apiculatisporites* spp., *Brevitriletes cornutus*, *Cyclogranisporites* spp., *Diatomozonotriletes subbaculiferus*, *Leiotriletes directus* *Leiotriletes virkii*, *Leiotriletes* spp., *Lophotriletes* spp., *Granulatisporites austroamericanus*, *Horriditriletes filiformis* *H. gondwanensis*, *H. ramosus*, *H. spinobaculosus*, *H. uruguiensis*, *Horriditriletes* spp., *Microbaculatispora trisina*, *Punctatisporites gretensis*, *Retusotriletes nigrifellus* and *Retusotriletes* sp. are also present and assigned to Sphenosida vegetation group.

Gymnospermic pollen grains are subsidiary (2–8%) and are assigned to the Glossopteridophyta group, including the monosaccate pollen *Florinites* spp. *Cannanoropollis janakii*, *C. cf. triangulatus*, *Cannanoropollis* spp., *Plicatipollenites malabarensis*, *Potoniesporites novicus*, *Scheuringipollenites maximus*, *Scheuringipollenites* spp., *Vesicaspora* sp. and the bisaccate pollen *Alisporites* spp., *Limitisporites rectus*, *Limitisporites* spp. Striate and polylicate pollen grains (1.3–2.0%) related to certain Conifers are represented by *Protohaploxylinus amplus*, *P. goraiensis*, *Protohaploxylinus* sp., *Vittatina costabilis*, *V. subsaccata* and *Vittatina* spp.

In addition, chlorophyceae algae like or microplanktonic elements are very rare (0,7–1,3%), such as *Leiosphaeridia* sp., *Quadriflorites* sp., *Tasmanites* sp., *Tetraporina punctata*, *Tetraporina* sp. as well as fungi (*Portalites gondwanensis* and spores clusters).

Lundbladispora is dominant in all of Bonito coal seam samples, in association with *Horriditriletes* and *Punctatisporites* genus. Pollen grains are uncommon and poorly preserved, particularly in the sample CR2.

The occurrence of *Vittatina* genus, which have first occurrence in the base of *Vittatina costabilis* Zone, in particularly association with *Protohaploxylinus goraiensis* and abundant *Granulatisporites austroamericanus*, whose last event occurs in the top of the *Protohaploxylinus goraiensis* Subzone. The absence of *Hamiapollenites karrooensis* allows to establish the *Protohaploxylinus goraiensis* Subzone.

4.2. Barro Branco coal seam

The four palynological samples studied show a relative similarity to each other, with a dominance of spores compared to pollen grains. CR1 sample is the most productive sample, with the most well preserved palynomorphs.

Samples CR1, CR3, CR4 and CR6 are dominated by trilete spores (89.3–93.3%) of the species *Cristatisporites inconstans*, *C. lestai*, *Cristatisporites* spp., *Kraeuselisporites* spp., *Lundbladispora braziliensis*, *Lundbladispora riobonitensis*, *Lundbladispora* spp., *Vallatisporites arcuatus*, *V. splendens* and *Vallatisporites* spp.

Apiculatisporites spp., *Brevitriletes cornutus*, *Cyclogranisporites parvigranulosus*, *Cyclogranisporites* spp., *Diatomozonotriletes subbaculiferus*, *Laevigatosporites vulgaris* *Leiotriletes virkii*, *Leiotriletes* spp., *Lophotriletes* spp., *Granulatisporites austroamericanus*, *Horriditriletes gondwanensis*, *Horriditriletes* spp. and *Punctatisporites gretensis* represent the Filicopsida

Class/ sample number	RIO BONITO FM.						
	Bonito Coal Seam			Barro Branco Coal Seam			
	CR2	CR5	CR7	CR1	CR3	CR4	CR6
Laevigate spores	18,0	14,7	19,3	29,3	36,0	30,0	15,3
Apiculate spores	13,3	10,0	12,0	13,3	26,0	14,7	6,7
Cingulizone spores	65,3	65,3	58,0	46,7	31,3	36,0	68,7
Monosaccate pollen	0,7	1,3	0,7	2,7	0,0	0,7	0,0
Bissaccate pollen	1,3	5,3	7,3	2,7	4,0	9,3	8,0
Striate pollen	1,3	2,0	2,0	2,7	2,0	4,0	1,3
Chlorophycean algae	0,0	1,3	0,7	2,7	0,7	5,3	0,0
Total	100	100	100	100	100	100	100

Fig. 2. Relative frequencies of selected palynomorph groups in the studied samples (in %).

Species list	Studied samples						
	Bonito Coal Seam			Barro Branco Coal Seam			
	CR2	CR5	CR7	CR1	CR3	CR4	CR6
Spores							
<i>Apiculatisporites</i> spp.			•		•		
<i>Brevitriletes cornutus</i>	•	•	•	•	•	•	•
<i>Calamospora plicata</i>						•	
<i>Calamospora liquida</i>				•			
<i>Calamospora sinuosa</i>		•					
<i>Calamospora</i> spp.	•	•	•	•	•	•	•
<i>Cristatisporites lestai</i>				•			
<i>Cristatisporites inconstans</i>	•			•		•	
<i>Cristatisporites</i> spp.	•	•	•	•	•	•	•
<i>Cyclogranisporites parvigranulosus</i>		•	•			•	
<i>Cyclogranisporites</i> spp.		•	•	•		•	
<i>Diatamonozonotriletes subbaculiferous</i>	•	•		•	•	•	•
<i>Granulatisporites austroamericanus</i>		•	•	•	•	•	•
<i>Horriditriletes gondwanensis</i>				•			
<i>Horriditriletes filiformis</i>		•					
<i>Horriditriletes ramosus</i>	•	•					•
<i>Horriditriletes spinobaculosus</i>		•					
<i>Horriditriletes uruguaiensis</i>		•					
<i>Horriditriletes</i> spp.		•	•	•			
<i>Kraeuselisporites</i> spp.		•		•		•	
<i>Laevigatosporites vulgaris</i>				•			
<i>Leiotriletes directus</i>		•					
<i>Leiotriletes virkii</i>	•	•		•		•	•
<i>Leiotriletes</i> spp.	•	•	•	•		•	•
<i>Lophotriletes</i> spp.		•		•			
<i>Lundbladispota braziliensis</i>	•	•	•	•		•	•
<i>Lundbladispota riobonitensis</i>	•	•	•	•		•	•
<i>Lundbladispota</i> spp.	•	•	•	•		•	
<i>Microbaculatispora trisina</i>		•					
<i>Punctatisporites gretensis</i>	•	•		•		•	•
<i>Raistrickia</i> spp.		•					
<i>Retusotriletes nigrifellus</i>	•			•			
<i>Retusotriletes</i> spp.					•		
<i>Spelaeotriletes triangulus</i>		•					
<i>Vallatisporites arcuatus</i>		•		•			•
<i>Vallatisporites splendens</i>				•		•	•
<i>Vallatisporites</i> spp.		•	•	•	•		•
Pollen grains							
<i>Alisporites</i> spp.	•	•		•		•	
<i>Cannanoropollis janaki</i>		•		•			
<i>Cannanoropollis</i> cf. <i>triangulatus</i>		•		•			
<i>Cannanoropollis</i> spp.		•			•		
<i>Florinites</i> spp.		•			•		
<i>Limitisporites rectus</i>		•				•	
<i>Limitisporites</i> cf. <i>rectus</i>		•					
<i>Limitisporites</i> spp.		•	•				
<i>Plicatipollenites malabarensis</i>		•		•			
<i>Potonieisporites novicus</i>		•		•			
<i>Protohaploxypinus amplus</i>		•				•	
<i>Protohaploxypinus goraiensis</i>		•		•			•
<i>Protohaploxypinus limpidus</i>					•		
<i>Protohaploxypinus</i> sp.		•	•	•			•
<i>Pteruchipollenites indarraensis</i>		•		•	•	•	
<i>Pteruchipollenites</i> sp.		•	•	•	•	•	•
<i>Scheuringipollenites maximus</i>		•		•			
<i>Scheuringipollenites</i> spp.	•	•		•			
<i>Vesicaspora</i> sp.		•		•			
<i>Vittatina costabilis</i>		•					
<i>Vittatina subsaccata</i>		•		•			
<i>Vittatina vittifera</i>		•		•			
<i>Vittatina</i> spp.		•	•	•			
Chlorophycean algae and Fungi							
<i>Leiosphaeridia</i> sp.	•	•		•		•	•
<i>Portalites gondwanensis</i>		•		•		•	•
<i>Quadrisporites</i> sp.		•					
<i>Tasmanites</i> sp.		•					
<i>Tetraporina punctata</i>		•		•			
<i>Tetraporina</i> spp.		•		•			
Algae cluster		•		•			

Fig. 3. Palynomorph assemblages recovered from the studied Bonito and Barro Branco Coal Seams, Rio Bonito Formation in the Criciúma coal region, Brazil.

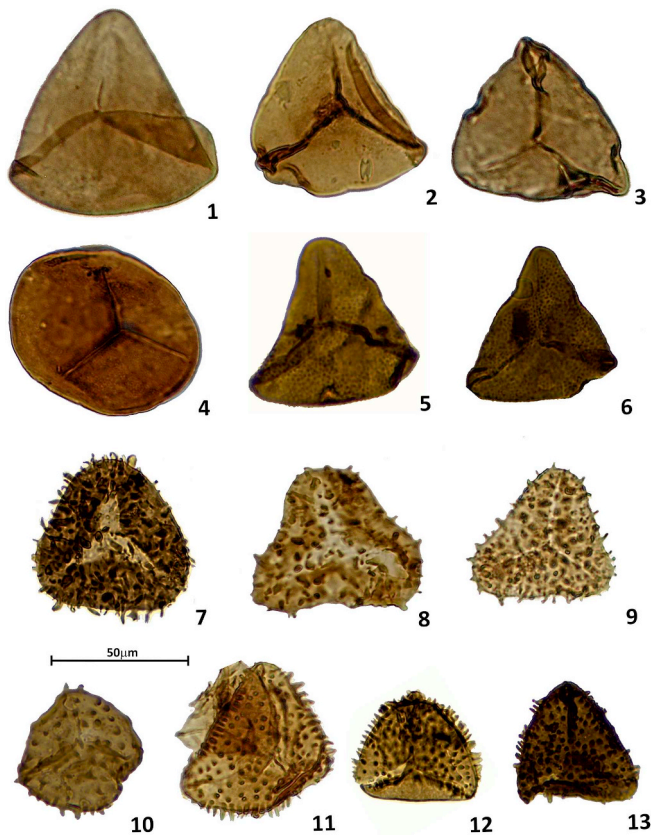


Plate 1. 1. *Leiotriletes directus* Balme and Hennelly 1956; Bonito coal seam, Sample CR5, slide 3b, 1310–95; 2. *Leiotriletes virkii* Tiwari 1965; Bonito coal seam, Sample CR5, slide 4a, MC 1450–75; 3. *Leiotriletes virkii* Tiwari 1965; Bonito coal seam, Sample CR5, slide 3a, MC 1200–155; 4. *Punctatisporites grentensis* Balme and Hennelly 1956; Bonito coal seam, Sample CR5, slide 4b, MC 1225–175; 5. *Granulatisporites austroamericanus* Archangelsky and Gamarro, 1979; Bonito coal seam, Sample CR7, slide 1, MC 1032–1437; 6. *Granulatisporites austroamericanus* Archangelsky and Gamarro, 1979; Bonito coal seam, Sample CR5, slide 2, MC 1106–310; 7. *Horriditriletes filiformis* (Balme and Hennelly) Backhouse 1991; Bonito coal seam, Sample CR5, slide 2–34, MC 996–487; 8. *Horriditriletes uruguiensis* (Marques-Toigo) Archangelsky and Gamarro 1979; Bonito Coal Seam, Sample CR5, slide 4b, MC 1310–135; 9. *Horriditriletes uruguiensis* Archangelsky and Gamarro, 1979; Bonito coal seam, Sample CR5, slide 4b, MC 1250–140; 10. *Brevitriletes cornutus* (Balme and Hennelly) Backhouse 1991; Barro Branco coal seam, Sample CR3, slide 1–28, MC 1009–455; 11. *Diatomonozonotriletes subbaculiferus* (Nahuy, Alpern and Ybert) Césari et al., 1995; Barro Branco coal seam, Sample CR1, slide 1b, MC 1160–55; 12. *Diatomonozonotriletes subbaculiferus* (Nahuy, Alpern and Ybert) Césari et al., 1995; Barro Branco coal seam, Sample CR6, slide 1–34, MC 1068–430; 13. *Diatomonozonotriletes* sp.; Barro Branco coal seam, Sample CR3, slide 1–38, 1075–422.

(22–62%), which has a slightly higher frequency than Bonito coal seam. *Lundbladispora* it is the dominant genus but, since the Filicopsida relative frequencies increased, Lycopsida group decreased.

Sphenopsida are common to abundant and include *Calamospora plicata*, *C. liquida*, *C. sinuosa*, *Calamospora* spp., *Retusotriletes nigrtellus* and *Retusotriletes* spp.

Gymnosperms pollen are represented in very low frequencies in the assemblage (4–10%) and include monosaccate pollen (0–2.7%), such as *Cannanoropollis janakii*, *C. cf. triangulatus*, *Cannanoropollis* spp., *Potonieisporites novicus*, *Florinites* spp. and by bisaccate pollen (2.7–9.3%) such as *Alisporites* spp., *Limitisporites rectus*, *Limitisporites* sp., *Scheuringipollenites maximus* and *Scheuringipollenites* spp. Striate and polyplacate pollen grains from Glossopteridales (1.3–4.0%) include *Protohaploxylinus amplus*, *P. goraiensis*, *P. limpidus*, *Protohaploxylinus*

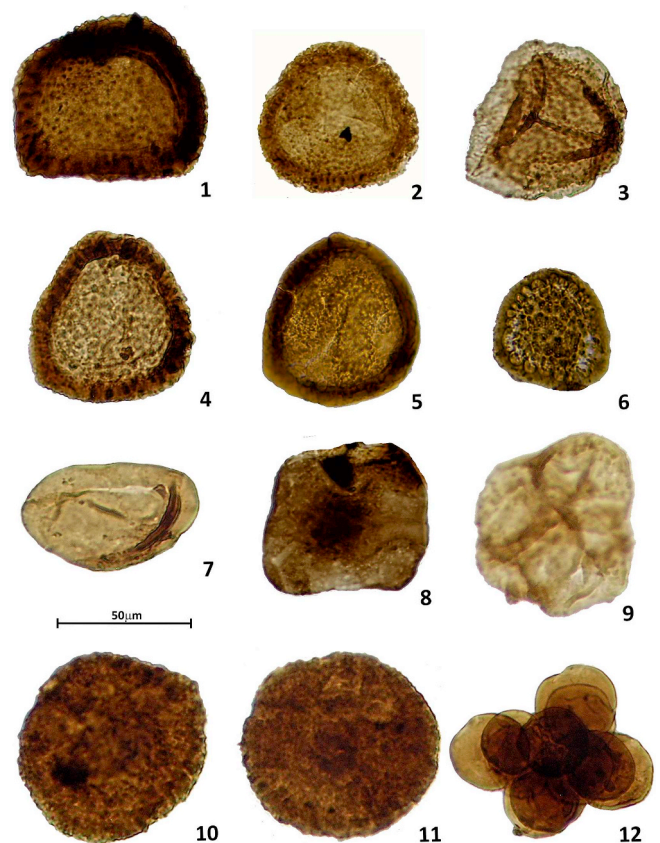


Plate 2. 1. *Lundbladispora braziliensis* (Pant and Srivastava) Marques-Toigo and Pons emend. Marques-Toigo and Picarelli (1984); Barro Branco coal seam, Sample CR1, slide 1b, MC 1125–171; 2. *Lundbladispora braziliensis* (Pant and Srivastava) Marques-Toigo and Pons emend. Marques-Toigo and Picarelli (1984); Bonito coal seam, Sample CR5, slide 4a, MC 1450–135; 3. *Spelaotriletes triangulus* Neves and Owens 1966; Bonito coal seam, Sample CR5, slide 2a, MC 1360–105; 4. *Lundbladispora braziliensis* (Pant and Srivastava) Marques-Toigo and Pons emend. Marques-Toigo and Picarelli (1984); Barro Branco coal seam, Sample CR1, slide 1a, MC 1330–210; 5. *Lundbladispora riobonitensis* Marques-Toigo and Picarelli (1984); Sample CR6, slide 1, MC 1003–435; 6. *Vallatisporites* sp.; Barro Branco coal seam, Sample CR1, slide 2, MC 1068–398; 7. *Laevigatosporites vulgaris* Ibrahim 1933; Barro Branco coal seam, Sample CR1, slide 1b, MC 1155–70; 8. *Tetraporina* sp.; Barro Branco coal seam, Sample CR1, slide 1b, MC 1215–90; 9. *Quadrisporites* sp.; Bonito coal seam, Sample CR5, slide 1a, MC 1400–190; 10. *Portalites gondwanensis* Nahuy, Alpern and Ybert 1968; Bonito coal seam, Sample CR5, slide 4b, MC 1391–105; 11. *Portalites gondwanensis* Nahuy, Alpern and Ybert 1968; Bonito coal seam, Sample CR5, slide 4a, MC 1475–90; 12. Fungi spores cluster; Bonito coal seam, Sample CR5, slide 1–177; MC 983–280.

spp., *Vittatina cf. subsaccata*, *V. vittifera* and *Vittatina* spp. Samples CR3 and CR6 do not contain any monosaccate pollen, and bisaccate pollen are not well preserved. A relative frequency of bisaccate pollen of Barro Branco coal seams is also higher than Bonito coal seam.

Microplanktonic and chlorophyceae algae like elements are rare to relatively common (0–5.3%) and include *Leiosphaeridia* sp. and *Tetraporina punctata*, *Tetraporina* spp.; fungi are represented by *Portalites gondwanensis* and spores clusters. Their frequency is higher than in the Bonito coal seam.

Based on occurrence of several index species such as *Vittatina cf. subsaccata*, *V. vittifera*, the Barro Branco seam coal was dated from *Vittatina costabilis* Zone. The presence of *Protohaploxylinus goraiensis*, *Protohaploxylinus limpidus* and abundance of *Granulatisporites austroamericanus* allowed us to indicate the *Protohaploxylinus goraiensis* Subzone (lower subzone of *Vittatina costabilis* Zone). No *Hamiapollenites karrooensis* Subzone species were documented.

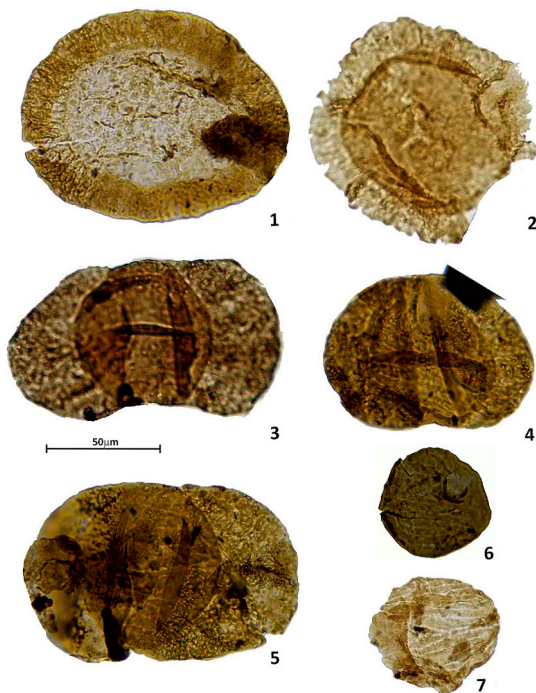


Plate 3. 1. *Cannanoropollis janakii* Potonié and Sah 1960; Bonito coal seam, Sample CR5, slide 2, MC 993–482; 2. *Plicatipollenites malabarensis* (Potonie and Sah) Foster 1975; Bonito coal seam, Sample CR5, slide 4b, MC 1260–155; 3. *Limitisporites* cf. *rectus* Leschik 1956; Bonito coal seam, Sample CR5, slide 4b, MC 1255–65; 4. *Protohaploxylinus goraiensis* (Potonié and Lele) Hart 1964; Barro Branco coal seam, Sample CR1, slide 2, MC 1055–223; 5. *Protohaploxylinus amplus* (Balme and Hennelly) Hart 1964; Bonito coal seam, Sample CR5, slide 2, MC 1062–446; 6. *Vittatina costabilis* Wilson 1962; Bonito coal seam, Sample CR5, slide 2, MC 1063–260; 7. *Vittatina* sp.; Bonito coal seam, Sample CR5, slide 2a, MC 1155–135.

5. Previous palynostratigraphic studies in the Rio Bonito Formation, Paraná Basin

Previous palynostratigraphic studies in the Rio Bonito Formation are extensive and well known. Palynoassemblages are reported from São Paulo Paraná, Santa Catarina and Rio Grande do Sul states (Ybert, 1975; Pons, 1976; Marques-Toigo and Piccarelli, 1985; Marques-Toigo, 1988, 1991; Dias, 1993; Souza et al., 1999, 2001; Souza and Callegari, 2004; Mori and Souza, 2012; Mori et al., 2011).

The first palynostratigraphic zonation scheme for late Paleozoic succession in the PB was presented by Daemon (1966) and Daemon and Quadros (1970), with subsequent contributions from Marques-Toigo (1988, 1991), Souza (2000), Souza and Marques-Toigo (2003, 2005) and Souza (2006). Most of the palynological studies are associated with macroflora research in the coalfields of the Rio Grande do Sul State (Guerra-Sommer et al., 1984, 2008b; Cazzulo-Klepzig et al., 2005, 2007; Iannuzzi, 2010; Simas et al., 2012, 2013), likewise on the Santa Catarina State coalfield (Machado, 1972; Bortoluzzi et al., 1978; Bernardes-de-Oliveira et al., 2016). Other palynological works were performed in coal levels and/or adjacent outcrop strata in the coal seams of Rio Bonito Formation (Dias-Fabricao, 1981; Marques-Toigo and Corrêa da Silva, 1984; Guerra-Sommer et al., 1991; Cazzulo-Klepzig et al., 2007; Boardman et al., 2012a).

One of the reference sections of the Rio Bonito Formation, the Quitéria outcrop (located SW of Porto Alegre town, Rio Grande do Sul State), due to their paleontological and palynological contents of the coal seam (Jasper et al., 2006; Boardman et al., 2012a), was assigned to the Irapuá Coal Bed (a coal seam that are deposited below Barro Banco Coal Bed). Palynofloras are typical of *Vittatina costabilis* Zone based on

the presence of *Vittatina costabilis*, *V. subsaccata* and *V. vittifera*, all together with *Protohaploxylinus limpidus* and *Stellapollenites talchirensis* and common presence of *Granulatisporites austroamericanus* and *Converrucosporites confluens* that suggest a correlation with the *Protohaploxylinus goraiensis* Subzone (basal part of *Vittatina costabilis* Zone). No diagnostic species of the *Hamiapollenites karrooensis* Subzone was recovered.

For better understanding the changes in palaeoecological scenario, Mendonça Filho et al. (2013) conducted a palynological and paleobotanical research on the Bonito coal seam in the region of Lauro Müller region (Santa Catarina State), with a forested gymnosperm at the base, to a lycophytes subarborescent plant dominated scenario at the top. More recently, Bernardes-de-Oliveira et al. (2016) studied the macroflora presented in the Siderópolis Member of Rio Bonito Formation (Lauro Muller, Criciúma, São Marcos, and Treviso), but no palynostratigraphy data is presented.

Outside Brazil, a few studies on palynostratigraphy of the Cisuralian were developed in the Chaco-Paraná Basin (Vergel, 1993; Archangelsky and Vergel, 1996; Playford and Dino, 2002), in central-western basins (e.g., Césari and Gutiérrez (2001); di Pasquo et al., 2010; Césari et al. (2013); Gutiérrez et al. (2010a), 2010b, Balarino and Gutiérrez (2006); Balarino et al. (2015) Colorado Basin (Balarino, 2012, 2014), and Paganzo Basin (Césari and Chiesa, 2017) in Argentina. In Uruguay, palynostratigraphic studies were developed in the PB (Gutiérrez et al., 2010a; Beri et al., 2011), and in Paraguay in the PB (Pérez Loinaze et al., 2010).

The Bonito and Barro Branco coal seams palynomorph assemblages identified in the present research are assigned to the lower Permian age. The first palynostratigraphic zonation scheme established for late Paleozoic succession in the PB was presented by Daemon and Quadros (1970), later modified by Marques-Toigo (1991), Souza (2000), that proposed an integrated palynostratigraphic scheme for the southern and northeastern region of the PB, improving the original proposal, and including new data, as presented in Souza and Marques-Toigo (2003, 2005) and Souza (2006).

The biostratigraphic zonation scheme comprehends four interval zones, from base to top: *Ahrensiporites cristatus*, *Crucisaccites monoletus* (assigned to the late Carboniferous), *Vittatina costabilis* and *Lueckisporites virkkiae* (of Lower Permian age).

The *Vittatina costabilis* zone is defined by the first appearance of the genus *Vittatina* (namely *V. saccata*, *V. subsaccata*, *V. costabilis* and *V. vittifera*), *Protohaploxylinus goraiensis*, *P. limpidus* and *Illinites unicus*. The upper limit of this zone is characterized by the first appearance of the key species of the overlying *Lueckisporites virkkiae*. The *Vittatina costabilis* interval zone is divided into two subzones, the *Protohaploxylinus goraiensis* Subzone (based on the first occurrence of *Protohaploxylinus goraiensis*, *P. limpidus* and *Illinites unicus*) and the *Hamiapollenites karrooensis* Subzone (defined by the first occurrence of *Hamiapollenites karrooensis*, *Striatopodocarpites fusus* and *Staurosaccites cordubensis* (Souza and Marques-Toigo, 2003, 2005; Souza, 2006).

The *Lueckisporites virkkiae* zone is defined by the first occurrence of the genus *Lueckisporites* (*L. virkkiae*, *L. stenotaeniatus* and *L. agoulaensis*), *Marsupipollenites striatus*, *Protohaploxylinus hartii*, *P. microcorpus*, *Lunatisporites variesectus*, *Alisporites nuthallensis*, *Striatopodocarpites pantii*, *Weylandites lucifer*, *Staurosaccites cordubensis* and by the last occurrence of *Hamiapollenites karrooensis*, *Lundbladispora riobonitensis* and *Potoniopsis novicus*. The top of the zone is marked by the disappearance of the *Lueckisporites* genus (Souza and Marques-Toigo, 2003, 2005; Souza, 2006).

6. Discussion

6.1. Biostratigraphic results

Based on palynostratigraphy established for Souza and Marques-Toigo (2003, 2005) and Souza (2006), samples collected in Bonito and

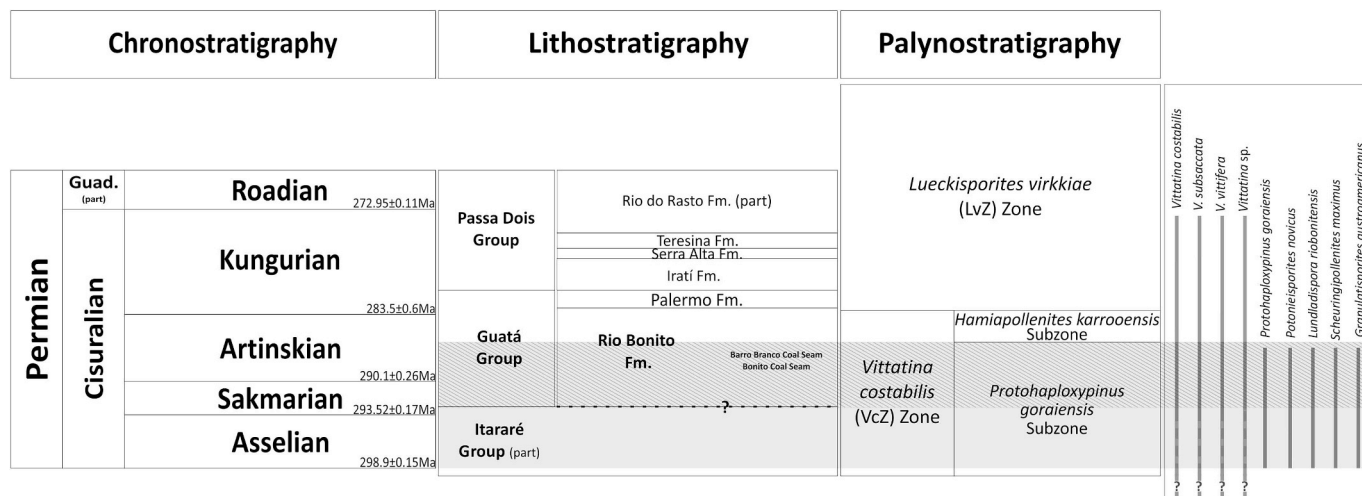


Fig. 4. Stratigraphic distribution of the selected species obtained in the studied Bonito and Barro Branco Coal Seams, Rio Bonito Formation in the Criciúma coal region, Brazil. Lithostratigraphy follows Schneider et al. (1974). Palynostratigraphy according Souza and Marques-Toigo (2003, 2005) and Souza (2006).

Barro Branco coal seams are correlated with *Vittatina costabilis* Zone, and *Protohaploxypinus goraiensis* Subzone, of Asselian? to Artinskian age (lower Cisuralian, Lower Permian) (see Fig. 4). In according to Souza and Marques-Toigo (2003, 2005) and Souza (2006), some key-species are restricted from this age, such as *Protohaploxypinus goraiensis* and *Vittatina* spp., likewise some other diagnostic species of spores, such as *Granulatisporites austroamericanus*. No *Hamiapollenites karrooensis*, key-species from upper biozone, was achieved.

Consequently, the studied assemblages obtained from the Bonito and Barro Branco coal seam, in the Rio Bonito Formation, confirm previous palynostratigraphic age determinations established for the coals of southern PB (Souza and Marques-Toigo, 2003, 2005; Souza, 2006; Mori and Souza, 2010; Mori et al., 2011; Boardman et al., 2012a, 2012b), assigned to the *Vittatina costabilis* Interval Zone, *Protohaploxypinus goraiensis* Subzone dated as Cisuralian age (Lower Permian), based on the occurrence of taxa typical of this unit, some of them stratigraphically restricted to this Interval Zone.

The available radiometric ages in Rio Bonito Fm. (e.g., Rocha-Campos et al., 2008; Santos et al., 2006; Mori and Souza, 2012; Guerra-Sommer et al., 2008a, 2008b, Simas et al., 2012, Cagliari et al., 2014, 2015; Griffts et al., 2018) and palynomorph data suggests a depositional age of lower Cisuralian age, ranging from Asselian? to Artinskian age. Nevertheless, radiometric dating presents some disparities and more studies are needed.

The *Vittatina costabilis* interval Zone is recognized in the lower Itararé Group and the key specie *V. costabilis* is recognized as being a lower Permian marker.

6.2. Palaeoenvironmental results

The palynological assemblages identified in the Bonito and Barro Branco coal seams present a very similar microflora composition, showing a clear dominance of arborescent and herbaceous lycophytes in the peat-forming plant community.

The Barro Branco coal seam shows a relatively higher frequency of algae like composition than in the Bonito coal seam, suggesting a possible fluvial or lagoonal facies influence.

The paleoenvironments of the Bonito and Barro Branco coal seams that generated the palynological assemblages studied can be correlated with those described by Cazzulo-Klepzig et al. (2005, 2007) and Beri et al. (2013), for the most important coal seams in the southernmost PB.

7. Conclusions

The main results from this study are summarized below:

- All studied samples from the Criciúma coal region, southern area of Santa Catarina State, southern PB, were positive for palynology. Twenty-seven (27) species of spores, fourteen (14) species of pollen and four (4) species of microplanktonic, chlorophyceae algae like and fungi were identified;
- The spore-pollen assemblages recovered from Bonito and Barro Branco coal seams are assigned to the *Vittatina costabilis* Interval Zone, *Protohaploxypinus goraiensis* Subzone of the PB, of Asselian?-Artinskian age (Lower Permian);
- The palynological assemblages identified in the Bonito and Barro Branco coal seams present a very similar microflora composition, showing a clear dominance of arborescent and herbaceous lycophytes in the peat-forming plant community;
- The Barro Branco coal seam shows a relatively higher frequency of algae like composition than in the Bonito coal seam, suggesting a possible fluvial or lagoonal facies influence;
- The paleoenvironments of the Bonito and Barro Branco coal seams that generated the palynological assemblages studied can be correlated with those described by Cazzulo-Klepzig et al. (2005, 2007) for the most important coal seams in the southernmost PB.

Acknowledgements

The authors would like to thank the staff of Lauro Muller, 101, Carbonífera Siderópolis, Bonito I, Fontanela Mines for the support in the field work, for mining sample access and complementary information; LNEG's technicians Irene Sousa, for laboratory support and sample preparation; PAS thanks to CNPq (310127/2014-6 and 461628/2014-7 Projects). Special thanks are also due the reviewers for the final revision of the manuscript. The authors would like to thank the anonymous reviewers for all constructive comments about the manuscript.

Palynomorph taxa listed in alphabetic order:

Spore

Apiculatisporites spp.
Brevitriletes cornutus (Balme and Hennelly) Backhouse 1991
Calamospora plicata (Luber and Walts) Hart 1965
Calamospora liquida Kosanke 1950

- Calamospora sinuosa* Leschik 1955
Calamospora spp.
Convruccosporites confluens (Archangelsky and Gamero) Playford and Dino (2002).
Cristatisporites lestai Archangelsky and Gamero, 1979
Cristatisporites inconstans Archangelsky and Gamero, 1979
Cristatisporites spp.
Cyclogranisporites parvigranulosus (Leschik) Ybert (1975).
Cyclogranisporites spp.
Diatomozonotriletes subbaculiferous (Nahuys, Alpern and Ybert) Césari et al., 1995
Diatomozonotriletes sp.
Granulatisporites austroamericanus Archangelsky and Gamero, 1979
Horriditriletes filiformis (Balme and Hennelly) Backhouse 1991
Horriditriletes gondwanensis (Tiwari and Moiz) Foster 1975
Horriditriletes ramosus (Balme and Hennelly) Bharadwaj and Saluha 1964
Horriditriletes spinobaculosus (Marques-Toigo) Souza and Callegari, 2004.
Horriditriletes uruguayensis (Marques-Toigo) Archangelsky and Gamero, 1979
Horriditriletes spp.
Kraeuselisporites spp.
Laevigatosporites vulgaris (Ibrahim) Ibrahim 1933
Leiotriletes directus Balme and Hennelly 1956
Leiotriletes virkii Tiwari 1965
Leiotriletes spp.
Lophotriletes spp.
Lundbladisporea braziliensis (Pant and Srivastava) Marques-Toigo and Pons emend. Marques-Toigo and Picarelli (1984).
Lundbladisporea riobonitensis Marques-Toigo and Picarelli (1984).
Lundbladisporea spp.
Microbaculatispora trisina (Balme and Hennelly) Anderson 1977
Punctatisporites gretensis Balme and Hennelly 1956
Raistrickia spp.
Retusotriletes nigrifellus (Lüber) Foster 1979
Retusotriletes spp.
Spelaeotriletes triangulus Neves and Owens 1966
Vallatisporites arcuatus (Marques-Toigo) Archangelsky and Gamero, 1979
Vallatisporites splendens Staplin and Jansonius 1964
Vallatisporites sp.
- Pollen**
- Alisporites* spp.
Cannanoropollis janakii Potonié and Sah 1960
Cannanoropollis cf. *triangulatus* (Metha) Bose and Maheshwari 1968
Cannanoropollis spp.
Florinites spp.
Limitisporites rectus Leschik 1956
Limitisporites spp.
Plicatipollenites malabarensis (Potonié and Sah) Foster 1975
Potoniopsis novicus Bhardwaj emend. Poort and Veld 1997
Protohaploxylinus amplus (Balme and Hennelly) Hart 1964
Protohaploxylinus goraiensis (Potonié and Lele) Hart 1964
Protohaploxylinus limpoides (Balme and Hennelly) Balme and Playford 1967
Protohaploxylinus spp.
Pteruchipollenites indarraensis (Segroves) Foster 1979
Pteruchipollenites spp.
Scheuringipollenites maximus (Hart) Tewari 1973
Scheuringipollenites spp.
Staurosaccites cordubensis Archangelsky and Gamero, 1979
Vesicaspora spp.
Vittatina costabilis Wilson 1962
Vittatina cf. *subsaccata* Samoilovich 1953
Vittatina vittifera (Luber and Valts) Samoilovich 1953
Vittatina spp.
- Chlorophycean algae**
- Leiosphaeridia* spp.
Quadriflorites spp.
Tasmanites spp.
Tetraporina punctata (Tiwari and Navale) Kar and Bose 1976
Tetraporina spp.
- Fungi**
- Portalites gondwanensis* Nahuys et al. emend Souza et al., 2016
- References**
- Aboarrage, A.M., Lopes, R.C., 1986. Projeto borda leste da Bacia do Paraná: integração geológica e avaliação econômica. Relatório final. Porto Alegre. CPRM 1, 40.
Archangelsky, S., Vergel, M., 1996. Capítulo 2. Cuenca Chacoparanense. Paleontología, bioestratigrafía y paleoecología. In: Archangelsky, S. (Ed.), El Sistema Pérmico en la República Argentina y en la República Oriental del Uruguay. Academia Nacional Ciencias, Córdoba, pp. 40–44.
Archangelsky, S., Gamero, J.C., 1979. Palinología del Paleozoico Superior en el subsuelo de la Cuenca Chacoparanense, República Argentina. I. Estudio sistemático de los palinomorfos de tres perforaciones de la Provincia de Córdoba. Rev. Española Micropaleontol. 11, 417–478.
Balarino, M.L., 2012. Palinología del Pérmico de la Cuenca Claromeco-Colorado, Argentina. Ameghiniana 49, 343–364.
Balarino, M.L., 2014. Permian palynostratigraphy of the claromeco basin, Argentina. Alcheringa 38, 317–337.
Balarino, M.L., Correa, G.A., Gutiérrez, P.R., Cariglino, B., Carrevedo, M.L., 2015. The palynology of the La Deheza formation (Carboniferous-Permian; upper palaeozoic), Paganzo Basin, san Juan province, Argentina. Palynol 1–21.
Balarino, M.L., Gutiérrez, P.R., 2006. Palinología de la Formación Tasa Cuna (Pérmico Inferior), Córdoba, Argentina: sistemática y consideraciones bioestratigráficas. Ameghiniana 43, 437–460.
Beri, Á., Mori, A.O., Tejera, L., Martínez-Blanco, X., Souza, P.A., 2013. Palynodiversity patterns from Cisuralian deposits of the southernmost Paraná Basin, western Gondwana. In: In: Lucas, S.G. (Ed.), The Carboniferous-Permian Transition, New Mexico Museum of Natural History and Science, vol. 60. pp. 17–21.
Beri, Á., Gutiérrez, P., Balarino, L., 2011. Palynostratigraphy of the late palaeozoic of Uruguay, Paraná Basin. Rev. Palaeobot. Palynol. 167, 16–29.
Bernardes-de-Oliveira, M.E., Mune, S., Garcia, M.J., Iannuzzi, R., Guerra-Sommer, M., Jasper, A., Kavali, P.S., Shivanna, M., Pereira, K.G., 2016. The Artinskian Siderópolis member macroflora, Rio Bonito Formation and its stratigraphical correlation with other early permian macrofloras of Paraná Basin, Brazil. Geologia USP, sér. Cient. São Paulo 16 (4), 65–85.
Boardman, D.R., Souza, P.A., Iannuzzi, R., Mori, A.L.O., 2012a. Paleobotany and palynology of the Rio Bonito Formation (lower permian, Paraná Basin, Brazil) at the Quitéria outcrop. Ameghiniana 49, 451–472.
Boardman, D., Iannuzzi, R., Souza, P.A., Lopes, R., 2012b. Paleobotanical and palynological analysis of faxinal coalfield (lower permian, Rio Bonito Formation, Paraná Basin), Rio Grande do sul, Brazil. Int. J. Coal Geol. 102, 1–25.
Bortoluzzi, C.A., Piccoli, A.E.M., Bossi, G.E., Guerra-Sommer, M., Marques-Toigo, M., Pons, M.E.H., Wolf, M., Silva, Z.C.C., 1978. Pesquisa geológica na bacia Carbonífera de Santa Catarina. Pesquisas 11, 33–192.
Cagliari, J., Lavina, E.L.C., Philipp, R.P., Tognoli, F.M.W., Basei, M.A.S., Faccini, U.F., 2014. New Sakmarian ages for the Rio Bonito formation (Paraná Basin, southern Brazil) based on LA-ICP-MS U–Pb radiometric dating of zircons crystals. J. S. Am. Earth Sci. 56, 265–277.
Cagliari, J., Philipp, R.P., Buso, V.V., Netto, R.G., Hillebrand, P.K., Lopes, R.C., Basei, M.A.S., Faccini, U.F., 2015. Age constraints of the glaciation in the Paraná Basin: evidence from new U–Pb dates. J. Geol. Soc. 173, 871–874.
Cazzulo-Klepzig, M., Guerra-Sommer, M., Menegat, R., 2005. Palynology and palaeobotany in the reconstruction of landscape units from the Candiota coalfield, permian of Paraná Basin, Brazil. Rev. Bras. Palaontol. 8 (1), 83–98.
Cazzulo-Klepzig, M., Guerra-Sommer, M., Menegat, R., Simas, M.W., Mendonça Filho, J.G., 2007. Peat-forming environment of permian coal seams from the faxinal coalfield (Paraná Basin) in southern Brazil, based on palynology and palaeobotany. Rev. Bras. Palaontol. 10 (2), 117–127.
Césari, S.N., Chiesa, J.O., 2017. Palynology of the bajo de Veliz formation, central-western Argentina: implications for Carboniferous-permian transition biostratigraphy. J. S. Am. Earth Sci. 78, 238–249.
Césari, S.N., Gutiérrez, P.R., 2001. Palynostratigraphy of upper paleozoic sequence in central-western Argentina. Palynology 24, 113–146.
Césari, S.N., Pérez Loinaze, V.S., Limarino, C.O., 2013. La Biozona Pakhapites fusus -Vittatina subsaccata en la Formación Patquía (Pérmico), Precordillera de La Rioja Argentina. Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales 15, 71–88.
Césari, S., Archangelsky, S., Seoane, L.V., 1995. Palinología del Paleozoico Superior de la

- perforación Las Mochas, Provincia de Santa Fé, Argentina. *Ameghiniana* 32, 73–106.
- Daemon, R.F., 1966. Ensaio sobre a distribuição e zoneamentos dos esporomorfos do Paleozóico Superior da Bacia do Paraná. *Boletim Técnico da Petrobrás, Rio de Janeiro* 9 (2), 81–211.
- Daemon, R.F., Quadros, L.P., 1970. Bioestratigrafia no Neopaleozóico da Bacia do Paraná. 24^o Congresso Brasileiro de Geologia (Brasília). Anais 359–412.
- Della Fávera, J.C., Chaves, H.A.F., Pereira, E., Medeiros, M.A.M., Filho Câmara, L.M., 1992. Geologia da área de Candiota. Bacia do Paraná, Rio Grande do Sul. 1^o Curso de Projetos de Análise de Bacias, pp. 1–68.
- Della Fávera, J.C., Chaves, H.A.F., Pereira, E., Medeiros, M.A.M., Filho Câmara, L.M., 1994. Evolução geológica da sequência permiana da região de Candiota-RS – Brasil. *Publicações Acta Geologia Leopoldensia* 39 (1), 235–246.
- di Pasquo, M., Souza, P.A., Kavali, P.S., Felix, C., 2018. Seasonally warmer and humid climates in a lower paleolatitude position of southern Brazil (Paraná Basin): new findings of the *Lueckisporites virkiae* zone (late Cisuralian-Guadalupian) in the Serra do Rio do Rastro and neighboring localities. *J. S. Am. Earth Sci.* 82, 143–164.
- di Pasquo, M.M., Vergel, M.M., Azcuy, C.L., 2010. Pennsylvanian and Cisuralian palynofloras from the los Sauces area, La Rioja province, Argentina: chronological and palaeoecological significance. *International Journal of Coal Geology* “Special Issue: Hermann Pfefferkorn 83, 276–291.
- Dias, M.E., 1993. Palinologia do Grupo Itararé na porção centro-sul do Rio Grande do Sul, Permiano da Bacia do Paraná, Brasil. *Pesquisas* 20 (2), 119–131.
- Dias-Fabrizio, M.E., 1981. Palinologia da Formação Rio Bonito na Área de Gravataí – morungava, Rio Grande do Sul. *Pesquisas, Porto Alegre* 14, 69–130.
- Griffis, N.P., Mundi, R., Montañez, I.P., Isbell, J., Fedorchuk, N., Vesely, F., Iannuzzi, R., Yin, Q., 2018. A new stratigraphic framework built on U-Pb single-zircon TIMS ages and implications for the timing of the penultimate icehouse (Paraná Basin, Brazil). *Geol. Soc. Am. GSA Bull.* 130 (5-6), 848–858.
- Guerra-Sommer, M., Cazzulo-Klepzig, M., Formoso, M.L.L., Menegat, R., Mendonça Filho, J.G., 2008a. U-Pb dating of tonstein layers from a coal succession of the southern Paraná Basin (Brazil): a new geochronological approach. *Gondwana Res.* 14, 474–482.
- Guerra-Sommer, M., Cazzulo-Klepzig, M., Menegat, R., Formoso, M.L.L., Basei, M.A.S., Barboza, E.G., Simas, M.W., 2008b. Geochronological data from Faxinal coal succession in the Southern Paraná Basin: a preliminary approach combining radiometric U/Pb age and palynostratigraphy. *J. S. Am. Earth Sci.* 25 (2), 246–256.
- Guerra-Sommer, M., Marques-Toigo, M., Corrêa da Silva, Z.C., 1991. Original biogeos and coal deposition in southern Brazil (lower permian, parana basin). *Bull. Soc. Geol. Fr.* 162 (2), 227–237.
- Guerra-Sommer, M., Marques-Toigo, M., Paim, P.S.G., Henz, G.I., Silveira, J.B.R., Backeuser, Y., 1984. Estudo microflorístico e petrológico da Mina do Faxinal, Formação Rio Bonito (Permiano), RS. *Boletim IG/USP* 15, 73–83.
- Gutiérrez, P.R., Balarino, M.L., Beri, A., 2010a. Palynology of the lower permian of Paraná Basin, Uruguay. *J. Syst. Palaeontol* 8, 459–502.
- Gutiérrez, P.R., Correa, G.A., Carrevedo, M.L., 2010b. Primer registro de palinomorfos de edad pérmica en la Formación Río Francia (Paleozóico Superior, San Juan, Argentina). *Rev. Mus. Arg. Ci. Nat* 12, 203–216.
- Holz, M., França, A.B., Souza, P.A., Iannuzzi, R., Rohn, R.A., 2010. Stratigraphic chart of the late Carboniferous/Permian succession of the eastern border of the Paraná basin, Brazil, South America. *J. S. Am. Earth Sci.* 29, 381–399.
- Iannuzzi, R., 2010. The flora of Early Permian coal measures from the Paraná Basin in Brazil: a review. *Int. J. Coal Geol.* 83, 229–247.
- Jäspér, A., Menegat, R., Guerra-Sommer, M., Cazzulo-Klepzig, M., Souza, P.A., 2006. Depositional cyclicity and paleoecological variability in an outcrop of Rio Bonito Formation, early permian, Paraná Basin, Rio Grande do sul, Brazil. *J. S. Am. Earth Sci.* 21, 276–293.
- Krebs, A.S.J., Menezes Filho, N.R., 1984. Projeto Mapeamento Geológico para Carvão área de Taió-Rio do Sul, SC; relatório final, vol. 1 DNP/CPRM, Porto Alegre (unpublished data).
- Machado, E.R., 1972. O carvão Neopaleozóico do Brasil Meridional. Simpósio Internacional sobre os sistemas Carbonífero e Permiano na América do Sul. *An. Acad. Bras. Cienc.* 44, 209–235.
- Marques-Toigo, M., 1988. Palinologia, bioestratigrafia e paleoecologia do Neopaleozóico da Bacia do Paraná nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, Brasil. Porto Alegre. Tese de Doutorado em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.
- Marques-Toigo, M., 1991. Palynobiostatigraphy of the southern Brazilian neopaleozoic Gondwana sequence. 7^o International Gondwana Symposium (São Paulo), Proceedings 503–515.
- Marques-Toigo, M., Corrêa da Silva, Z.C., 1984. On the origin of Gondwana South Brazilian coal measures. *Comun. Serv. Geol. Port.* 70 (2), 151–160.
- Marques-Toigo, M., Picarelli, T., 1985. On the morphology, botanical affinities of *Lundbladispora* Balme 1963, in the permian of the parana basin, Brazil. *Bol. Inst. Geociênc. USP* 15, 46–52.
- Medeiros, R.A., Thomas Filho, A., 1973. Fácies e ambientes deposicionais da Formação Rio Bonito. 27^o Congresso Brasileiro de Geologia (Aracaju). Anais 3, 3–12.
- Mendonça Filho, J.G., Sommer, M.G., Klepzig, M.C., Mendonça, J.O., Silva, T.F., Kern, M.L., Menezes, T.R., Jasper, A., Silva, M.C., Santos, L.G.C., 2013. Permian carbonaceous rocks from the Bonito coalfield, Santa Catarina, Brazil: organic facies approaches. *Int. J. Coal Geol.* 111, 23–36.
- Milani, E.J., 1997. Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica do Gondwana sul-oriental. PhD Thesis. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Porto Alegre, Brazil.
- Milani, E.J., Melo, J.H.G., Souza, P.A., Fernandes, L.A., França, A.B., 2007. Bacia do Paraná. *Bol. Geociências Petrobras* 15 (2), 265–287.
- Miltzarek, G.L., Corrêa da Silva, Z.C., 1992. Variações composicionais dos carvões submetidos aos ensaios de meio denso, Jazida do Faxinal, RS. *Egataea. Rev. Esc. Enferm. USP* 20, 43–54.
- Mori, A., Souza, P.A., 2010. Palinologia das formações Rio Bonito e Palermo (Permiano Inferior, Bacia do Paraná) em Candiota, Rio Grande do Sul, Brasil: novos dados e implicações bioestratigráficas. *Ameghiniana* 47, 61–78.
- Mori, A., Souza, P.A., Marques, J.C., Lopes, R.C., 2011. A new U–Pb zircon age dating and palynological data from a Lower Permian section of the southernmost Paraná Basin, Brazil: biochronostratigraphical and geochronological implications for Gondwanan correlations. *Gondwana Res.* 21, 654–669.
- Mori, A., Souza, P.A., 2012. Análise Palinoestratigráfica dos Depósitos Permianos (Poços HN-05-RS e HN-25-RS) do Sul da Bacia do Paraná. *Ameghiniana* 49 (3), 319–342.
- Pérez Loainze, V.S., Césari, S.N., López Gamundí, O., Buatois, L., 2010. Palynology of the permian san miguel formation (western Paraná Basin, Paraguay): gondwanan in central-western Argentina. *Palynology* 24, 113–146.
- Playford, G., Dino, R., 2002. Permian palynofloral assemblages of the Chaco-Paraná Basin, Argentina: systematics and stratigraphic significance. *Rev. Espanola Micropaleontol.* 34, 235–288.
- Pons, M.E., 1976. Estudo palinológico do sub. Grupo Itararé, na “Coluna white” permiano inferior, Santa Catarina. Part. I. *Ameghiniana, Buenos Aires* 3 (2), 109–125.
- Riding, J.B., Warny, S., 2008. *Palynological Techniques*. American Association of Stratigraphic Palynologists Foundation, Dallas.
- Rocha-Campos, A.C., dos Santos, P.R., Canuto, J.R., 2008. Late paleozoic glacial deposits of Brazil: parana basin. In: In: Fielding, C.R., Frank, T.D., Isbell, J.L. (Eds.), *Resolving the Late Paleozoic Ice Age in Time and Space: Geological Society of America Special Paper*, vol. 441, pp. 97–114.
- Schneider, R.L., Muhlmann, H., Tommasi, E., Medeiros, R.A., Daemon, R.F., Nogueira, A.A., 1974. Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. Congresso Brasileiro De Geologia, 28, Porto Alegre. Porto Alegre: SBG 1, 41–65.
- Santos, R.V., Souza, P.A., Alvarenga, C.J.S., Dantas, E.L., Pimentel, M.M., Oliveira, C.G., Araujo, L.M., 2006. Shrimp U-Pb zircon dating and palynology of bentonitic layers from the permian irati formation, Paraná Basin, Brazil. *Gondwana Res.* 9, 456–463.
- Simas, M.W., Guerra-Sommer, M., Cazzulo-Klepzig, M., Menegat, R., Santos, J.O.S., Ferreira, J.A.F., Degani-Schmidt, I., 2012. Geochronological correlation of the main coal interval in Brazilian Lower Permian: radiometric dating of tonstein and calibration of biostratigraphic framework. *J. S. Am. Earth Sci.* 39, 1–15.
- Simas, M.W., Guerra-Sommer, M., Mendonça Filho, J.G., Cazzulo-Klepzig, M., Formoso, M.L.L., Degani-Schmidt, I., 2013. An accurate record of volcanic ash fall deposition as characterized by dispersed organic matter in a lower Permian tonstein layer (Faxinal Coalfield, Paraná Basin, Brazil). *Geol. Acta* 11, 45–57.
- Souza, P.A., 2000. Palinoestratigrafia do Subgrupo Itararé, Carbonífero/Permiano, na porção nordeste da Bacia do Paraná (SP/PR, Brasil). Programa de Pós-Graduação em Geologia Sedimentar. PhD Thesis. Universidade de São Paulo, pp. 1–199.
- Souza, P.A., 2006. Late Carboniferous palynostratigraphy of the Itararé Subgroup, northeastern Paraná Basin, Brazil. *Review of Palaeobotany and Palynology* 138, 9–29.
- Souza, P.A., Callegari, L.M., 2004. An early permian palynoflora from the Itararé Subgroup, Paraná Basin, Brazil. *Rev. Espanola Micropaleontol.* 36, 439–450.
- Souza, P.A., Lages, L.C., Rohn-Davies, R., 2001. New palynological data from the Aliança Coal Mine (Cerquilho, São Paulo State), Upper Paleozoic Tubarão Group, Northeastern Paraná Basin, Brazil. *Resúmenes II Simpósio Argentino del Paleozóico Superior*. Trelew. 27-27.
- Souza, P.A., Marques-Toigo, M., 2003. An overview in the palynostratigraphy of the upper paleozoic strata of the Brazilian Paraná Basin. *Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales* 5, 205–214.
- Souza, P.A., Marques-Toigo, M., 2005. Progress on the palynostratigraphy of the Paraná strata in Rio Grande do sul state, Paraná Basin, Brazil. *An. Acad. Bras Ciências* 77, 353–365.
- Souza, P.A., Petri, S., Dino, R., 2003. Late Carboniferous palynology from the Itararé Subgroup (Paraná Basin) at Araçoiaba da Serra, São Paulo State, Brazil. *Palynology* 27, 39–74.
- Souza, P.A., Vesely, F.F., Assine, M.L., 1999. Contribuição palinológica ao conhecimento do Subgrupo Itararé na Serra dos Paes, sul do Estado de São Paulo. *Rev. Institut. Geol.* 20 (1/2), 21–27.
- Vergel, M.M., 1993. Palinoestratigrafia de la secuencia neopaleozoica de la Cuenca Chacoparanense, Argentina. 12^o Congress International de la Stratigraphie et Geologie du Carbonifere et Permien (Buenos Aires 1991). *Comptes Rendus* 1, 201–211.
- White, I.C., 1908. Comissão de Estudos das Minas de Carvão de Pedra do Brasil – Relatório Final. DNP/CPRM, Edição Fac-similar, Brasília, pp. 1–617 1988.
- Wood, G.D., Gabriel, A.M., Lawson, J.E., 1996. Palynological techniques processing and microscopy. In: In: Jansonius, J., McGregor, D.C. (Eds.), *Palynology: Principles and Applications*. American Association Stratigraphic Palynology Foundation, vol. 1. pp. 29–50.
- Ybert, J.P., 1975. Etude des miospores du bassin houiller de Candiota-Hulha Negra, Rio Grande do Sul, Brésil. *Pesquisas* 5, 181–226.
- Zalán, P.V., Wolff, S., Conceição, J.C., Marques, A., Astolfi, M.A., Vieira, M.I.S., Appi, C.J., Zanotto, O.A., 1990. Bacia do Paraná. cord In: Raja Gabaglia, G.P., Milani, E.J. (Eds.), *Origem e evolução de bacias sedimentares, Rio de Janeiro, Petrobrás*, 2^a Ed. pp. 135–168.

ANEXO 8

Material amostrado tal-qual

Relatórios dos Ensaios de Isotérmicas de Sorção

ISOTÉRMICAS DE ADSORÇÃO DE DIÓXIDO DE CARBONO

Amostra	T (°C)	mi (water saturation(*)) (g)
CR-01_Brasil	35	98,54

Calibração dos volumes das células

Ensaio	P1(bar)	P2 (bar)	P3 (bar)	P4 (bar)	Vesf. (cm ³)	Va (cm ³)	Vr (cm ³)
1º	29,901	10,0152	31,1343	13,3075	65,2196	200,4783	100,9691
2º	30,851	10,3232	29,6492	12,7124	65,2196	197,6399	99,3919
3º	29,317	9,8213	31,5713	13,4951	65,2196	200,5496	101,0330
4º	29,681	9,9382	30,0569	12,8727	65,2196	198,8344	100,0910

Va(média)	Vr (média)
199,5560	100,4646

Legenda:

- P1 - Pressão inicial sem amostra, célula de referência (células isoladas)
- P2 - Pressão final sem amostra, célula da amostra (células em contacto)
- P3 - Pressão inicial com o padrão, célula de referência (células isoladas)
- P4 - Pressão final com o padrão, célula da amostra (células em contacto)
- Va - Volume da célula da amostra

Cálculo dos volumes da amostra de rocha e dos vazios

Ensaio	P1(bar)	P2 (bar)	P3 (bar)	P4 (bar)	Va (cm ³)	Vc (cm ³)	Vva (cm ³)	VT (cm ³)	R
1º	30,851	10,323	29,6624	12,8758	199,5560	68,7193	130,8366	231,3013	2,3023
2º	29,317	9,8213	29,6746	12,8893	199,5560	68,6360	130,9199	231,3846	2,3031
3º	29,681	9,9382	29,7127	12,8415	199,5560	67,5789	131,9770	232,4416	2,3137

Vc(média)	Vva(média)	VT(média)	R (média)
68,3114294	131,2445	231,7092	2,3064

Legenda:

- P1 - Pressão inicial sem amostra, célula de referência (células isoladas)
- P2 - Pressão final sem amostra, célula da amostra (células em contacto)
- P3 - Pressão inicial com amostra, célula de referência (células isoladas)
- P4 - Pressão final com amostra, célula da amostra (células em contacto)

Vc - Volume da amostra

Vva - Volume de vazios da célula da amostra

Amostra
CR-01_Brasil

INCREMENTOS NA ADSORÇÃO

Interv.	Pi C. A. (bar)	Pi C. A. (psi)	Pf C. A. (bar)	Pf C. A. (psi)	Pi C. R. (bar)	Pi C. R. (psi)	Pf C. R. (bar)	Pf C. R. (psi)
1	0,2382	3,4548528	2,2542	32,694917	4,7317	68,628577	2,0838	30,223435
2	2,2462	32,578885	6,4504	93,556602	11,7612	170,58444	6,2743	91,002447
3	6,4424	93,44057	11,6816	169,42993	18,3987	266,85474	11,4926	166,68867
4	11,6738	169,3168	16,1312	233,96692	23,1544	335,83142	15,9419	231,22132
5	16,0399	232,64271	21,7815	315,91888	30,0018	435,14611	21,6064	313,37923
6	21,7371	315,2749	28,0938	407,47248	36,2603	525,91939	27,9116	404,82985
7	28,0516	406,86041	34,1163	494,82282	41,4585	601,31408	33,9369	492,2208
8	33,9117	491,8553	39,2668	569,52567	45,7704	663,85388	39,0831	566,86128
9	39,1817	568,29138	44,6052	646,95382	50,8551	737,60237	44,4152	644,19806
10	44,5114	645,59335	49,7707	721,87423	55,4235	803,86244	49,5654	718,89656
11		0		0		0		0
12		0		0		0		0

INCREMENTOS NA DESADSORÇÃO

Interv.	Pi C. A. (bar)	Pi C. A. (psi)	Pf C. A. (bar)	Pf C. A. (psi)	Pi C. R. (bar)	Pi C. R. (psi)	Pf C. R. (bar)	Pf C. R. (psi)
1	49,7256	721,2201	48,6056	704,97562	47,0156	681,91426	48,4002	701,9965
2	48,5544	704,23302	45,7505	663,56525	42,098	610,58939	45,5489	660,64125
3	45,7348	663,33754	39,3453	570,66423	30,6727	444,87684	39,1546	567,89832
4	39,3193	570,28713	38,0629	552,0643	36,2483	525,74534	37,8707	549,27663
5	38,0638	552,07736	35,1427	509,70972	31,0332	450,10553	34,9552	506,99022
6	35,3416	512,59457	30,0551	435,91917	22,7305	329,68317	29,8735	433,28524
7	30,0682	436,10917	25,3756	368,0477	18,5296	268,75332	25,2046	365,56752
8	25,3697	367,96213	20,5986	298,76209	13,4484	195,05559	20,4025	295,91786
9	20,6147	298,99561	15,8379	229,7129	8,4864	123,08675	15,6442	226,90348
10	15,8416	229,76657	12,8564	186,46923	8,1409	118,07561	12,6653	183,69751
11	12,8742	186,7274	9,0128	130,72165	2,8101	40,75769	8,8237	127,97894
12		0		0		0		0

ISOTÉRMICAS DE ADSORÇÃO DE DIÓXIDO DE CARBONO

Amostra	T (°C)	mi (water saturation(*)) (g)
CR-02_Brasil	35	100,1

Calibração dos volumes das células

Ensaio	P1(bar)	P2 (bar)	P3 (bar)	P4 (bar)	Vesf. (cm ³)	Va (cm ³)	Vr (cm ³)
1º	29,8502	10,0134	29,7672	12,7613	65,2196	199,2591	100,5838
2º	29,8613	10,0149	30,0513	12,8731	65,2196	199,6796	100,7624
3º	30,0319	10,0836	29,7931	12,7748	65,2196	199,6913	100,9413
4º	29,6111	9,9323	29,8035	12,7759	65,2196	199,2577	100,5695

Va(média)	Vr (média)
199,5433	100,7625

Legenda:

- P1 - Pressão inicial sem amostra, célula de referência (células isoladas)
- P2 - Pressão final sem amostra, célula da amostra (células em contacto)
- P3 - Pressão inicial com o padrão, célula de referência (células isoladas)
- P4 - Pressão final com o padrão, célula da amostra (células em contacto)
- Va - Volume da célula da amostra

Cálculo dos volumes da amostra de rocha e dos vazios

Ensaio	P1(bar)	P2 (bar)	P3 (bar)	P4 (bar)	Va (cm ³)	Vc (cm ³)	Vva (cm ³)	VT (cm ³)	R
1º	29,8502	10,0134	29,5929	12,7168	199,5433	65,8710	133,6723	234,4348	2,3266
2º	29,8613	10,0149	29,7448	12,7163	199,5433	64,7037	134,8397	235,6022	2,3382
3º	30,0319	10,0836	29,6438	12,6202	199,5433	63,4828	136,0605	236,8230	2,3503

Vc(média)	Vva(média)	VT(média)	R (média)
64,68584	134,85751	235,62	2,3384

Legenda:

- P1 - Pressão inicial sem amostra, célula de referência (células isoladas)
- P2 - Pressão final sem amostra, célula da amostra (células em contacto)
- P3 - Pressão inicial com amostra, célula de referência (células isoladas)
- P4 - Pressão final com amostra, célula da amostra (células em contacto)

Vc - Volume da amostra

Vva - Volume de vazios da célula da amostra

Amostra
CR-02_Brasil

INCREMENTOS NA ADSORÇÃO

Interv.	Pi C. A. (bar)	Pi C. A. (psi)	Pf C. A. (bar)	Pf C. A. (psi)	Pi C. R. (bar)	Pi C. R. (psi)	Pf C. R. (bar)	Pf C. R. (psi)
1	0,3144	4,5600576	1,3281	19,262762	2,4969	36,215038	1,1274	16,35181
2	1,3305	19,297572	2,9265	42,445956	4,8031	69,664162	2,7314	39,616226
3	2,9224	42,38649	5,7512	83,415405	9,4132	136,52905	5,5667	80,739417
4	5,7523	83,431359	9,2254	133,8052	13,9738	202,676	9,0305	130,97837
5	9,217	133,68337	12,8385	186,2096	18,2385	264,5312	12,6399	183,32911
6	12,8181	185,91372	16,8071	243,77018	23,1516	335,79081	16,6015	240,78816
7	16,7923	243,55552	21,2954	308,86848	27,9962	406,05688	21,1172	306,28387
8	21,2614	308,37535	25,9183	375,91902	32,3468	469,15799	25,7337	373,24158
9	25,8609	375,08649	30,7753	446,36495	37,4251	542,81365	30,5797	443,52797
10	30,7609	446,15609	35,6464	517,01539	41,5806	603,08502	35,4523	514,20016
11	35,5636	515,81445	40,5311	587,86307	46,2022	670,11671	40,3386	585,07105
12	40,5133	587,6049	44,2892	642,37056	48,4036	702,04581	44,0888	639,46396

INCREMENTOS NA DESADSORÇÃO

Interv.	Pi C. A. (bar)	Pi C. A. (psi)	Pf C. A. (bar)	Pf C. A. (psi)	Pi C. R. (bar)	Pi C. R. (psi)	Pf C. R. (bar)	Pf C. R. (psi)
1	44,1336	640,11373	43,6003	632,37875	42,6233	618,20834	43,4018	629,49971
2	43,5949	632,30043	42,0921	610,50382	39,9388	579,27236	41,8921	607,60302
3	42,0397	609,74381	40,2257	583,43355	37,6509	546,08865	40,0322	580,62703
4	40,2287	583,47706	38,3752	556,5939	35,7195	518,07563	38,1805	553,76997
5	38,3701	556,51993	35,2845	511,76639	30,8985	448,15184	35,0954	509,02368
6	35,2406	511,12966	32,3681	469,46692	28,1634	408,48195	32,1792	466,72712
7	32,3643	469,41181	29,3395	425,54011	24,8796	360,85372	29,1525	422,82786
8	29,3401	425,54881	26,6492	386,52	22,8343	331,18869	26,4626	383,81355
9	26,6527	386,57076	23,9351	347,15469	19,8075	287,28798	23,7483	344,44534
10	23,9345	347,14599	21,237	308,02145	17,0917	247,89802	21,0529	305,35126
11	21,2206	307,78358	17,4881	253,6474	11,6757	169,34435	17,2849	250,70019
12	17,4941	253,73443	13,702	198,73381	7,7002	111,6837	13,4959	195,74453
13	13,7045	198,77007	9,8737	143,20814	3,6655	53,164412	9,6788	140,38132
14	9,8795	143,29227	6,8888	99,915155	1,9406	28,146462	6,7016	97,200006
15	6,8946	99,999278	4,6576	67,55383	0,7755	11,247852	4,4758	64,917003

ISOTÉRMICAS DE ADSORÇÃO DE DIÓXIDO DE CARBONO

Amostra	T (°C)	mi (water saturation(*)) (g)
CR-03_Brasil	35	100,25

Calibração dos volumes das células

Ensaio	P1(bar)	P2 (bar)	P3 (bar)	P4 (bar)	Vesf. (cm ³)	Va (cm ³)	Vr (cm ³)
1°	29,8358	10,0218	29,9915	12,8602	65,2196	199,9234	101,1200
2°	29,6464	9,9657	31,0607	13,2975	65,2196	201,5583	102,0629
3°	29,5359	9,9094	29,4642	12,6217	65,2196	199,9015	100,9301
4°	30,0516	10,0795	29,8001	12,7649	65,2196	199,7608	100,8151

Va(média)	Vr (média)
200,4611	101,3710

Legenda:

- P1 - Pressão inicial sem amostra, célula de referência (células isoladas)
- P2 - Pressão final sem amostra, célula da amostra (células em contacto)
- P3 - Pressão inicial com o padrão, célula de referência (células isoladas)
- P4 - Pressão final com o padrão, célula da amostra (células em contacto)
- Va - Volume da célula da amostra

Cálculo dos volumes da amostra de rocha e dos vazios

Ensaio	P1(bar)	P2 (bar)	P3 (bar)	P4 (bar)	Va (cm ³)	Vc (cm ³)	Vva (cm ³)	VT (cm ³)	R
1°	29,8358	10,0218	30,0719	13,1536	200,4611	70,0496	130,4114	231,7824	2,2865
2°	29,6464	9,9657	30,3372	13,2436	200,4611	69,4449	131,0161	232,3871	2,2924
3°	29,5359	9,9094	29,7751	12,9929	200,4611	69,7304	130,7306	232,1016	2,2896

Vc(média)	Vva(média)	VT(média)	R (média)
69,741664	130,7194	232,0904	2,2895

Legenda:

- P1 - Pressão inicial sem amostra, célula de referência (células isoladas)
- P2 - Pressão final sem amostra, célula da amostra (células em contacto)
- P3 - Pressão inicial com amostra, célula de referência (células isoladas)
- P4 - Pressão final com amostra, célula da amostra (células em contacto)

Vc - Volume da amostra

Vva - Volume de vazios da célula da amostra

Amostra
CR-03_Brasil

INCREMENTOS NA ADSORÇÃO

Interv.	Pi C. A. (bar)	Pi C. A. (psi)	Pf C. A. (bar)	Pf C. A. (psi)	Pi C. R. (bar)	Pi C. R. (psi)	Pf C. R. (bar)	Pf C. R. (psi)
1	0,2665	3,865316	1,2881	18,682602	2,4519	35,562358	1,0991	15,941346
2	1,2875	18,6739	2,7868	40,419747	4,5692	66,271677	2,6059	37,795974
3	2,7855	40,400892	5,6232	81,558893	9,1426	132,60427	5,4459	78,987334
4	5,6202	81,515381	11,2241	162,79435	18,3235	265,76404	11,0432	160,17057
5	11,2253	162,81175	15,5372	225,35155	22,5632	327,25665	15,3543	222,69877
6	15,3303	222,35067	20,319	294,70678	27,7961	403,15463	20,1481	292,22804
7	20,2375	293,5247	25,9817	376,83858	34,1013	494,60526	25,8133	374,3961
8	25,8797	375,35917	32,4039	469,98617	41,0136	594,86125	32,2264	467,41171
9	32,337	469,01585	38,3224	555,82809	45,9277	666,13536	38,1086	552,72713
10	38,2484	554,75479	43,9176	636,98087	50,111	726,80994	43,6962	633,76968
11	43,1401	625,70401	48,6661	705,85311	53,4096	774,65284	48,4367	702,5259
12								

INCREMENTOS NA DESADSORÇÃO

Interv.	Pi C. A. (bar)	Pi C. A. (psi)	Pf C. A. (bar)	Pf C. A. (psi)	Pi C. R. (bar)	Pi C. R. (psi)	Pf C. R. (bar)	Pf C. R. (psi)
1	48,6458	705,55868	47,8575	694,12518	46,6946	677,25848	47,6337	690,87918
2	47,8156	693,51746	46,1043	668,69677	43,7632	634,74145	45,8815	665,46528
3	46,0176	667,43927	41,995	609,09548	36,727	532,68841	41,7778	605,94521
4	41,9439	608,35433	38,0908	552,46896	33,2499	482,25655	37,8846	549,47824
5	38,0756	552,2485	34,0874	494,40365	28,5019	413,39156	33,8847	491,46369
6	34,0895	494,43411	30,5472	443,05659	25,5212	370,15948	30,3403	440,05571
7	30,5447	443,02033	28,0141	406,31651	24,2951	352,37613	27,8136	403,40845
8	28,0156	406,33826	25,2818	366,68723	21,2348	307,98954	25,0848	363,82994
9	25,28	366,66112	21,4706	311,40958	15,7724	228,76289	21,2798	308,64222
10	21,4807	311,55607	17,6256	255,6417	11,7398	170,27406	17,4126	252,55235
11	17,6286	255,68521	13,8247	200,51345	7,8611	114,01739	13,6186	197,52417
12	13,8275	200,55406	9,1663	132,94802	1,6073	23,312279	8,9641	130,01531

ISOTÉRMICAS DE ADSORÇÃO DE DIÓXIDO DE CARBONO

Amostra	T (°C)	mi (water saturation(*)) (g)
CR-04_Brasil	35	100,71

Calibração dos volumes das células

Ensaio	P1 (bar)	P2 (bar)	P3 (bar)	P4 (bar)	Vesf. (cm ³)	Va (cm ³)	Vr (cm ³)
1°	29,8896	10,0615	30,5914	13,1427	65,2196	199,8701	101,4214
2°	29,9752	10,092	29,9684	12,8778	65,2196	199,8192	101,4211
3°	29,7618	10,0192	30,1505	12,9485	65,2196	200,1824	101,5908
4°	30,4644	10,2566	29,7219	12,7728	65,2196	199,7607	101,3898

Va (média)	Vr (média)
199,9572	101,4778

Legenda:

- P1 - Pressão inicial sem amostra, célula de referência (células isoladas)
- P2 - Pressão final sem amostra, célula da amostra (células em contacto)
- P3 - Pressão inicial com o padrão, célula de referência (células isoladas)
- P4 - Pressão final com o padrão, célula da amostra (células em contacto)
- Va - Volume da célula da amostra

Cálculo dos volumes da amostra de rocha e dos vazios

Ensaio	P1 (bar)	P2 (bar)	P3 (bar)	P4 (bar)	Va (cm ³)	Vc (cm ³)	Vva (cm ³)	VT (cm ³)	R
1°	29,8896	10,0615	29,9102	13,2025	199,9572	71,5530	128,4042	229,8820	2,2653
2°	29,9752	10,092	29,6783	13,1089	199,9572	71,6744	128,2829	229,7606	2,2641
3°	29,7618	10,0192	29,9066	13,1983	199,9572	71,4936	128,4636	229,9414	2,2659

Vc (média)	Vva (média)	VT (média)	R (média)
71,573682	128,3836	229,86132	2,2651

Legenda:

- P1 - Pressão inicial sem amostra, célula de referência (células isoladas)
- P2 - Pressão final sem amostra, célula da amostra (células em contacto)
- P3 - Pressão inicial com amostra, célula de referência (células isoladas)
- P4 - Pressão final com amostra, célula da amostra (células em contacto)

Vc - Volume da amostra

Vva - Volume de vazios da célula da amostra

Amostra
CR-04_Brasil

INCREMENTOS NA ADSORÇÃO

Interv.	Pi C. A. (bar)	Pi C. A. (psi)	Pf C. A. (bar)	Pf C. A. (psi)	Pi C. R. (bar)	Pi C. R. (psi)	Pf C. R. (bar)	Pf C. R. (psi)
1	0,2439	3,5375256	1,3192	19,133677	2,4769	35,924958	1,1166	16,195166
2	1,328	19,261312	2,8619	41,508998	4,6156	66,944662	2,6602	38,583541
3	2,8632	41,527853	5,6283	81,632863	9,0157	130,76371	5,4284	78,733514
4	5,625	81,585	9,1198	132,27358	13,7669	199,67512	8,9174	129,33797
5	9,0866	131,79205	12,7949	185,57723	18,1847	263,75089	12,6193	183,03033
6	12,6527	183,51476	16,7974	243,62949	22,8072	330,79563	16,6119	240,939
7	16,7775	243,34086	20,9476	303,82399	27,0564	392,42603	20,7546	301,02472
8	20,9382	303,68765	25,5779	370,98186	31,9149	462,89371	25,3833	368,15938
9	25,5313	370,30598	30,0709	436,14833	36,0792	523,29272	29,8991	433,65655
10	30,0618	436,01635	34,8603	505,61379	40,6987	590,29394	34,6617	502,7333
11	34,755	504,08652	37,9154	549,92496	41,961	608,60234	37,7028	546,84141
12	37,8363	548,7777	40,5151	587,63101	43,5517	631,67386	40,3053	584,58807

INCREMENTOS NA DESADSORÇÃO

Interv.	Pi C. A. (bar)	Pi C. A. (psi)	Pf C. A. (bar)	Pf C. A. (psi)	Pi C. R. (bar)	Pi C. R. (psi)	Pf C. R. (bar)	Pf C. R. (psi)
1	40,5189	587,68613	39,846	577,92638	38,8232	563,09169	39,633	574,83703
2	39,7908	577,12576	38,0613	552,0411	35,6871	517,6057	37,8461	548,91983
3	38,0548	551,94682	35,3353	512,50319	31,6286	458,74121	35,1277	509,49216
4	35,3286	512,40601	32,491	471,24946	28,5883	414,6447	32,2854	468,26744
5	32,4503	470,65915	30,4621	441,8223	27,6328	400,78613	30,2637	438,9447
6	30,4591	441,77879	27,4834	398,61923	23,2703	337,51243	27,2768	395,62271
7	27,4486	398,11449	24,5105	355,50029	20,2933	294,33402	24,3151	352,66621
8	24,5135	355,5438	21,5562	312,65112	17,2527	250,23316	21,3648	309,87506
9	21,5301	312,27257	17,5706	254,84398	11,7764	170,80491	17,3555	251,72417
10	17,5761	254,92375	13,6105	197,40669	7,6767	111,34286	13,4056	194,43482
11	13,6223	197,57784	9,7835	141,89988	3,8661	56,073914	9,5713	138,82214
12	9,7987	142,12034	6,8891	99,919506	2,2523	32,667359	6,6881	97,004202
13	6,8953	100,00943	4,8561	70,432874	1,4363	20,832095	4,6529	67,485662

ISOTÉRMICAS DE ADSORÇÃO DE DIÓXIDO DE CARBONO

Amostra	T (°C)	mi (water saturation(*)) (g)
CR-05_Brasil	35	99,9

Calibração dos volumes das células

Ensaio	P1(bar)	P2 (bar)	P3 (bar)	P4 (bar)	Vesf. (cm ³)	Va (cm ³)	Vr (cm ³)
1°	30,892	10,3459	30,0503	12,8765	65,2196	198,5911	99,9987
2°	29,76	9,9796	29,7467	12,7457	65,2196	199,4339	100,6209
3°	30,263	10,1461	29,807	12,7578	65,2196	200,0744	100,9110
4°	29,557	9,9073	29,8886	12,8074	65,2196	199,1146	100,3938

Va(média)	Vr (média)
199,3665	100,5102

Legenda:

- P1 - Pressão inicial sem amostra, célula de referência (células isoladas)
- P2 - Pressão final sem amostra, célula da amostra (células em contacto)
- P3 - Pressão inicial com o padrão, célula de referência (células isoladas)
- P4 - Pressão final com o padrão, célula da amostra (células em contacto)
- Va - Volume da célula da amostra

Cálculo dos volumes da amostra de rocha e dos vazios

Ensaio	P1(bar)	P2 (bar)	P3 (bar)	P4 (bar)	Va (cm ³)	Vc (cm ³)	Vva (cm ³)	VT (cm ³)	R
1°	30,8922	10,346	30,0738	12,6214	199,3665	60,5521	138,8144	239,3245	2,3811
2°	29,7595	9,9796	30,1527	12,6361	199,3665	59,9295	139,4370	239,9471	2,3873
3°	30,2626	10,146	29,7411	12,4523	199,3665	59,7572	139,6092	240,1194	2,3890

Vc(média)	Vva(média)	VT(média)	R (média)
60,0796214	139,28685	239,797	2,3858

Legenda:

- P1 - Pressão inicial sem amostra, célula de referência (células isoladas)
- P2 - Pressão final sem amostra, célula da amostra (células em contacto)
- P3 - Pressão inicial com amostra, célula de referência (células isoladas)
- P4 - Pressão final com amostra, célula da amostra (células em contacto)

Vc - Volume da amostra

Vva - Volume de vazios da célula da amostra

Amostra
CR-05_Brasil

INCREMENTOS NA ADSORÇÃO

Interv.	Pi C. A. (bar)	Pi C. A. (psi)	Pf C. A. (bar)	Pf C. A. (psi)	Pi C. R. (bar)	Pi C. R. (psi)	Pf C. R. (bar)	Pf C. R. (psi)
1	0,2527	3,6651608	1,3265	19,239556	2,6069	37,810478	1,1336	16,441734
2	1,3278	19,258411	2,8827	41,810681	4,8531	70,389362	2,6938	39,070875
3	2,8832	41,817933	5,7891	83,965106	9,6493	139,95345	5,6023	81,255759
4	5,7902	83,981061	9,3167	135,12942	14,1066	204,60213	9,1243	132,33885
5	9,3053	134,96407	16,7123	242,3952	27,7863	403,0125	16,5109	239,47409
6	16,7028	242,25741	21,2324	307,95473	28,2085	409,13608	21,0548	305,37882
7	21,2332	307,96633	27,2497	395,22965	35,8247	519,60145	27,0707	392,63343
8	27,2112	394,67124	33,5911	487,20531	42,0972	610,57779	33,4011	484,44955
9	33,5781	487,01676	39,9898	580,01206	47,7237	692,18454	39,7955	577,19393
10	39,9519	579,46236	45,5718	660,97339	51,8995	752,75035	45,3697	658,04213
11	45,5138	660,13216	50,6071	734,00538	56,6676	821,90687	50,3877	730,8232
12		0		0		0		0

INCREMENTOS NA DESADSORÇÃO

Interv.	Pi C. A. (bar)	Pi C. A. (psi)	Pf C. A. (bar)	Pf C. A. (psi)	Pi C. R. (bar)	Pi C. R. (psi)	Pf C. R. (bar)	Pf C. R. (psi)
1	50,4934	732,35627	49,8501	723,02585	48,8419	708,40292	49,6402	719,98146
2	49,8032	722,34561	48,2349	699,59899	45,8347	664,78649	48,0236	696,53429
3	48,1005	697,64965	44,8667	650,74662	40,7709	591,34113	44,6836	648,09093
4	44,8622	650,68135	42,2742	613,145	38,4625	557,8601	42,0841	610,38779
5	42,0094	609,30434	37,9417	550,30642	32,5743	472,45765	37,7477	547,49264
6	37,9357	550,21939	35,0368	508,17375	30,7794	446,42442	34,8434	505,36867
7	35,0344	508,13894	31,2382	453,07885	25,6057	371,38507	31,0451	450,27813
8	31,2127	452,709	28,0815	407,29408	23,3338	338,43344	27,8868	404,47015
9	28,0812	407,28972	24,2397	351,57261	18,3767	266,53566	24,0447	348,74433
10	24,2447	351,64513	20,4214	296,19199	14,4816	210,04113	20,2105	293,13309
11	20,4227	296,21084	15,6723	227,31104	8,2022	118,96471	15,4658	224,31596
12	15,6745	227,34295	10,8464	157,31619	3,1109	45,120494	10,6424	154,35737

ISOTÉRMICAS DE ADSORÇÃO DE DIÓXIDO DE CARBONO

Amostra	T (°C)	mi (water saturation(*)) (g)
CR-06_Brasil	35	99,84

Calibração dos volumes das células

Ensaio	P1(bar)	P2 (bar)	P3 (bar)	P4 (bar)	Vesf. (cm ³)	Va (cm ³)	Vr (cm ³)
1°	29,347	9,8519	30,2365	12,9504	65,2196	200,3991	101,2738
2°	30,563	10,2419	29,7884	12,7541	65,2196	199,5401	100,5698
3°	29,797	9,9958	30,8467	13,1923	65,2196	201,0189	101,4764
4°	29,905	10,0318	29,9338	12,8113	65,2196	200,4598	101,1886

Va(média)	Vr (média)
200,3194	101,1067

Legenda:

- P1 - Pressão inicial sem amostra, célula de referência (células isoladas)
- P2 - Pressão final sem amostra, célula da amostra (células em contacto)
- P3 - Pressão inicial com o padrão, célula de referência (células isoladas)
- P4 - Pressão final com o padrão, célula da amostra (células em contacto)
- Va - Volume da célula da amostra

Cálculo dos volumes da amostra de rocha e dos vazios

Ensaio	P1(bar)	P2 (bar)	P3 (bar)	P4 (bar)	Va (cm ³)	Vc (cm ³)	Vva (cm ³)	VT (cm ³)	R
1°	29,347	9,8519	30,4375	13,5505	200,3194	74,1595	126,1599	227,2666	2,2478
2°	30,563	10,242	29,8497	13,2872	200,3194	74,4694	125,8499	226,9566	2,2447
3°	29,797	9,9958	29,6866	13,2136	200,3194	74,2520	126,0674	227,1740	2,2469

Vc(média)	Vva(média)	VT(média)	R (média)
74,293631	126,0257	227,1324	2,2465

Legenda:

- P1 - Pressão inicial sem amostra, célula de referência (células isoladas)
- P2 - Pressão final sem amostra, célula da amostra (células em contacto)
- P3 - Pressão inicial com amostra, célula de referência (células isoladas)
- P4 - Pressão final com amostra, célula da amostra (células em contacto)

Vc - Volume da amostra

Vva - Volume de vazios da célula da amostra

Amostra
CR-06_Brasil

INCREMENTOS NA ADSORÇÃO

Interv.	Pi C. A. (bar)	Pi C. A. (psi)	Pf C. A. (bar)	Pf C. A. (psi)	Pi C. R. (bar)	Pi C. R. (psi)	Pf C. R. (bar)	Pf C. R. (psi)
1	0,2764	4,0089056	1,3043	18,917567	2,4414	35,410066	1,1096	16,093638
2	1,3005	18,862452	2,6699	38,72423	4,6799	67,87727	2,4892	36,103357
3	2,6043	37,772767	4,9647	72,008009	8,9262	129,4656	4,7901	69,47561
4	4,9062	71,159525	9,9934	144,94427	17,6031	255,31536	9,8067	142,23638
5	9,9628	144,50045	14,9454	216,76808	22,1132	320,72985	14,7606	214,08774
6	14,9429	216,73182	21,0005	304,59125	29,2859	424,76269	20,832	302,14733
7	20,9437	303,76742	26,2323	380,47328	33,1793	481,23257	26,0566	377,92493
8	26,2156	380,23106	31,3076	454,08543	37,7039	546,85737	31,1281	451,48196
9	31,2246	452,8816	37,1794	539,25002	44,1288	640,04412	36,9992	536,6364
10	37,0709	537,67633	42,3361	614,04279	48,5997	704,89005	42,1425	611,23482
11	42,2657	613,02171	49,3952	716,42798	56,2924	816,46497	49,1889	713,43581
12		0		0		0		0

INCREMENTOS NA DESADSORÇÃO

Interv.	Pi C. A. (bar)	Pi C. A. (psi)	Pf C. A. (bar)	Pf C. A. (psi)	Pi C. R. (bar)	Pi C. R. (psi)	Pf C. R. (bar)	Pf C. R. (psi)
1	49,3141	715,25171	48,5276	703,84431	47,3786	687,17921	48,3277	700,94496
2	48,4357	702,51139	46,4606	673,86454	43,9289	637,14477	46,2613	670,9739
3	46,4472	673,67019	43,5493	631,63905	39,7483	576,50934	43,3638	628,94856
4	43,4986	630,90369	40,5883	588,6927	36,7313	532,75078	40,4092	586,09504
5	40,5869	588,6724	38,4642	557,88476	35,5402	515,47506	38,2606	554,93174
6	38,3857	556,74619	35,2311	510,99187	31,4943	456,79333	35,0623	508,5436
7	35,2351	511,04989	29,3306	425,41102	20,9657	304,08651	29,1668	423,03527
8	29,3284	425,37911	25,6538	372,08272	20,3345	294,93159	25,4797	369,55757
9	25,6453	371,95943	21,4559	311,19637	15,2363	220,9873	21,2932	308,83657
10	21,4559	311,19637	18,2074	264,08013	13,2875	192,7219	18,0151	261,29101
11	18,2138	264,17296	14,2748	207,0417	8,1554	118,28592	14,0889	204,34541
12	14,2837	207,17078	10,3693	150,39633	4,1067	59,563577	10,1811	147,66667
13	10,3933	150,74442	6,9002	100,0805	1,0885	15,787604	6,7224	97,50169

ISOTÉRMICAS DE ADSORÇÃO DE DIÓXIDO DE CARBONO

Amostra	T (°C)	mi (water saturation(*) (g))
CR-07_Brasil	35	100,02

Calibração dos volumes das células

Ensaio	P1(bar)	P2 (bar)	P3 (bar)	P4 (bar)	Vesf. (cm ³)	Va (cm ³)	Vr (cm ³)
1°	29,552	9,9155	29,9722	12,8693	65,2196	198,2778	100,1214
2°	29,925	10,056	30,2786	12,9869	65,2196	199,9938	101,2219
3°	29,561	9,9335	29,6894	12,7365	65,2196	199,8489	101,1453
4°	29,888	10,0404	29,7338	12,7521	65,2196	199,8575	101,1039

Va(média)	Vr (média)
199,3735	100,8295

Legenda:

- P1 - Pressão inicial sem amostra, célula de referência (células isoladas)
- P2 - Pressão final sem amostra, célula da amostra (células em contacto)
- P3 - Pressão inicial com o padrão, célula de referência (células isoladas)
- P4 - Pressão final com o padrão, célula da amostra (células em contacto)
- Va - Volume da célula da amostra

Cálculo dos volumes da amostra de rocha e dos vazios

Ensaio	P1(bar)	P2 (bar)	P3 (bar)	P4 (bar)	Va (cm ³)	Vc (cm ³)	Vva (cm ³)	VT (cm ³)	R
1°	29,5519	9,9155	30,2945	12,9921	199,3735	65,2987	134,0748	234,9043	2,3297
2°	29,9246	10,056	29,9252	12,8152	199,3735	64,6479	134,7256	235,5551	2,3362
3°	29,5607	9,9335	29,9474	12,8149	199,3735	64,4720	134,9015	235,7311	2,3379

Vc(média)	Vva(média)	VT(média)	R (média)
64,8061947	134,5673	235,39684	2,3346

Legenda:

- P1 - Pressão inicial sem amostra, célula de referência (células isoladas)
- P2 - Pressão final sem amostra, célula da amostra (células em contacto)
- P3 - Pressão inicial com amostra, célula de referência (células isoladas)
- P4 - Pressão final com amostra, célula da amostra (células em contacto)

Vc - Volume da amostra

Vva - Volume de vazios da célula da amostra

Amostra
CR-07_Brasil

INCREMENTOS NA ADSORÇÃO

Interv.	Pi C. A. (bar)	Pi C. A. (psi)	Pf C. A. (bar)	Pf C. A. (psi)	Pi C. R. (bar)	Pi C. R. (psi)	Pf C. R. (bar)	Pf C. R. (psi)
1	0,3535	5,127164	1,3579	19,694982	2,4899	36,11351	1,1513	16,698455
2	1,3586	19,705134	2,9287	42,477865	4,8262	69,999205	2,725	39,5234
3	2,9287	42,477865	6,7161	97,410314	11,5863	168,0477	6,5193	94,555927
4	6,7169	97,421918	11,8299	171,58087	18,5888	269,61196	11,6307	168,69167
5	11,8273	171,54316	16,2105	235,11709	23,1027	335,08156	16,0056	232,14522
6	16,2042	235,02572	20,7141	300,43731	27,6488	401,0182	20,5241	297,68155
7	20,6104	298,93324	25,5645	370,78751	32,6221	473,15094	25,3833	368,15938
8	25,3988	368,3842	30,4698	441,93398	37,3689	541,99853	30,2761	439,12455
9	30,4346	441,42344	35,4241	513,79115	41,7799	605,97567	35,2425	511,15722
10	35,4069	513,54168	40,4375	586,5055	46,5837	675,64998	40,251	583,8005
11	40,4111	586,12259	42,9386	622,78145	46,8866	680,04325	42,7446	619,96768
12								

INCREMENTOS NA DESADSORÇÃO

Interv.	Pi C. A. (bar)	Pi C. A. (psi)	Pf C. A. (bar)	Pf C. A. (psi)	Pi C. R. (bar)	Pi C. R. (psi)	Pf C. R. (bar)	Pf C. R. (psi)
1	42,9371	622,7597	42,1875	611,8875	41,0128	594,84965	41,9898	609,02006
2	42,1806	611,78742	40,2843	584,28349	37,612	545,52445	40,0906	581,47406
3	40,2487	583,76714	38,32	555,79328	35,6041	516,40187	38,1187	552,87362
4	38,3094	555,63954	35,3627	512,9006	31,1783	452,21006	35,175	510,1782
5	35,3369	512,5264	32,1664	466,54147	27,9088	404,78924	31,9863	463,9293
6	32,1823	466,77208	29,2804	424,68292	25,0695	363,60803	29,0924	421,95617
7	29,273	424,57559	26,6979	387,22634	22,9117	332,3113	26,5146	384,56776
8	26,6966	387,20749	23,9572	347,47523	19,8874	288,44685	23,7746	344,8268
9	23,9537	347,42446	21,1647	306,97281	16,934	245,61074	20,9604	304,00964
10	21,1647	306,97281	17,3678	251,90257	11,6226	168,57419	17,1717	249,05834
11	17,3719	251,96204	13,5385	196,3624	7,6202	110,52338	13,3421	193,51382
12	13,5421	196,41462	9,699	140,6743	3,6184	52,481274	9,5072	137,89243
13	9,7041	140,74827	6,7267	97,564057	1,9086	27,682334	6,544	94,914176