



**AVALIAÇÃO DAS CAMADAS DE CARVÃO DA JAZIDA CHICO-LOMÃ, RS  
COMO FONTE DE ENERGIA PELA EXTRAÇÃO DO *COALBED METHANE* (GÁS  
NATURAL).**

**AIRAN LIMA DA ROSA**

**AVALIAÇÃO DAS CAMADAS DE CARVÃO DA JAZIDA CHICO-LOMÃ, RS  
COMO FONTE DE ENERGIA PELA EXTRAÇÃO DO *COALBED METHANE* (GÁS  
NATURAL).**

Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Apresentado na forma de monografia, junto à disciplina Projeto Temático em Geologia III, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

**Orientadora:** Prof. Dra. Ruth Hinrichs

**Supervisor:** Prof. Dr. Wolfgang Kalkreuth

Porto Alegre, 2015

# **UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**

**Reitor:** Carlos Alexandre Netto

**Vice-Reitor:** Rui Vicente Oppermann

## **INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**Diretor:** André Sampaio Mexias

**Vice-Diretor:** Nelson Luiz Sambaqui Gruber

Rosa, Airan Lima da  
Avaliação das camadas de carvão de jazida de Chico-Lomã ,  
RS, como de energia pela extração do coalbed methane (gás  
natural) . / Airan Lima da Rosa. - Porto Alegre: IGEO/UFRGS,  
2015.  
[97 f.] il.

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso).- Universidade  
Federal do Rio Grande do Sul. Graduação em Geologia. Instituto  
de Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2015.

Orientador (es):Ruth Hinrichs  
Coorientador (es):Wolfgang Kalkreuth

1. Bacia do Paraná 2. Jazida Chico-Lomã 3. Carvão 4. Coalbed  
methane, I. Título.

CDU55

---

Catálogo na Publicação  
Biblioteca Instituto de Geociências - UFRGS  
Miriam Alves CRB 10/1947

---

Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Campus do Vale Av. Bento Gonçalves, 9500  
- Porto Alegre - RS - Brasil CEP: 91501-970 / Caixa Postal: 15001.

Fone: +55 51 3308-  
6329 Fax: +55 51 3308-6337  
E-mail: bibgeo@ufrgs.br

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o Trabalho de Conclusão de Curso “AVALIAÇÃO DAS CAMADAS DE CARVÃO DA JAZIDA CHICO-LOMÃ, RS COMO FONTE DE ENERGIA PELA EXTRAÇÃO DO COALBED METHANE (GÁS NATURAL)”, elaborado por AIRAN LIMA DA ROSA, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Comissão Examinadora:

---

Prof<sup>a</sup>. Dra. Maria do Carmo Peralba

---

Prof. Dr. Vitor Paulo Pereira

---

Prof. Dr. Lauro V.S. Nardi

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, aqueles que se esforçaram além dos seus próprios limites para que hoje eu pudesse estar escrevendo este trabalho, meus pais Edemilson Ribeiro da Rosa e Maria Margarete Lima da Rosa. Seus esforços, carinho e ensinamentos nunca serão esquecidos. Sou o que sou, e serei mais, graças à chance que vocês me proporcionaram.

As minhas queridas irmãs Adna, Andiará e Ariadne, pelo convívio e aprendizado. Estaremos sempre juntos, podem contar comigo nas suas caminhadas

Agradeço aos meus avós, Ezequiel Ribeiro da Rosa e Iracema Paz da Rosa (*in memoriam*) pelo apoio no meu começo na vida de estudante universitário.

A minha amiga, companheira e namorada, Fernanda Silva do Nascimento. Pela calma e paciência durante estes longos e maravilhosos anos, e por me fazer crescer cada vez mais.

Ao meu orientador, Prof. Kalkreuth, pelos ensinamentos, paciência e oportunidade de conhecer esse mundo complexo dos reservatórios não convencionais. A minha orientadora Prof<sup>a</sup>. Ruth Hinrichs pela disponibilidade e essencial ajuda.

Aos colegas de laboratório, Gustavo Simão, Mara, Thayssa, Henrique, Agostinho e Carol pelo companheirismo. A Priscila pela constante ajuda e desenvolvimento deste projeto. Ao meu companheiro de caminhada, nesse universo de Núcleo de Pesquisa de Carvão e Rochas Geradoras do Petróleo e de UFRGS, Gustavo Collares, pela imensa ajuda e disponibilidade de trabalho conjunto.

Aos meus colegas Alexandre, Marcos e Marco pelo companheirismo durante a experiência de mapeamento geológico.

Ao Núcleo de Pesquisa de Carvão e Rochas de Geradoras de Petróleo da UFRGS e a Carbonífera Metropolitana pelo suporte técnico.

## RESUMO

Desde o final do século 20 e início do século 21, o gás natural gerado e armazenado nas camadas de carvão (*coalbed methane* - CBM), têm tido uma ênfase maior como potencial fonte alternativa de energia mundial. No Brasil, depósitos importantes de carvão ocorrem na parte sul do país nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. A sucessão sedimentar portadora de carvão ocorre na Formação Rio Bonito, de idade permiana, na Bacia do Paraná. O presente estudo faz parte de um projeto de pesquisa aplicada, que visa avaliar o potencial de CBM destes depósitos e na determinação das características do carvão e o volume de gás desorvido. Volume este determinado a partir da sondagem CBM 002-CL-RS perfurada em 2015, utilizando uma sondagem do tipo *wireline core retrieval*, na qual é feita uma retirada rápida da amostra da profundidade, para evitar o escape de gás. Foram recuperadas 9 camadas de carvão de uma profundidade entre 501,7 e 551,50 metros. No total de 28 cilindros, com 36 cm cada, contendo amostras de carvão da Formação Rio Bonito, esses 5 leitos de carvão com espessura aproximada de 20cm ou menos, e 4 camadas denominadas: A, B, CL4 e CL6. Depois da coleta foram realizadas medidas periódicas de desorção de gás seguidas pelas análises petrográficas e físico-químicas no carvão. Os resultados petrográficos indicaram valores entre 0,52 e 4,65% Rrandom da refletância da vitrinita, classificando o rank das camadas como betuminoso alto volátil C para a camada A atingindo o nível de meta antracito na camada CL6. Petrograficamente o carvão mostra predominância dos macerais do grupo de vitrinita e inertinita. A análise imediata mostra conteúdos de cinza variando de 42,55 até 81,14%, enquanto os valores de poder calorífico variam de 2011,35 até 4398,81Kcal/Kg. A mineralogia, baseada na difratometria de raios X, indica a predominância de quartzo e caolinita, seguido de pirita, ilita calcita, plagioclásio, feldspato alcalino; com ocorrência de leucita e titanomagnetita. As medidas de desorção, de cada cilindro variam entre 0,04 até 1,67 cm<sup>3</sup>/g, já quando recalculados por camada observa-se uma variação entre 0,16 e 0,42 cm<sup>3</sup>/g, indicando que a camada CL6 apresenta um maior número de gás desorvido.

**Palavras-chave:** Bacia do Paraná, Jazida Chico-Lomã, carvão, *coalbed methane*, desorção, energia.

## ABSTRACT

Since the late 20th century natural gas generated and stored in coal seams (coalbed methane - CBM), has been considered as a potential alternative source of world energy. In Brazil, major coal deposits, which may have the potential for CBM, occur in the southern part of the country in the states of Rio Grande do Sul and Santa Catarina. Geologically, the coal-bearing succession occurs in the Permian Rio Bonito Formation of the Paraná Basin. The present study is part of an applied research project on the CBM potential of these coal deposits and focusses on the determination of coal characteristics and desorbed gas volumes of borehole CBM002\_CL-RS, drilled in 2015 by wireline core retrieval in the Chico-Loma Coalfield, with the recuperation of 9 coal seams from a depth between 501,7 e 551,50 metros. Twenty-eight canister samples were collected with 36 cm length each, containing coal samples from the Rio Bonito Formation. These samples derived from five coal seams ( $\leq$  20 cm thickness), and 4 seams identified as: A, B, CL 4 and CL6. Following the collection, periodical desorbed gas measurements were carried out, followed by petrographic and physico-chemical analyses of the coal samples. The petrographic results obtained indicate mean values from 0.52 to 4.65% Rrandom vitrinite reflectance, classifying the seams according to rank as high volatile bituminous C coal (seam A) to meta-anthracite (seam CL6). Petrographically the coals show a predominance of vitrinite and inertinite macerals. Proximate analysis showed a ash yield ranging from 42.55 to 81.14 wt%, whereas the calorific values ranged from 2011.35 to 4398.81 Kcal / Kg. The mineralogy, based on X-ray diffraction, indicate the predominance of quartz and kaolinite, followed by calcite, illite, plagioclase, alkali feldspar and pyrite. The gas desorption measurements show a variation from 0.04 to 1.67 cm<sup>3</sup> / g for the canister samples. When gas values are recalculated by seam the desorpt gas shows a variation from 0.16 and 0.42 cm<sup>3</sup> / g, indicating that the CL6 seam has the highest volume of desorbed gas.

**Keywords:** The Paraná Basin, Chico-Loma Coalfield, coal bed methane, desorption, energy.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização das jazidas de carvão da Bacia do Paraná (GOMES, 2002). A jazida de Chico Lomã situa-se entre as jazidas de Morungava e Santa Terezinha.....	21
Figura 2. Mapa geológico simplificado da Bacia do Paraná. Fonte: Milani (1997).....	22
Figura 3. Sondagem do poço CBM-002-CL-RS. ....	25
Figura 4. Perfil esquemático do furo de sondagem CBM-002-CL-RS, na região de Chico-Lomã – RS.....	26
Figura 5. A) Laboratório móvel usado em campo. B) Imagem interna do laboratório, onde está a caixa térmica que mantém os cilindros armazenados, enquanto ocorrem as medidas de dessorção.....	27
Figura 6. A) Cilindro especial fechado, com 36 centímetros; B) Detalhe da caixa térmica de armazenamento dos cilindros, instalada dentro do laboratório móvel.....	28
Figura 7. Coluna graduada conectada aos cilindros, e usada na medição de gás dessorvido de cada cilindro.....	29
Figura 8. A) Britador de mandíbulas, usado para moer as amostras de carvão; B) Peneira de 0,84 - 0,25 mm, usada para separar grãos para análise petrográficas.....	31
Figura 9. Microscópio <i>Leica DM6000 M</i> utilizado para análise de reflectância da vitrinita.....	32
Figura 10. Bomba Calorimétrica da marca IKA WERKE C2000 basic/control.....	37
Figura 11. Difrátometro Shimadzu, modelo XRD600, utilizado na análise de carvão pulverizado. Em detalhe, a amostra fixa (no centro da imagem) e o braço detector (a esquerda).....	38
Figura 12. Cromatógrafo gasoso Agilent 7890A (G3440A), com um detector TCD em série com FID, do Laboratório de Geoquímica Orgânica do Instituto de Geociências da UFRGS.....	39
Figura 13. <i>Sample bag</i> conectada ao cilindro para a coleta de CBM. <i>Sample bag</i> da marca SKC.....	40
Figura 14. Ternário da composição de grupos de macerais, para cada uma das amostras coletadas. L1 - Leito 1, A - Camada A, L2 - Leito 2, L3 - Leito 3, B - Camada B, L4 - Leito 4, CL4 - Camada Chico Lomã 4, L5 - Leito 5, CL6 - Camada Chico Lomã 6.....	42



Figura 15. Diagrama ternário mostrando a composição petrográfica dos grupos de macerais (sem matéria mineral) das amostras dos cilindros.....44

Figura 16. Perfil esquemático das camadas de carvão, cilindros, espessura das camadas, conteúdo de macerais e matéria mineral, cinzas, reflectância da vitrinita e de gás total. MM – matéria mineral.....49

Figura 17. Curva de dessorção de gás natural em carvão. Gráfico demonstrativo da quantidade de gás dessorvida pelo período de tempo do cilindro 20.....59

Figura 18. Histogramas referentes às amostras analisadas.....**Erro!**  
**Indicador não definido.....63**

Figura 19. Difractogramas da amostra.....28  
.....68

Figura 20. Gráficos de dessorção das amostras coletadas.....82  
**Erro! Indicador não definido.**

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição maceral, mineral e macerais recalculados (sem matéria mineral). L1 à L4 – Leitões de 1 a 4, CA – Camada A, CB – Camada B, CL4 e CL – Camadas Chico Lomã 4 e 6, MM – Matéria Mineral, MMND – Matéria Mineral não diferenciada.....	45
Tabela 2. Valores de composição maceral e conteúdo de matéria mineral, recalculados para cada camada. L1 à L4 – Leitões de 1 a 4, CA – Camada A, CB – Camada B, CL4 e CL – Camadas Chico Lomã 4 e 6, MM – Matéria Mineral.....	48
Tabela 3. Valores obtidos de reflectância a vitrinita para cada amostra e seu respectivo rank.....	51
Tabela 4. Resultados da análise imediata: cinza (%), umidade (%), matéria volátil (%), matéria volátil (d.a.f) e carbono fixo (%). Prof – profundidade.....	53
Tabela 5. Valores de poder calorífico obtido para cada amostra, e posteriormente recalculado de acordo com a espessura de cada camada. PC – poder calorífico.....	55
Tabela 6. . Resultados das análises de difratometria de Raios-X.....	56
Tabela 7. Composição dos gases analisados por amostra. Cil- Cilindro.....	57
Tabela 8. Parâmetros de avaliação das amostras e a estimativa de gás CBM dessorvido Gás-m – Gás medido em cm <sup>3</sup> /g, Gás-p – gás perdido, Gás-T – Gás Total,.....	58
Tabela 9. Valores de gás medido (dessorvido) e gás total, recalculados de acordo com a espessura de cada camada.....	60

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Classificação dos macerais adotada neste estudo.....	18
Quadro 2. Litoestratigrafia do intervalo de estudo.....	24
Quadro 3. Classificação dos litotipos de carvão (Stopes, 1919 e Diesel, 1965), baseado nas bandas de brilho do carvão.....	30

## LISTA DE ABREVIações

CBM - *Coalbed Methane*

DRX – Difractometria de Raios X

D.A.F. – *Dry Ash Free*

V – Vitrinita

L – Lipitinita

I – Inertinita

MM – Matéria Mineral

MMND – Matéria Mineral não Diferenciada

CL4 – Camada Chico Lomã 4

CL6- Camada Chico Lomã 6

Fm. – Formação

C1 - Metano

BAVC – Betuminoso Alto Volátil C

BAVB – Betuminoso Alto Volátil B

BAVA – Betuminoso Alto Volátil A

BMV – Betuminoso Médio Volátil

BBV – Betuminoso Baixo Volátil

MA - Meta Antracito

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. Objetivos e Metas	16
1.2 Estado da Arte	17
1.2.1 Carvão	17
1.2.2. <i>Coal Bed Methane</i> (CBM)	19
2. LOCALIZAÇÃO E CONTEXTO GEOLÓGICO	21
2.1. Localização da Área de Estudo	21
2.2. Geologia Regional	22
2.3. Geologia Local	23
3. METODOLOGIA	25
3.1. Sondagem	25
3.2. Laboratório Móvel	27
3.3. Medidas de Dessorção do Gás	28
3.4. Descrição de Litotipos	29
3.5. Análises Petrográficas	31
3.5.1. Preparação das Amostras para Análise Petrográfica	31
3.5.2. Reflectância da Vitrinita	32
3.5.3. Análise dos Macerais	33
3.6. Análises Químicas	33
3.6.1. Preparação das Amostras para Análises Químicas	33
3.6.2. Análise Imediata	34
3.6.3. Poder Calorífico	36
3.6.4. Difração de Raios X	37
3.6.5. Composição do Gás	38
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
4.1. Descrição de litotipos	41

4.2. Análises Petrográficas.....	41
4.2.1. Análise de grupos de Macerais.....	41
4.2.2. Reflectância da vitrinita.....	50
4.3. Análises Químicas.....	52
4.3.1. Análise Imediata.....	52
4.3.2. Poder calorífico.....	54
4.3.3. Difractometria de Raios X.....	56
4.3.4. Composição do gás.....	57
4.4. Medidas de Dessorção do Gás.....	57
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	61
REFERÊNCIAS.....	62
APÊNDICE A.....	64
APÊNDICE B.....	69
APÊNDICE C.....	83

## 1. INTRODUÇÃO

Com a expansão do parque energético, o gás natural tem se mostrado cada vez mais competitivo em relação a vários outros combustíveis, desempenhando um papel importante no fornecimento de energia. Com a diminuição dos recursos mundiais de petróleo e gás natural em reservatórios convencionais o interesse em outras fontes de energia alternativas, como o metano adsorvido nas camadas de carvão (*coal bed methane*, CBM), vem se intensificando nos últimos anos. Desde o final do século 20, o CBM tem tido uma ênfase maior como potencial fonte de energia mundial.

Este recurso energético, trapeado dentro do sistema poroso de camadas de carvão, pode alcançar mundialmente um volume de 250 bilhões de m<sup>3</sup> (Murray, 1996) sendo aproximadamente equivalente às reservas conjuntas de todos os campos convencionais de gás conhecidas no mundo. Até o presente, o CBM provou-se economicamente viável e é produzido em várias bacias sedimentares nos Estados Unidos, China, Austrália e Canadá. Em outros países como Índia, Polônia e Alemanha, as bacias de carvão estão sendo avaliadas com testes de produção para avaliação do seu potencial de CBM.

Na região Sul do Brasil depósitos importantes de carvão ocorrem nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Essa região é conhecida pela importância econômica e abundância de suas camadas de carvão desde o século passado. A sucessão sedimentar portadora de carvão ocorre na Bacia do Paraná, na Formação Rio Bonito.

Baseado no *rank* do carvão, distribuição do carvão e profundidade das camadas de carvão das jazidas de Santa Terezinha, Chico Lomã, Morungava e Sul-Catarinense, a porção sul do Brasil tem sido alvo de exploração de CBM desde 2007 (Kalkreuth *et al.*, 2008; Kalkreuth *et al.*, 2013; Levandowski, 2013; Lourenzi, 2014) pelo Núcleo de Estudos de Carvão e Rochas geradoras de Petróleo da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Na região de Chico Lomã foram encontradas 9 camadas de carvão em uma profundidade entre 386,95 e 429,27 m, com uma espessura cumulativa de 11,46 m. O volume de gás desorvido encontrado variou entre 0 e 0,53 cm<sup>3</sup>/g. Os resultados

de modelamento geológico 3D sugerem um total de mais de 1,3 bilhões de m<sup>3</sup> de gás associado com as camadas de carvão desta região (Levandowski, 2013).

Estes dados (Levandowski, 2013) de Chico-Lomã são influenciados por intrusões de soleiras de diabásio, cuja existência é conhecida baseada em estudos geofísicos anteriores. Esses corpos ígneos atuam como controladores da maturação das camadas de carvão (*rank*) até uma distância de 11 m, e têm influência na produção de gás metano (abaixo da camada de diabásio não ocorreu geração de gás).

Neste trabalho foi estudado o potencial de dessorção de metano das camadas de carvão, tanto em áreas influenciadas por corpos intrusivos, como fora destas, para poder calcular o volume total de CBM associado à jazida. Segundo estudos anteriores (Levandowski, 2013) a jazida apresenta um grande potencial para a geração e acumulação de gás natural.

### **1.1. Objetivos e Metas**

O presente estudo teve como objetivo aumentar o conhecimento geológico-estratigráfico da Formação Rio Bonito e seu potencial como jazida de gás metano, estudando a capacidade de dessorção de metano nas camadas destes depósitos, para, a partir destes dados, calcular o volume de metano associado com as camadas da Formação Rio Bonito na jazida de Chico Lomã.

Mais especificamente os objetivos se desenvolveram como:

Determinação dos volumes de dessorção e total de gás metano associado com as camadas de carvão da Formação Rio Bonito na jazida, a partir dos dados obtidos com uma sondagem investigativa;

Análises físico-químicas e petrográficas das amostras de carvão, como composição de macerais, determinação do *rank*, análise imediata, poder calorífico, etc., para a determinação do grau de carbonificação (maturação) dos carvões da jazida;

Integração entre os resultados das análises de dessorção de metano dos testemunhos de carvão coletados e as análises petrográficas e químicas, para análise da geração de gás e seus controladores;

Determinação da composição do gás natural no depósito.



## 1.2. Estado da Arte

Para situar o problema no contexto de estudos anteriores realizados em CBM e carvões das mesmas jazidas, foi feito um levantamento bibliográfico da literatura pertinente.

### 1.2.1. Carvão

Carvão é uma rocha combustível com mais de 50% em massa e 70% em volume de material carbonoso (Schopf, 1956). Essa rocha resulta da acumulação de grandes quantidades de restos vegetais em formas negativas do relevo, num ambiente saturado de água (pântanos), preferencialmente nas planícies costeiras (deltas, lagunas) e flúvio-lacustres (várzeas). Em um ambiente anóxico, por ação da pressão e temperatura, devido a um soterramento ou orogenia, os restos vegetais se solidificam ao longo do tempo, enriquecem em carbono e empobrecem em oxigênio e hidrogênio, em um processo denominado de carbonificação.

Esse processo é responsável pela transformação da matéria vegetal em carvão, decorrente de processos bioquímicos e geoquímicos (MINEROPAR, 1980). Com a carbonificação ocorre a expulsão de hidrogênio e oxigênio, sob a forma de água, de dióxido de carbono e metano, e um enriquecimento relativo de carbono fixo. Durante a carbonificação a matéria orgânica atinge condições de temperatura e pressão consideradas equivalentes aos estágios diagenéticos e epimetamórficos das rochas sedimentares inorgânicas. E quanto mais intensas a pressão e a temperatura a que a camada de matéria vegetal for submetida, e quanto mais tempo durar o processo, mais alto será o grau de carbonificação (*rank*) atingido. Os diversos estágios de carbonificação, do menor para o maior *rank*, são: turfa, linhito, carvão sub-betuminoso, carvão betuminoso até antracita e grafite.

Para a determinação do grau de carbonificação do carvão os principais parâmetros utilizados são: poder calorífico, matéria volátil, carbono fixo total, teor de hidrogênio e reflectância da vitrinita.

O carvão é composto por macerais que são análogos aos minerais nas rochas e são tipicamente identificáveis através de análise microscópica em luz refletida. Os macerais podem ser distinguidos a partir de suas propriedades físico-

ópticas. São divididos em três grupos (quadro 1) de origens distintas: vitrinita, liptinita e inertinita. A carbonificação de substâncias húmicas, originadas de lignina de paredes celulares, geram a vitrinita. Os remanescentes de plantas moderadamente ricas em hidrogênio geram a liptinita. Derivada das substâncias que formam a vitrinita, porém submetidas a um processo de oxidação antes da deposição, a inertinita é relativamente inerte à queima. O material inorgânico associado é constituído principalmente por silicatos, argilominerais, carbonatos e sulfetos (ICCP, 1971).

Quadro 1. Classificação dos macerais adotada neste estudo.

Grupo Liptinita	Grupo Inertinita	Grupo Vitrinita	
Sporinita	Fusinita	Telovitrinita	Telinita
Cutinina	Semifusinita		Collotelinita
Resinita	Funginita	Detrovitrinita	Vitrodetrinita
Alginita	Secretinita		Collodetrinita
Liptodetrinita	Macrinita	Gelovitrinita	Corpogelinita
	Micrinita		Gelinita

Fonte: Modificado de ICCP (1971).

### 1.2.2. *Coalbed Methane (CBM)*

CBM é uma importante fonte de metano, que foi gerado e armazenado em camadas de carvão. De acordo com Butland (2006), o gás se desenvolve naturalmente junto com camadas de carvão e sedimentos associados, como parte do processo de soterramento e de carbonificação.

O CBM é composto por hidrocarbonetos em variadas proporções (C1 – C9), dióxido de carbono, e ocasionalmente pequenas porcentagens de N<sub>2</sub>, hidrogênio e hélio. Entre os hidrocarbonetos o metano é o componente dominante (70% - 100%), seguido de hidrocarbonetos mais pesados e CO<sub>2</sub> (Butland, 2006; Clayton, 1998).

De acordo com Butland (2006), a geração de gás é controlada por dois processos distintos de geração: biogênica e termogênica. No primeiro o gás compreende metano e dióxido de carbono, produzidos a partir da decomposição da matéria orgânica por micro-organismos. Porém para se produzir proporções significativas de gás, vários requisitos precisam ser atendidos como um ambiente anóxico, baixa concentração de sulfatos, baixa temperatura, grande quantidade de matéria orgânica, elevado pH, uma porosidade adequada e uma rápida sedimentação. Por esse processo é gerado gás biogênico por dois caminhos: fermentação microbial e redução de CO<sub>2</sub>. Estes se distinguem pelo fato de que bactérias envolvidas no primeiro processo são introduzidas no carvão após o soterramento e a carbonificação. O fluido gerado pelo processo de redução de CO<sub>2</sub> é gerado em carvões com qualquer *rank*, já o gerado a partir de fermentação microbial se forma em carvões de baixo *rank*.

Gases termogênicos são gerados a partir do craqueamento das moléculas de carvão, e formados a altas temperaturas e pressões sendo associados ao aumento da carbonificação.

Diferentemente de um reservatório convencional, onde o gás é encontrado em um estado livre nos poros da rocha, o CBM existe em um estado próximo ao líquido, devido à sorção física (Yee *et al.*, 1993 *apud* Butland, 2006). Com liberação de hidrocarbonetos, dióxido de carbono e água durante a carbonificação, por sorção física, uma pequena porção de gás é armazenada nos microporos do carvão ou em sedimentos associados à camada, por forças de van der Waals (Butland, 2006).

O gás pode ser armazenado no carvão, conforme Croisdale *et al.* (1998), por quatro mecanismos: (1) como gás livre comprimido nos poros, (2) condensado como

sólido ou líquido, (3) dissolvido na estrutura do carvão e (4) adsorvido na superfície interna de poros. Estudos do fluxo de gás mostram que este deve difundir-se através da estrutura microporosa da matriz, até atingir uma fratura do tipo “*cleat*” (Gamson *et al.*, 1996 *apud* Butland, 2006). O fluxo de gás através das camadas de carvão pode ser visto como um processo de três estágios: o gás é desorvido para fora da superfície interna do carvão, posteriormente é difundido através da matriz do carvão onde é levado de microporos até macroporos, e finalmente (como fluxo livre) sai do carvão através dos macroporos, como resposta a uma mudança de pressão.

Conforme Fails (1996) com o aumento do *rank* do carvão ocorre um aumento da capacidade de adsorção de metano pelas camadas de carvão, o que explica o armazenamento de metano no carvão, até atingir a saturação. No processo de carbonificação, o carbono é liberado em altas temperaturas e se liga ao hidrogênio formando metano, este migra nas camadas até um local mais poroso, o que gera o fenômeno de adsorção (adesão de moléculas a uma superfície sólida). Esse aumento também ocorre com o aumento da profundidade (Eddy *et al.*, 1982 *Apud* Kern, 2002).

## 2. LOCALIZAÇÃO E CONTEXTO GEOLÓGICO

Para situar a área de estudo no contexto maior da Bacia do Paraná e da Formação Rio Bonito em particular, a seguir estão descritas as particularidades da formação geológica da região estudada.

### 2.1. Localização da área de estudo

A jazida Chico Lomã situa-se na região nordeste do Rio Grande do Sul, abrangendo uma área de 1.200 km<sup>2</sup> segundo Gomes (2002). A jazida está localizada entre as jazidas de Morungava (a oeste) e Santa Terezinha (a leste) (figura 1). Seu centro está cerca de 10 km a sul da cidade de Santo Antônio da Patrulha/RS (Süffert, 1997). Nessa jazida ocorrem geralmente de 7 a 9 camadas, porém com duas camadas principais, mais espessas, CL4 e CL6 (Gomes, 2002). As demais camadas são na maioria das vezes descontínuas.

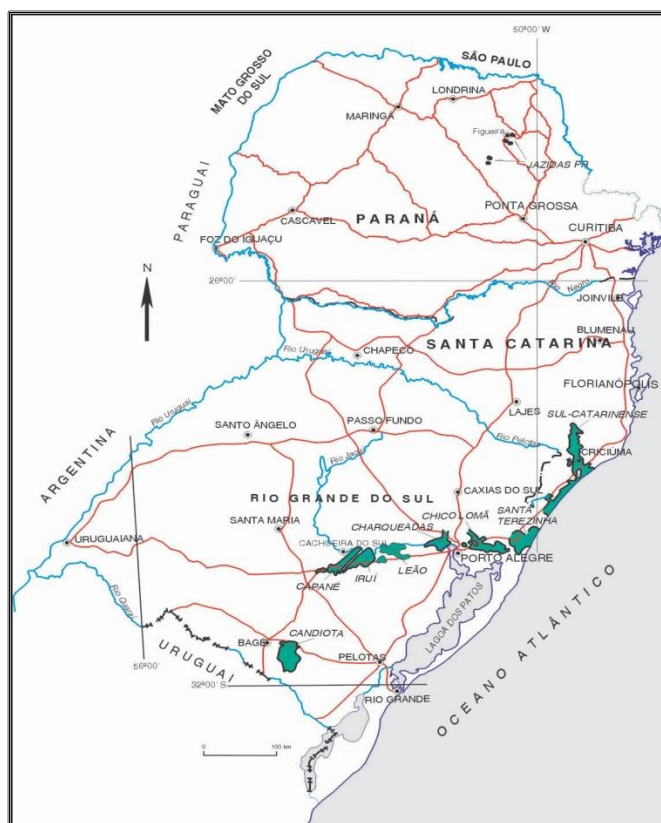


Figura 1. Localização das jazidas de carvão da Bacia do Paraná (Gomes, 2002). A jazida de Chico Lomã situa-se entre as jazidas de Morungava e Santa Terezinha.

## 2.2. Geologia Regional

A área de estudo está inserida no contexto geológico da borda sul-sudeste da Bacia do Paraná (figura 2). Esta compreende uma vasta região de sedimentação, localizada na parte centro-oriental da América do Sul, que evoluiu durante o Paleozóico e o Mesozóico e acomoda um registro sedimentar com idade entre o Neo-Ordoviciano e o Neocretáceo, ou seja, quase 400 milhões de anos dessa região. Essa bacia possui uma área total de 1.500.000 Km<sup>2</sup>(Milani *et al.*, 2007), cerca de 1.000.000 de Km<sup>2</sup> no território brasileiro, abrangendo os estados Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás, São Paulo, Minas Gerais, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Inclui também territórios do Paraguai oriental, nordeste da Argentina e norte do Uruguai (figura 2).

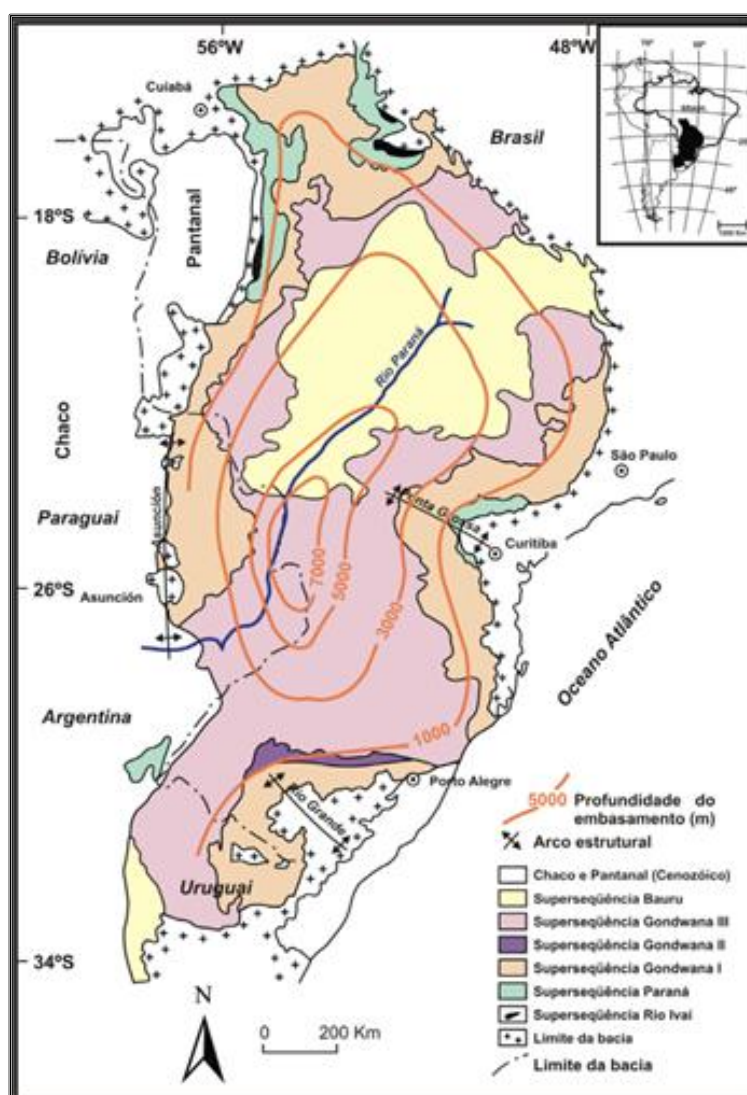


Figura 2. Mapa geológico simplificado da Bacia do Paraná. Fonte: Milani (1997).

Evoluída sobre a crosta continental, exhibe-se com um formato alongado (ovalado) na direção norte-sul, tendo 1.750 quilômetros de comprimento e 950 quilômetros de largura. Seu formato atual deve-se a limites erosivos relacionados à história geotectônica meso-cenozóica do continente.

Na borda leste encontra-se o Arco de Ponta Grossa (indicado na figura 2), uma anticlinal que expressa antigas e profundas falhas, feição associada ao rifteamento do Atlântico Sul. A oeste a bacia limita-se pelo Arco de Assunción, uma flexura associada ao cinturão andino (indicado na figura 2). As outras extremidades delimitam áreas onde estratos sobrepõem-se a rochas cristalinas de províncias cratônicas ou de faixas móveis do embasamento Pré-Cambriano.

Da área total dois terços apresentam-se cobertos por arenitos e lavas basálticas mesozoicos, o outro terço compreende afloramentos onde são observáveis as sequências sedimentares paleozoicas, compreendendo um pacote sedimentar-magmático de espessura em torno de 7 mil metros (Milani, 1997).

Milani *et al.* (1998) reconheceram seis unidades aloestratigráficas de segunda ordem ou supersequências, cada uma delas compreendendo um registro geológico na forma de pacotes rochosos, da ordem de algumas dezenas de milhões de anos de duração. Estes são envelopados por superfícies de discordância de caráter inter-regional e assim constituem o arcabouço stratigráfico da Bacia do Paraná (Milani, 1997). O registro engloba o intervalo de 450 a 65 Ma, e grande parte do tempo encontra-se em hiatos que separam as supersequências; são elas: Rio Avaí (Caradociano-Landoveriano), Paraná (Lockoviano-Frasniano), Gondwana I (Westfaliano-Scythiano) com a ocorrência de depósitos de carvão no Permiano, Gondwana II (Anisiano-Noriano), Gondwana III (Neojurássico-Berriasiano) e Bauru (Aptiano-Maestrichtiano). Onde as três primeiras representam grandes ciclos transgressivo-regressivos paleozoicos, enquanto as demais representam pacotes de rochas sedimentares e ígneas associadas (Milani, 1997).

### **2.3. Geologia Local**

A área de estudo faz parte do pacote gondwânico da bacia, que é de interesse para a mineração em função da existência de camadas de carvão na Formação Rio Bonito (quadro 2). Segundo Milani (1997) a supersequência

Gondwana I engloba o maior volume sedimentar, apresentando uma espessura total da ordem de 2.500 metros, aflorando quase continuamente ao longo da sinéclise. Essa sequência registra um ciclo transgressivo-regressivo completo, e mostra a sucessão temporal de uma grande variedade de condições deposicionais, que evoluíram em um contexto neocarbonífero de sedimentação. Apresenta um amplo intervalo de sedimentação, que varia de uma influência glacial até um árido interior continental dominado por campos de dunas eólicas já no mesozóico. A sequência Gondwana I contém litoestratigraficamente os grupos: Itararé, Guatá e Passa Dois. Temporalmente se localiza entre o Moscoviano (Neocarbonífero) e o Scythiano (Eotriássico) (Milani, 2007).

O Grupo Guatá (quadro 1) engloba as Formações Rio Bonito e Palermo. De acordo com Schneider *et al.* (1974) a Formação Rio Bonito, alvo deste estudo, compreende uma seção arenosa basal, uma seção média, essencialmente argilosa, e uma seção superior, arena-argilosa, contendo as principais camadas carboníferas exploradas em Santa Catarina. A Formação Rio Bonito foi desmembrada em três intervalos: Triunfo, Paraguaçu e Siderópolis. O carvão situa-se no membro Siderópolis, que é composto por arenitos finos a muito finos cinza escuros, intercalados com leitos de argilitos e folhelhos carbonosos e com desenvolvimento local de leitos de carvão. Esta divisão não é notada no estado do Rio Grande do Sul. Na jazida de Chico Lomã o carvão encontrado está associado a camadas de siltito, conglomerados, arenitos e intrusões de diabásio.

Quadro 2. Litoestratigrafia do intervalo de estudo.

Estágio	Seqüência de 2a Ordem Conf. Milani et al. (1994)	Seqüência de 3a Ordem Conf. Holz (1997) ? ? ? ? ?	Litoestratigrafia	
Kunguriano	Carbonífero-eotriássico	Seqüência IV	Grupo Passa Dois	Formação Irati
		Seqüência III	Grupo Guatá	Formação Palermo
Artinskiano		Seqüência II		Formação Rio Bonito
Sakmario		Seqüência I	Grupo Itararé	Formação Rio do Sul

Fonte: Estratigrafia de seqüências de parte do arcabouço da Bacia do Paraná, (cf. Milani et al. 1994, Holz, 1997)



### 3. METODOLOGIA

A metodologia descrita a seguir abrange desde a coleta das amostras em campo até sua preparação e análise por vários métodos.

#### 3.1. Sondagem

A sondagem total do poço CBM-002-CL-RS durou 39 dias, no período de 19 de maio a 27 de junho de 2015. O furo de sondagem foi realizado pela empresa LTW Geologia e Meio Ambiente, dentro de um projeto de pesquisa do Núcleo de Estudos de Carvão e Rochas Geradoras de Petróleo do Instituto de Geociências da UFRGS (figura 3). A sondagem atingiu 551,50 m de profundidade e o diâmetro dos testemunhos foi de 47 mm, sendo estes retirados em barriletes de 3m.



Figura 3. Sondagem do poço CBM-002-CL-RS.

O tipo de sondagem utilizada foi o rotativo a diamante denominada em inglês de *wireline core retrieval* (figura 3), que consiste em uma retirada rápida da amostra, com o objetivo de não perder o metano contido nas camadas e leitos de carvão amostrados. Os testemunhos de rocha são lavados com água e armazenados em caixas de madeira, enquanto que os testemunhos de carvão e folhelho carbonoso são imediatamente selados em cilindros de PVC, para preservar a quantidade de gás metano contido nos carvões, para posteriores medidas de dessorção. Todo processo de retirada dos testemunhos foi acompanhado por cronometragem, que serviu de subsídio para as tabelas de cálculo de dessorção.

Durante o furo de sondagem CBM-002-CL-RS, o período em que foram perfuradas as camadas de carvão da Formação Rio Bonito foi de 22 a 26 de junho de 2015. Neste período foram encontradas 4 camadas de carvão (figura 4), denominadas: camada A, camada B, camada Chico-Lomã 4 (camada CL4) e camada Chico-Lomã 6 (camada CL6). Além de 7 leitos (com tamanho  $\leq 20$ cm) de carvão, dos quais 5 foram amostrados.

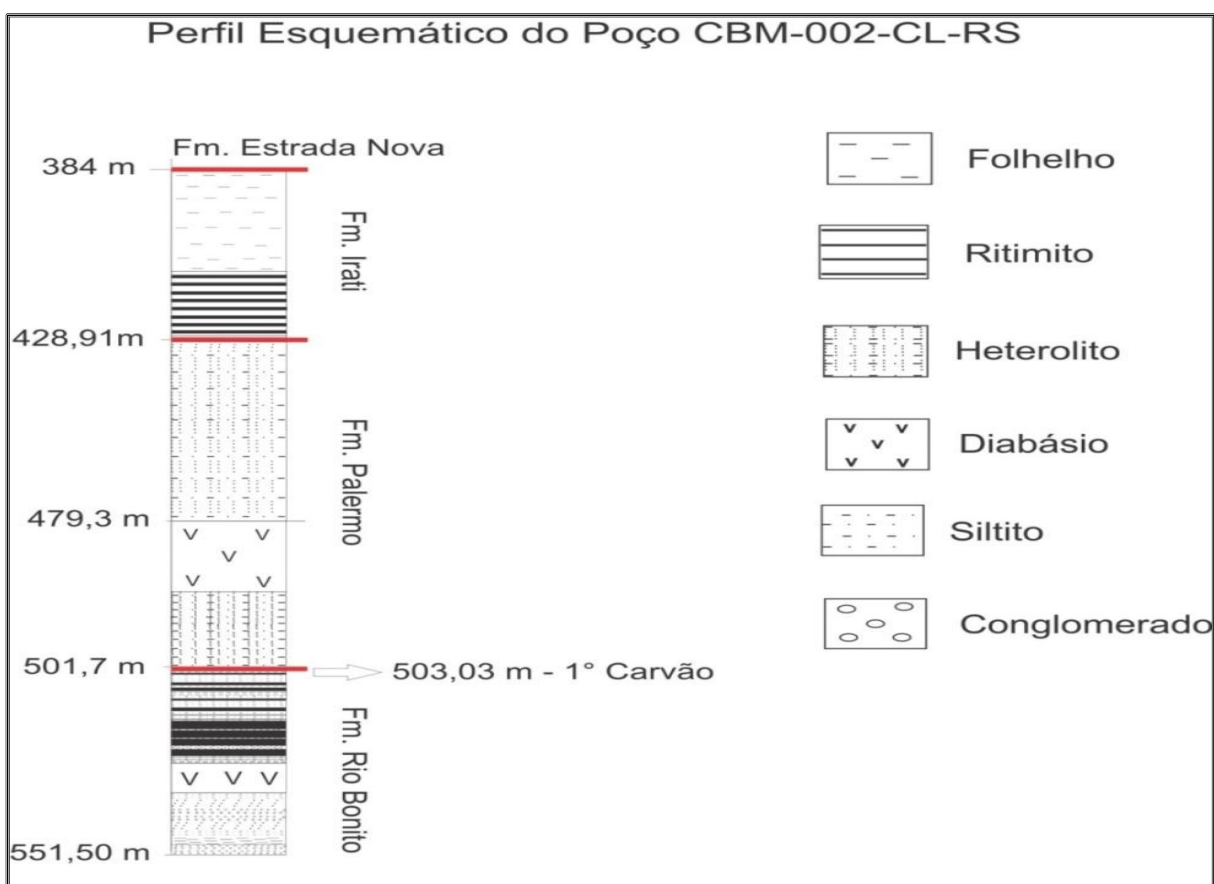


Figura 4. Perfil esquemático do furo de sondagem CBM-002-CL-RS, na região de Chico-Lomã – RS.

### 3.2. Laboratório Móvel

O laboratório móvel utilizado para acomodar as amostras de carvão e folhelho consiste em um *trailer* (figura 5A e 5B), equipado com instrumentos específicos para esse tipo de estudo, como os cilindros de armazenamento (figura 6A) para as medidas de dessorção e um termostato para controlar a temperatura interna da caixa que contém os cilindros (figura 6B). Para determinar a temperatura na profundidade de 500 m na área de estudo, foram utilizados dados de temperatura de um poço de exploração da Petrobrás em Torres e a temperatura média superficial da cidade de Santo Antônio da Patrulha. Sendo assim, a temperatura interna da caixa foi mantida em 34.4° C para simular a temperatura do reservatório durante os ensaios.

Os intervalos de folhelhos carbonosos e carvão amostrados foram colocados em 29 cilindros de PVC, de 36 cm de comprimento e 7 cm de diâmetro cada um. Esses cilindros de PVC foram imediatamente fechados com tampas de alumínio e armazenados dentro da caixa térmica. Antes do fechamento de cada cilindro, estes foram pesados vazios e com as amostras de carvão, com a finalidade de medir a quantidade e o peso do material armazenado. Além disso, cada cilindro teve o oxigênio retirado do seu interior por meio da injeção de um gás inerte (argônio), para evitar a oxidação do material amostrado.



Figura 5. A) Laboratório móvel usado em campo; B) Imagem interna do laboratório, onde está a caixa térmica que mantém os cilindros armazenados, enquanto ocorrem as medidas de dessorção.



Figura 6. A) Cilindro especial fechado, com 36 centímetros; B) Detalhe da caixa térmica de armazenamento dos cilindros, instalada dentro do laboratório móvel.

### 3.3. Medidas de Dessorção do Gás

As medidas de dessorção do gás são iniciadas imediatamente após o fechamento dos cilindros. Foram feitas medidas em intervalos de 2 até 120 minutos no primeiro dia. No segundo dia, foram feitas medidas de 8 em 8 horas, no terceiro dia a cada 12 horas e após isso é feita uma medida por dia.

O procedimento de medida do metano dessorvido consiste em conectar o cilindro a uma coluna de vidro graduada contendo água (figura 7) através de uma mangueira, quando a válvula do cilindro é aberta é possível observar quanto de gás está sendo liberando de dentro do cilindro, conforme a lâmina d'água sobe ou desce dentro do vidro. Juntamente com a medida do gás, a temperatura da caixa que contém os cilindros é anotada em cada medida realizada, assim como a pressão e temperatura ambiente.





Figura 7. Coluna graduada conectada aos cilindros, e usada na quantificação do volume de gás desorvido de cada cilindro.

### 3.4. Descrição de Litotipos

Antes da retirada das alíquotas de amostra para análises petrográficas, foram realizadas as descrições de litotipos das amostras contidas nos cilindros. Litotipos são as bandas com espessura mínima de 1 cm, identificáveis macroscopicamente no carvão segundo ICCP (1971), sobretudo pelo brilho (Stach, 1982). O brilho pode ser afetado pelo tipo de contribuição da matéria orgânica e inorgânica, bem como pelas as variações químicas e físicas sofridas na época da acumulação em turfeiras (Kalkreuth e Leckie, 1989). No trabalho, foi adotada a classificação contida em Diessel (1965) (quadro 3).

Quadro 3. Classificação dos litotipos de carvão (Diesel, 1965), baseado nas bandas de brilho do carvão.

ICCP-Stopes	Diessel (1965)	Descrição
Vitrênio	Brilhante (B)	Brilho vítreo a subvitreo, fratura conchoidal; frágil; até 10% de bandas de carvão fosco.
Clarênio	Bandado Brilhante (BB)	Brilhante, com bandas de carvão fosco que podem variar entre 10-40 %.
	Carvão Bandado (BC)	Bandas de carvão brilhante e fosco que variam entre 40 e 60 %
Durênio	Carvão Fosco Bandado (BD)	Predomínio de carvão fosco com bandas de carvão brilhante em proporções entre 10 a 40 %.
	Carvão Fosco (D)	Fosco e não fraturado, podendo conter até 10 % de carvão brilhante.
Fusênio	Carvão Fibroso (F)	Friável

### 3.5. Análises Petrográficas

Foram realizadas análises petrográficas para definir a composição de constituintes orgânicos e o *rank* do carvão das camadas coletadas na sondagem. As análises petrográficas permitem avaliar características genéticas de carvão que podem revelar importantes informações para definir o potencial de estocagem e produção de metano *in situ*. Foram realizadas análise de macerais e a determinação do grau de carbonificação do carvão, utilizando a técnica da reflectância da vitrinita em seções polidas das amostras.

#### 3.5.1. Preparação das Amostras para Análise Petrográfica

As amostras de carvão passaram por um processo de trituração em um britador de mandíbulas (figura 8A), e, para a análise petrográfica, foram separadas em um intervalo inferior a 0,84 mm e superior a 0,25 mm em peneira (figura 8B). As amostras foram quarteadas e uma fração de 20 g de carvão desta granulometria foi embutida em resina epóxi, na proporção de 80 vol.% de resina (Araldite GY279) e 20 vol.% de endurecedor (Aradur HY951).

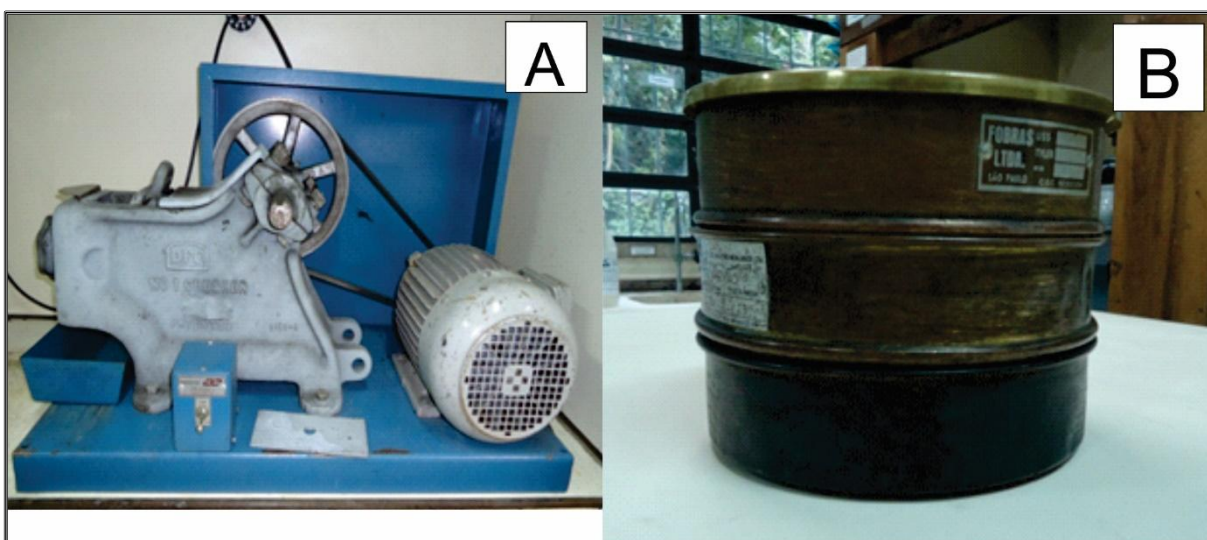


Figura 8. A) Britador de mandíbulas, usado para moer as amostras de carvão; B) Peneira de 0,84 - 0,25 mm, usada para separar grãos para análise petrográficas.

Em seguida, as seções foram submetidas a desgaste e polimento de uma das faces em uma lixadeira automática rotativa da marca Buehler, modelo *Ecomet4*.

O lixamento foi realizado com rebolos de diamante de 45  $\mu\text{m}$  e 9  $\mu\text{m}$  e o polimento com suspensão de aluminas de granulometria 0,3  $\mu\text{m}$  e 0,05  $\mu\text{m}$  nos tecidos *pellon polishing cloth* e *silk cloth* respectivamente, a uma rotação de 200 rpm e com lavagem em água corrente seguidos de banhos de ultrassom, para eliminação da alumina de granulometria mais grosseira do passo anterior, antes de cada novo passo de polimento.

### 3.5.2. Reflectância da Vitrinita

A reflectância da vitrinita ( $R_{\text{random}}\%$ ) é uma metodologia óptica petrográfica em luz refletida, que permite determinar a maturação do carvão. O equipamento utilizado foi um Microscópio *Leica DM6000 M* (figura 9), com câmera acoplada e monitor de resolução de 256 pixels, objetiva de 20X, utilizando óleo de imersão *Immersol 518 F*. As análises foram realizadas no Núcleo de Estudos de Carvão e Rochas Geradoras de Petróleo. O padrão utilizado foi de Yttrium-Aluminium-Granada, com reflectância nominal de 0,895  $R_{\text{random}}\%$  (ISO 7404/5, 1985).

Foram medidos 50 grãos de vitrinita em cada uma das seções polidas. Os resultados permitiram classificar o *rank* dos carvões conforme Taylor (1998)



Figura 9. Microscópio *Leica DM6000 M* utilizado para análise de reflectância da vitrinita.



### 3.5.3. Análise dos Macerais

Para uma avaliação da qualidade do carvão, é importante saber a composição quantitativa de macerais. Isto porque as diferenças na composição dos macerais pode indicar diferenças na composição química e, conseqüentemente, diferenças nas propriedades tecnológicas de um carvão. Além de auxiliar na avaliação do conteúdo de gás relacionado à composição do carvão

A composição de macerais foi determinada conforme a norma (ISO-7404/3, 1985), em que foram identificados 500 pontos, regularmente espaçados em espaços pré-definidos (distância aproximadamente igual à metade do tamanho da partícula, para evitar que mais de um ponto na mesma partícula seja contado). A análise foi feita em luz branca refletida e em luz fluorescente (excitada com lâmpada de Hg e um filtro azul), que ajuda na identificação dos macerais do grupo liptinita. O resultado da análise petrográfica é expresso em Vol%. Essas análises foram realizadas no mesmo equipamento onde foi analisada a reflectância da vitrinita.

### 3.6. Análises Químicas

Foram realizadas as seguintes análises químicas:

- Análises imediatas, para quantificação de umidade, matéria volátil, teor de cinzas e carbono fixo,
- Difração de raios X, para identificação das fases minerais;
- Poder calorífico, para determinar a capacidade de gerar calor dos carvões,
- Cromatografia gasosa, para quantificação da fração dos diversos hidrocarbonetos gasosos e CO<sub>2</sub>.

#### 3.6.1. Preparação das Amostras para Análises Químicas

Para preparar as amostras para análise, as amostras foram secas com temperatura de  $\leq 40^{\circ}\text{C}$ . Depois de passar pelo triturador de mandíbulas e homogeneizadas em uma peneira de tamanho de grão  $< 4,5$  mm, as amostras foram quarteadas e reduzidas a subamostras. Essas subamostras foram pulverizadas em

tamanho <200 mesh e separadas em potes com 20 gramas destinadas a cada uma das análises químicas.

### **3.6.2. Análise Imediata**

Composta por quatro tipos de análises: % de umidade, % de cinzas, % de matéria volátil e carbono fixo. Com a análise imediata se obtém a quantidade relativa matéria volátil em oposição à matéria orgânica não volátil (carbono fixo). Determina-se a quantidade de umidade no carvão e a quantidade de compostos inorgânicos na forma de resíduos ou cinzas deixados pelo carvão quando este é submetido à combustão. Os resultados são expressos normalmente em uma base seca.

#### **3.6.2.1. Porcentagem de Umidade**

Fornece o percentual de umidade na amostra de carvão, pelo cálculo da perda de peso da amostra quando esta é submetida a um aquecimento sob condições rígidas de controle de temperatura, tempo e atmosfera (ASTM, 1991a).

Em um forno pré-aquecido queima-se, com temperatura entre 104°C-110°C, 1,0 g de amostra em um cadinho de vidro por uma hora aplicando-se um fluxo de ar seco. No fim, pesa-se a amostra novamente e calcula-se o teor de umidade através da equação:

$$\% \text{ Umidade} = [(A-B)/A] \times 100$$

Onde:

A = massa da amostra em gramas (1,0 g)

B = massa da amostra após o aquecimento

#### **3.6.2.2. Porcentagem de Cinzas**

Foi determinada pela pesagem dos resíduos após a queima do carvão sob condições rígidas de controle de peso da amostra, temperatura, tempo e atmosfera.

O procedimento consiste (ASTM, 1991b) em levar 1,0 g de amostra em um cadinho de porcelana a um forno de mufla (Quimis), inicialmente em temperatura ambiente. A rampa de aquecimento é tal que se atinge uma temperatura de 500°C em uma hora e 750°C no final da segunda hora, mantendo a essa temperatura por mais duas horas. Durante o aquecimento é mantida um fluxo de ar, que renova a atmosfera do forno 2-4 vezes por minuto (2-4 kgf/cm). Depois de resfriada, a amostra é pesada novamente e a porcentagem de cinzas é calculada conforme a equação:

$$\% \text{ Cinza} = [(A-B)/C] \times 100$$

Onde:

A = massa do cadinho com tampa + resíduos de cinza

B = massa do cadinho com tampa vazio

C = massa da amostra utilizada antes da queima (1,0 g)

### 3.6.2.3. Porcentagem de Matéria Volátil

É estabelecida pela perda de peso da amostra corrigida para o conteúdo de umidade. O procedimento consiste (ASTM, 1991c) em levar 1,0 g de amostra de carvão em um cadinho de platina com tampa a um forno de mufla pré-aquecido a 950°C durante 7 minutos. Durante o aquecimento se mantém um fluxo de ar para renovação de atmosfera na mufla. Depois de resfriada, a amostra é pesada novamente.

A porcentagem de matéria volátil é calculada em duas etapas. Inicialmente se calcula a perda de peso:

$$\% \text{ de Perda de Peso} = [(A-B)/A] \times 100$$

Onde:

A = massa da amostra utilizada (1,0 g)

B = massa da amostra após o aquecimento

No segundo passo se obtém o % de Matéria Volátil, utilizando o teor de umidade obtido anteriormente:

$$\% \text{ de Matéria Volátil} = \% \text{ Perda de Peso} - \% \text{ de umidade}$$

#### **3.6.2.4. Carbono Fixo**

O teor de carbono fixo é obtido pela soma das porcentagens de umidade, cinza e matéria volátil, subtraído de 100, conforme a seguinte equação:

$$\% \text{ de Carbono Fixo} = 100 - (\% \text{ Umidade} + \% \text{ Cinza} + \% \text{ Matéria Volátil})$$

#### **3.6.3. Poder Calorífico**

A análise baseia-se na combustão de uma amostra sob atmosfera de oxigênio em uma Bomba Adiabática Calorimétrica (*IKA* modelo *C2000 Basic*) (figura 10), realizado nos laboratórios da empresa Carbonífera Metropolitana, Criciúma, SC, e foi realizado conforme as normas da ASTM (ASTM, 1991d). Coloca-se um cilindro dentro de uma quantidade de água conhecida e com uma temperatura pré-definida. O acréscimo da temperatura dessa água causado pela combustão é monitorado. O valor real é então comparado com uma amostra de referência (ácido benzóico). O cilindro é preenchido com oxigênio puro (99,95%) em uma pressão de 30 bar. O valor do poder calorífico é o cálculo do acréscimo da temperatura da água no interior da bomba depois que a ignição da combustão da amostra ocorre dentro do cilindro.



Figura 10. Bomba Calorimétrica da marca IKA WERKE C2000 basic/control

O valor do poder calorífico da amostra é calculado pela seguinte equação:

$$C = \frac{H_{ob}.m}{\Delta T}$$

Onde:

C = Poder Calorífico da amostra.

H<sub>ob</sub> = Poder calorífico do ácido benzóico.

m = massa da amostra.

ΔT = Aumento da temperatura durante a combustão da amostra.

#### 3.6.4. Difração de Raios X

A análise de DRX é utilizada para determinar as fases presentes nas amostras de carvão das camadas encontradas na sondagem. O espalhamento de raios X monocromáticos em planos atômicos pode gerar interferência construtiva (difração) apenas quando é obedecida a lei de Bragg ( $(2d \sin \theta = n \lambda)$ ), de modo que o difratograma medido em um difratômetro de raios X apresenta picos característicos do mineral (indicando a presença da distância interplanar  $d$ ). Este conjunto de picos

permite identificar o mineral por comparação com fichas armazenadas no banco de dados *Powder Diffraction File* (PDF-2).

Neste trabalho os difratogramas foram obtidos pelo autor utilizando o difratômetro de raios X (XRD6000 Shimadzu) do Laboratório de Microanálise do Instituto de Física da UFRGS (figura 11.). Foi utilizada a configuração Bragg-Brentano, mantendo o tubo de cobre fixo, e movimentando o berço com a amostra em um ângulo  $\theta$ , e o detetor (com monocromador de grafite) em um ângulo  $2\theta$ . O intervalo analisado foi de  $2\theta$  de 5 a  $70^\circ$ , com passo angular de  $0,05^\circ$ .

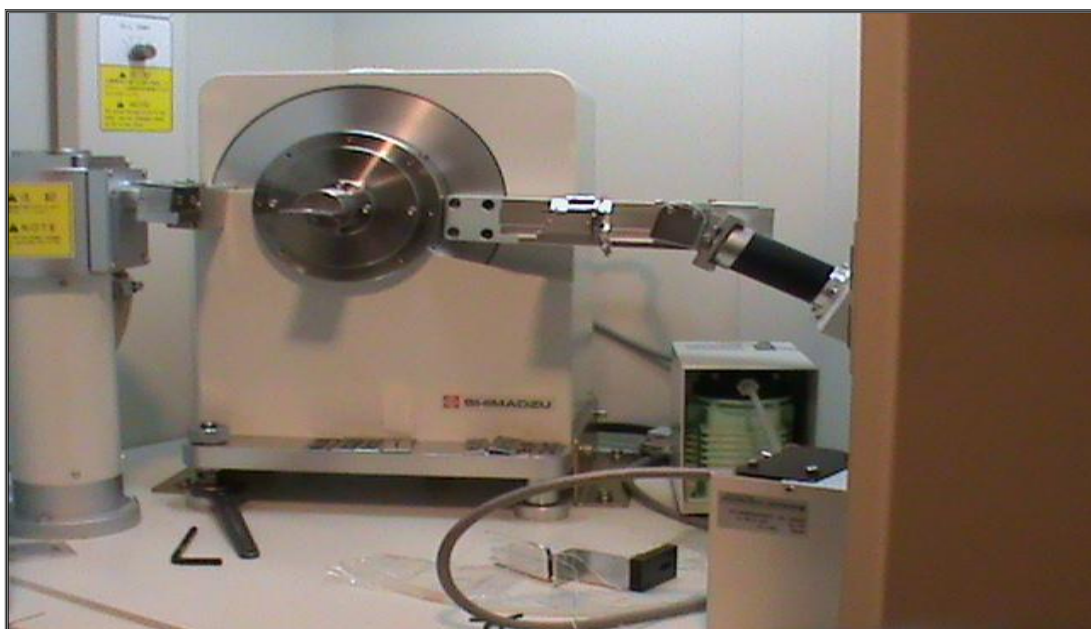


Figura 11. Difratômetro Shimadzu, modelo XRD600, utilizado na análise de carvão pulverizado. A amostra está localizada no centro da imagem e o braço do detector com monocromador de grafite à direita.

### 3.6.5. Composição do Gás

Os hidrocarbonetos e não-hidrocarbonetos foram quantificados por cromatografia em fase gasosa com o uso de *FID* (*flame ionization detector*) e *TCD* (*thermal conductivity detector*), respectivamente. O equipamento utilizado foi o cromatógrafo gasoso Agilent 7890A (G3440A) (figura 12).

Algumas amostras foram selecionadas para análise no Laboratório de Geoquímica Orgânica, no Instituto de Geociências da UFRGS, e analisadas utilizando um cromatógrafo gasoso para obter a composição de gás – metano, propano e butano e gases não-hidrocarbonetos (CO<sub>2</sub>).



Figura 12. Cromatógrafo gasoso Agilent 7890A (G3440A), com um detector TCD em série com FID.

As amostras de gás foram coletadas (figura 13) em embalagens de amostragem específicas (*sample bag SKC*). Antes da análise as embalagens foram inertizadas através de injeção de argônio e posterior evacuação. Após, as embalagens foram conectadas aos cilindros, através de uma linha de conexão e foi realizado vácuo entre os dois sistemas. Realizado o vácuo na conexão, foi aberta a válvula do cilindro para transferir a amostra de gás para a embalagem.





Figura 13. Sample bag (SKC) conectada ao cilindro para a coleta de CBM.



## **4. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Os resultados obtidos das diferentes análises descritas no capítulo de metodologia estão relacionados a seguir.

### **4.1. Descrição de litotipos**

O carvão fosco (D) é o litotipo dominante no carvão encontrado no furo de sondagem realizado, perfazendo 53,13%, seguido do carvão tipo fosco bandado (BD) com 34,57%. Já o carvão bandado (BC) ocorreu em 10,3%, o carvão do tipo bandado brilhante compõe 1,17% e o carvão brilhante perfaz apenas 0,78% do perfil. As camadas de carvão frequentemente apresentam pirita framboidal em níveis milimétricos e carbonatos preenchendo fraturas. É notável o aumento do litotipo fosco (D) desde o topo em direção à base da formação.

### **4.2. Análises Petrográficas**

Nesta seção estão apresentados os resultados de quantificação dos macerais (vitritina, inertinita e liptinita) e os resultados de reflectância de vitritina.

#### **4.2.1. Análise de grupos de Macerais**

Analisando todas as amostras dos cilindros a partir de sua composição petrográfica, sem a presença de matéria mineral, observa-se uma grande variação. O range da vitritina total varia de 69,6% a 98,2%, a liptinita de 0,0% até 1,1% e a inertinita de 0,5% até 30,3% (tabela 1). Pode-se afirmar então a predominância da vitritina e inertinita sobre a liptinita (figura 14).

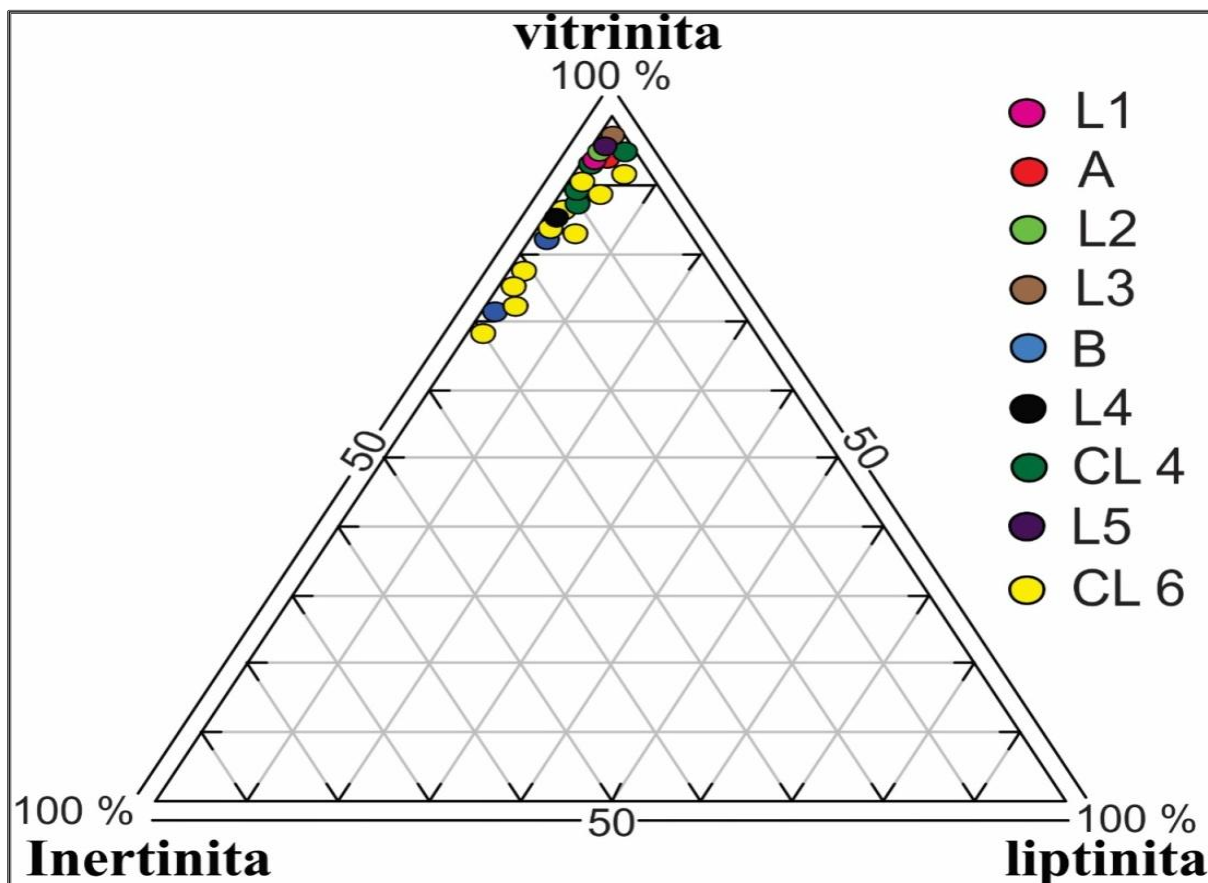


Figura 14. Ternário da composição de grupos de macerais, para cada uma das amostras coletadas. L1 - Leito 1, A - Camada A, L2 - Leito 2, L3 - Leito 3, B - Camada B, L4 - Leito 4, CL4 - Camada Chico Lomã 4, L5 - Leito 5, CL6 - Camada Chico Lomã 6.

O cilindro 1, amostra 15033, que compõe o leito 1 apresenta em seu volume 94% de vitrinita e 5,9% de inertinita. Os cilindros 2 e 3 (amostras 15034 e 15035), formadores da camada A, mostram a variância interna dos valores de macerais. O valor da vitrinita aumenta em direção ao topo da camada, pois na sua base (cilindro 3 – amostra 15035) o valor é de 96,8% e no topo (cilindro 2 – amostra 15034) o valor é 99,4%(tabela 1). Porém os valores de inertinita diminuem em direção ao topo. Estes variam de 3,1% (cilindro 3 – base) para 0,5% (cilindro 2 – topo). Os cilindros 4 e 5, leitos 2 e 3, apresentam valores 95,5% e 97,1% de vitrinita, respectivamente (tabela 1). Quanto aos valores de inertinita são observados 4,4%% no cilindro 4 (leito 2), e 2,5% no cilindro 5 (leito 3).

Nas amostras dos cilindros 6 e 7 (camada B – topo e base), os valores de vitrinita são 71,0% e 80,9% respectivamente (tabela 1). Os valores de inertinita são 28,0% e 18,0%, respectivamente. Com esses resultados é notada a diminuição de vitrinita e aumento de inertinita em direção ao topo da camada (cilindro 6). A lipitinita

não apresenta variação interna na camada, sendo o valor de 0,9% em ambos os cilindros.

Os cilindros 9, 11, 12, 13, 14 e 15 compõem a camada CL4; e mostram um range entre 98,2% a 80,6% de vitrinita em seu interior (tabela 1). Onde o menor valor pertence ao cilindro 9 (amostra 15041), e o maior ao cilindro 12 (amostra 15043). É constatada a diminuição do conteúdo de vitrinita em direção ao topo da camada (cilindro 9). Quanto à inertinita, uma oscilação entre 1,94% a 19,0%(tabela 1); sendo o maior valor referente o cilindro 9 e o menor ao cilindro15 (amostra 15046). Com isso é notado o aumento do valor de inertinita em direção ao topo da camada. O valor de liptinita é de 0,28%, esta é só notada na parte mais superficial da camada (cilindro 9).

No cilindro 16 (amostra 15047), pertencente ao leito 5 observa-se um valor de 80,9% de vitrinita e 18,0% de inertinita (tabela 1). Na sequência de cilindros, do 17 até o 29, representantes da camada CL6 também é notada a variação dos conteúdos de macerais. A vitrinita apresenta um range que varia de 69,6% a 95,4%(tabela 1). O conteúdo de vitrinita muda positivamente de 74,0%, na base da camada (cilindro 29) para 95,4% em sua parte superior (cilindro 17). Os valores de inertinita variam de 4,54% a 30,3%; sendo notada sua diminuição em direção ao topo da camada (cilindro 17).

Incluindo a matéria mineral no conteúdo das amostras dos cilindros, a vitrinita apresenta uma variação de 4,6% a 72,8%, a liptinita varia de 0,0% a 0,8% e a inertinita de 0,2% a 18,4% (tabela 1). A matéria mineral apresenta um range entre 17,0% e 93,4%. E é representada por pirita e quartzo. A pirita tem um valor máximo de 14,8% (cilindro 24 - amostra 15055) e o quartzo um valor de 9,2% (cilindro 6 – amostra 15038).

As 4 camadas analisadas também apresentam um conteúdo de macerais diferente (figura 15) entre si, quando recalculados de acordo com a espessura de cada uma destas (tabela 2). Sem incluir a matéria mineral, a camada A apresenta o maior conteúdo de vitrinita, 98,0%, e o menor conteúdo de inertinita, 2,0%(tabela 2). O que pode ser associado ao fato da camada ter sido depositada em um ambiente mais úmido, que é favorável a formação de vitrinita.

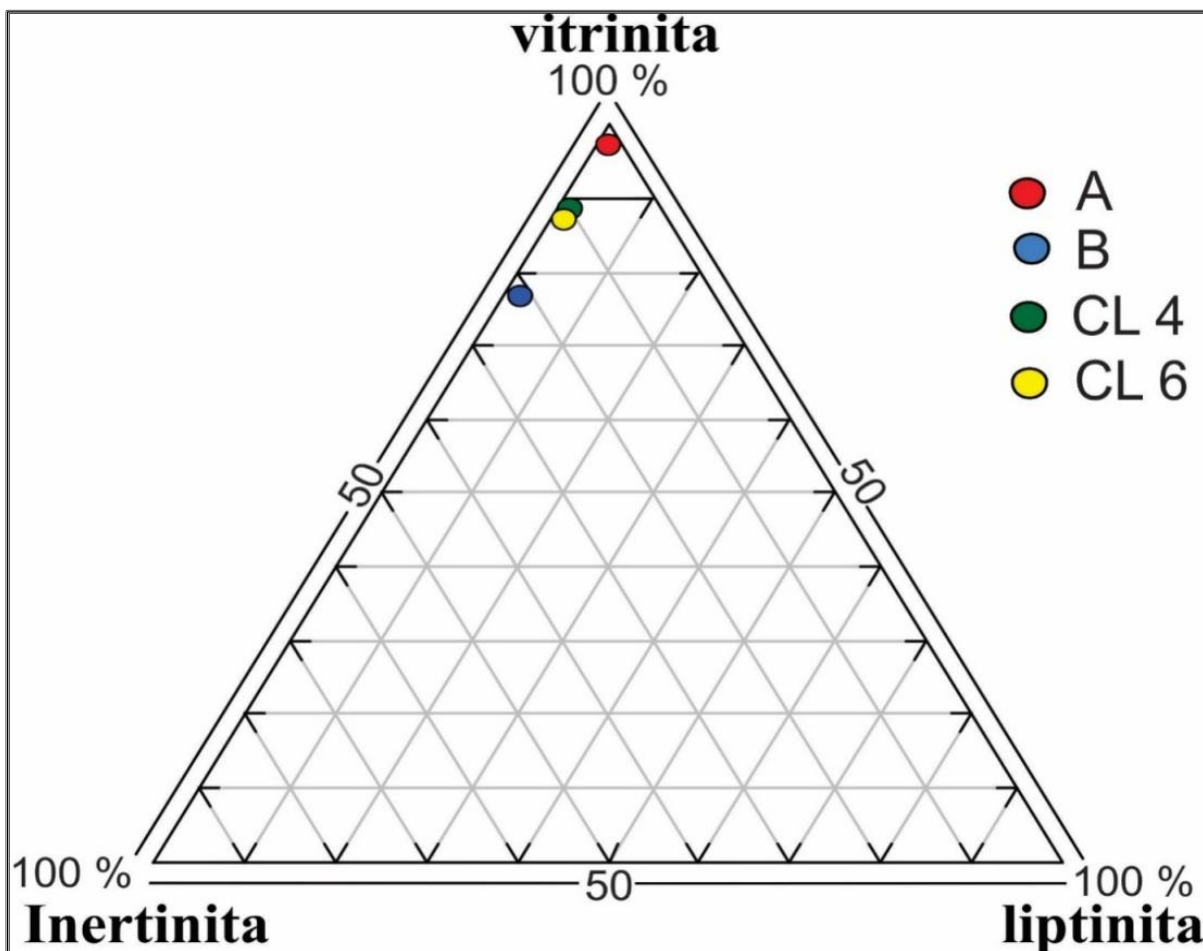


Figura 15. Diagrama ternário mostrando a composição petrográfica dos grupos de macerais (sem matéria mineral) das amostras dos cilindros.

A Camada B tem o menor valor de vitrinita, 78%, o maior valor de inertinita com 21,1% e 0,9% de liptinita (tabela 2). Que pode ser associado ao fato da deposição ter se dado em um ambiente onde a matéria orgânica já estava sendo oxidada, aumentando o conteúdo de inertinita. A camada CL4 apresenta um conteúdo de vitrinita de 89,5% e 10,5% de inertinita (tabela 2). A vitrinita está representada em uma quantidade de 88,5% e a inertinita com 11,5%, na camada CL6.

Avaliando os valores com o porcentual de matéria mineral, recalculados para as camadas (tabela 2); a camada CL6 é a que apresenta o maior valor de matéria mineral com 68,9%. A camada B é a que apresenta menor valor, de 23,7%.

Tabela 1. Composição maceral, mineral e macerais recalculados (sem matéria mineral). L1 à L4 – Leitões de 1 a 4, CA – Camada A, CB – Camada B, CL4 e CL – Camadas Chico Lomã 4 e 6, MM – Matéria Mineral, MMND – Matéria Mineral não diferenciada.

Cilindro	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Nº Amostra	15033	15034	15035	15036	15037	15038	15039	15040	15041
Camadas e leitões	L1	CA	CA	L2	L3	CB	CB	L4	CL4
Total vitrinita (%)	72,8	38,6	62,2	55,4	68,0	46,6	67,2	53,0	56,8
Vitrinita sem MM	94,0	99,4	96,8	95,5	97,1	71,0	80,9	85,4	80,6
Esporinita	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,2
Cutinita	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,4	0,8	0,0	0,0
Total liptinita (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,6	0,8	0,0	0,2
Liptinita sem MM	0,0	0,0	0,0	0,0	0,28	0,9	0,9	0,0	0,28
Fusinita	1,74	0,0	0,2	1,6	0,4	6,2	7,6	0,2	7,6
Semifusinita	1,5	0,0	1,0	0,4	0,6	9,8	6,4	3,2	3,6
Inertodetrinita	1,35	0,2	0,8	0,6	0,8	2,4	1	3,4	2,2
Total inertinita (%)	4,6	0,2	2,0	2,6	1,8	18,4	15	9,0	13,4
Inertinita sem MM	5,9	0,5	3,1	4,4	2,5	28,0	18,0	14,5	19,0
Quartzo	6,2	5	4,8	1,8	2,0	9,2	5,6	3,4	5,2
Pirita	5,8	12,6	9,0	2,2	6,0	7,6	1,2	8,0	4,4
MMND	10,47	43,6	22,0	38,0	22,0	17,6	10,2	26,6	20,0
Matéria Min. (%)	22,47	61,2	35,8	42,0	30,0	34,4	17,0	38,0	29,6
Total V+L+I (%)	77,4	38,8	64,2	58	70,0	65,4	83,0	62,0	70,4

Tabela 1. Continuação

Cilindro	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Nº Amostra	15042	15043	15044	15045	15046	15047	15048	15049	15050
Camadas e leitões	CL4	CL4	CL4	CL4	CL4	L5	CL6	CL6	CL6
Total vitrinita (%)	35,2	56,0	24,0	47,2	30,2	19,4	16,8	40,6	33,8
Vitrinita sem MM	89,7	98,2	89,8	94,4	98	80,9	95,4	89,8	90,6
Esporinita	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0
Cutinita	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Total liptinita (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0
Liptinita sem MM	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1	0,0	0,0
Fusinita	0,8	0,2	1,2	0,6	0,2	0,2	0,2	1,0	0,6
Semifusinita	2,0	0,4	0,4	1,4	0,2	0,6	0,2	2,8	1,2
Inertodetrinita	1,2	0,4	1,6	0,8	0,2	0,2	0,4	0,8	1,6
Total inertinita (%)	4,0	1,0	2,7	2,8	0,6	1,0	0,8	4,6	3,4
Inertinita sem MM	10,2	1,75	10,1	5,6	1,94	18,0	4,54	10,1	9,1
Quartzo	2,6	2,0	0,8	4,0	1,8	1,4	2,2	1,8	1,8
Pirita	5,8	2,4	3,2	4,6	1,6	0,0	1,0	1,4	0,8
MMND	52,4	38,6	69,2	41,4	65,8	78,2	79,0	51,6	60,2
Matéria Min. (%)	60,8	43,0	73,2	50,0	69,2	79,6	82,2	54,8	62,8
Total V+L+I (%)	39,2	57,0	26,7	50,0	30,8	20,4	17,6	45,2	37,2

Tabela 1- Continuação.

Cilindro	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
Nº Amostra	15051	15052	15053	15054	15055	15056	15057	15058	15059	15060
Camadas e leitões	CL6	CL6	CL6	CL6	CL6	CL6	CL6	CL6	CL6	CL6
Total vitrinita (%)	10,2	4,6	64,6	49,4	51,8	9,0	15,4	13,4	34,4	16,0
Vitrinita sem MM	83,6	69,6	90,4	91,1	94,8	75	91,6	77,9	85,1	74,0
Esporinita	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Cutinita	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Total liptinita (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Liptinita sem MM	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Fusinita	1,4	1,0	2,6	2,4	1,0	2,0	0,6	3,0	2,2	4,0
Semifusinita	0,2	0,2	0,8	1,6	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Inertodetrinita	0,4	0,8	3,4	0,8	0,6	1,0	0,8	0,8	3,8	1,6
Total inertinita (%)	2,0	2,0	6,8	4,8	2,8	3,0	1,4	3,8	6,0	5,6
Inertinita sem MM	16,3	30,3	9,5	8,8	5,12	25	8,3	22,0	14,8	25,9
Quartzo	2,6	1,4	0,8	0,6	1,0	0,8	0,8	0,4	0,0	0,2
Pirita	1,6	1,4	0,4	0,4	14,8	0,8	1,2	0,2	0,0	0,0
MMND	83,6	90,6	27,4	44,8	29,6	86,4	81,2	82,2	59,6	78,2
Matéria Min. (%)	87,8	93,4	28,6	45,8	45,4	88,0	83,2	82,6	59,6	78,4
Total V+L+I (%)	12,2	6,6	71,4	54,2	54,6	12,0	16,8	17,2	40,4	21,6

Quanto ao valor de macerais, nas camadas incluindo a presença de matéria mineral (tabela 2), a vitrinita varia de 27,5% a 59,26%. A liptinita apresenta uma variação entre 0,0% e 0,7%, e a inertinita com um range entre 1,0% e 16,4%. A camada B apresenta o maior conteúdo de vitrinita, liptinita e inertinita. A camada CL6 a que apresenta menor quantidade de vitrinita e a camada A menor quantidade de inertinita.

Tabela 2. Valores de composição maceral e conteúdo de matéria mineral, recalculados para cada camada. L1 à L4 – Leitões de 1 a 4, CA – Camada A, CB – Camada B, CL4 e CL – Camadas Chico Lomã 4 e 6, MM – Matéria Mineral.

Macerais	L1	CA	L2	L3	CB	L4	CL4	L5	CL6
Vitrinita	72,8	48,9	57,9	68	59,26	53,0	44,0	19,4	27,5
Liptinita	0,0	0,0	0,0	0,2	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0
Inertinita	4,6	1,0	2,5	1,8	16,4	9,0	5,2	1,0	3,6
Matéria Mineral	22,5	50,0	39,6	30,0	23,7	38,0	50,8	79,6	68,9
Vitrinita sem MM	94,0	98,0	95,8	97,2	78,0	85,5	89,5	95,1	88,5
Liptinita sem MM	0,0	0,0	0,0	0,2	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0
Inertinita sem MM	6,0	2,0	4,2	2,6	21,1	14,5	10,5	4,9	11,5

Analisando o sistema ao todo, é notável o aumento do conteúdo de matéria mineral em relação ao da vitrinita com a profundidade (figura 16).



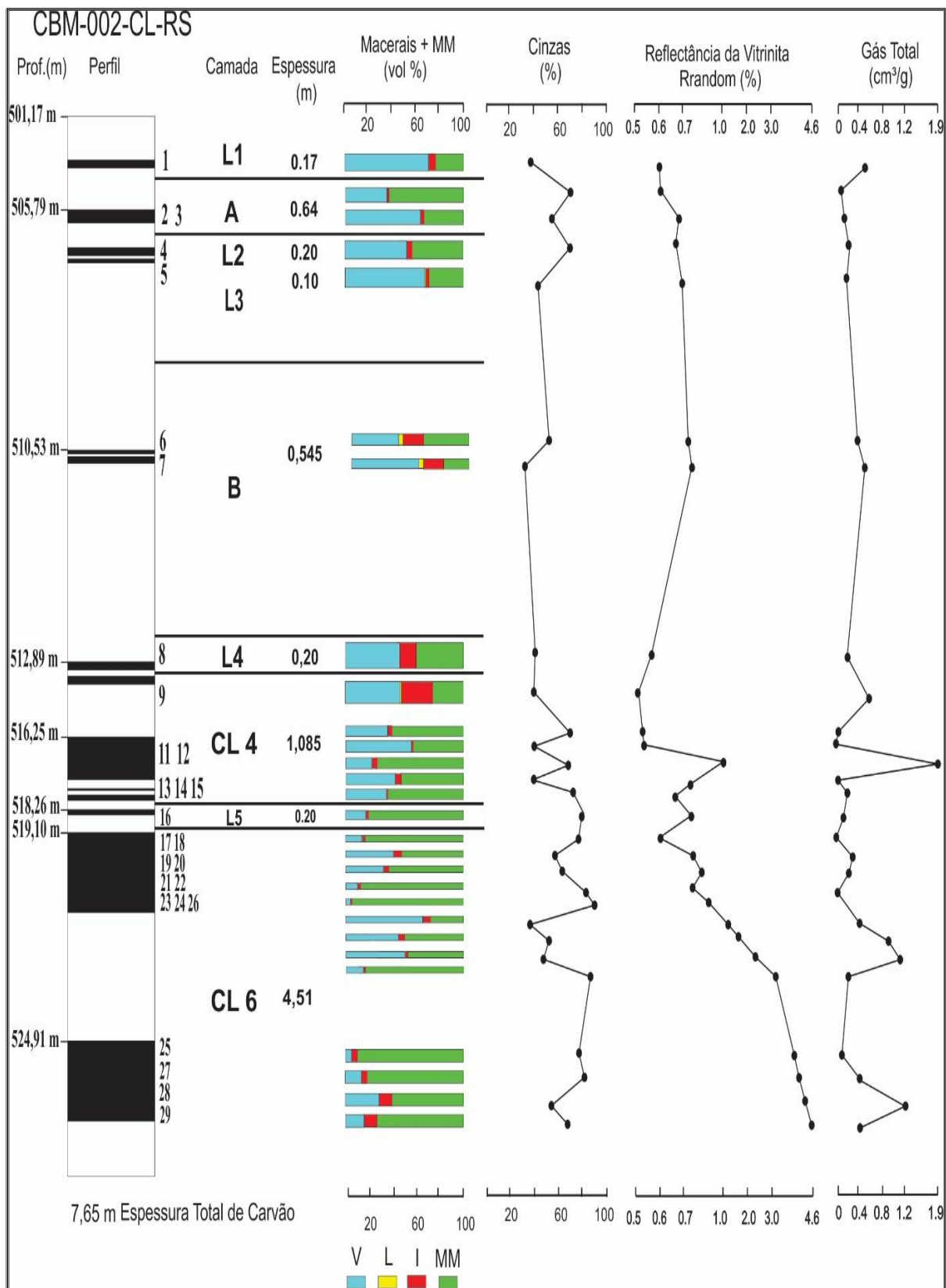


Figura 16. Perfil esquemático das camadas de carvão, cilindros, espessura das camadas, conteúdo de macerais e matéria mineral, cinzas, reflectância da vitrinita e de gás total. MM – matéria mineral.

#### 4.2.2. Reflectância da vitrinita

Os resultados das reflectâncias (tabela 3) das amostras mostram uma variação entre 0,52 e 4,65 Rrandom (%). O menor valor é referente à amostra 15041, pertencente à camada CL4, e o maior referente à amostra 15060 referente à camada CL6. Os valores referentes às amostras de 15040 a 15043, entre 0,526 e 0,568 Rrandom (%), destoam dos outros valores por serem relativamente baixos. Estes estão ligados a um pequeno aumento do conteúdo de matéria mineral, que é perceptível desde a base da camada B até a parte superior da camada CL4. Os valores obtidos indicam, de acordo com Taylor *et al.* (1998), um *rank* Betuminoso alto volátil C para a camada A, betuminoso alto volátil B para a camada B, betuminoso alto volátil A para a camada CL4 e betuminoso alto volátil C – Meta Antracito para a camada CL6. Os histogramas obtidos para cada amostra estão no apêndice A.

Observa-se o aumento do Rrandom (%), a partir do topo da camada CL4. Isto é devido à proximidade com um corpo intrusivo de diabásio, o calor gerado afeta as camadas de carvão que se encontram acima deste. É notado, também, o aumento valor da reflectância dentro da Formação Rio Bonito, na área, com o aumento da profundidade.

Tabela 3. Valores obtidos de reflectância a vitrinita para cada amostra e seu respectivo rank.

Cilindro	Amostra	Camada/Leitos	Rr %	Rank
1	15033	L1	0,616	BAV C
2	15034	Camada A	0,618	BAV C
3	15035		0,683	BAV B
4	15036	L2	0,674	BAV B
5	15037	L3	0,703	BAV B
6	15038	Camada B	0,718	BAV B
7	15039		0,724	BAV B
8	15040	L4	0,568	BAV C
9	15041	CL4	0,526	BAV C
11	15042		0,536	BAV C
12	15043		0,537	BAV C
13	15044		1,013	BAV A
14	15045		0,721	BAV B
15	15046		0,657	BAV B
16	15047	L5	0,672	BAV B
17	45048	CL6	0,606	BAV C
18	15049		0,738	BAV B
19	15050		0,767	BAV A
20	15051		0,723	BAV B
21	15052		0,791	BAV A
22	15053		1,32	BMV
23	15054		1,529	BBV
24	15055		2,988	Antracito
25	15056		4,078	Antracito
26	15057		3,186	Antracito
27	15058		4,286	MA
28	15059		4,563	MA
29	15060	4,657	MA	

### 4.3. Análises Químicas

Os resultados das análises químicas estão mostrados a seguir na forma de tabelas.

#### 4.3.1. Análise Imediata

O percentual de cinzas das amostras (tabela 4) mostrou valores que variam de 35,09% a 88,9%, sendo o menor correspondente a amostra 15039 (cilindro 7) da camada B e o maior pertencente a amostra 15021 da camada CL6. Os valores de umidade variaram de 0,88% a 3,28%. O menor valor refere a amostra 15043 da camada B, e o maior a amostra 15058 da camada CL6.

Quanto à matéria volátil obteve um range entre 5,23% e 34,86%. A camada com o menor conteúdo de matéria volátil é a CL6, indicado na amostra 15059; o maior percentual é observado na camada CL4, avaliado na amostra 15043 (tabela 4). Quando recalculados a uma base seca e livre de cinzas (d.a.f – *dry ash free*), os valores têm uma variância entre 13,42% e 100%. Onde o menor e o maior valor pertencem à camada CL6, são referentes às amostras 15053 (cilindro 22) e 15054 (cilindro 15054) respectivamente. A análise de carbono fixo indicou um range entre 0,06% e 41,15% (tabela 4). O menor valor analisado nas amostras de 15036 a 15039, representados pelos leitos 2, 3 e a camada B. O maior valor é referente a amostra 15055 da camada CL6.

Os valores recalculados por camadas (tabela 4), considerando os valores das espessuras das camadas, têm-se um range variável entre 42,55% e 81,14% para cinzas. Com a camada CL6 apresentando o maior valor e a camada B o menor. Quanto à umidade o percentual varia de 1,47% a 2,58%, onde a camada A apresenta o menor valor e a camada CL6 o maior. A camada CL6 apresenta 9,07% de matéria volátil, o menor percentual. E a camada B o maior valor, 24,29%. A camada B e a camada A apresentam o menor e o maior percentual de carbono fixo, 0,06% e 19,09% respectivamente.

Com um total de 27 amostras analisadas, pode-se afirmar que 70,37% destas podem ser classificadas como rocha carbonosa (> 50% de cinza) segundo a norma internacional da Comissão Econômica da Europa para as Nações Unidas. Enquanto

29,62% destas amostras são classificadas como carvão de categoria muito inferior (30 – 50% de cinza).

Tabela 4. Resultados da análise imediata: cinza (%), umidade (%), matéria volátil (%), matéria volátil (d.a.f) e carbono fixo (%). Prof – profundidade.

Camadas/ Leitos	C	Prof. (m)	Amos.	Espe (m)	Cinza (%)	Umid. (%)	Mat. Vol (%)	Mat. Vol (daf)	Car. Fixo (%)
L1	1	503,03	15033	0,17	38,23	1,34	27,24	44,09	34,53
Camada A	2	505,79	15034	0,36	70,27	1,66	14,42	48,50	15,31
	3	506,16	15035	0,28	55,64	1,24	20,41	46,00	23,95
A-Total				0,64	63,86	1,47	17,04	47,16	19,09
L2	4	507,45	15036	0,2	71,71	1,66	14,65	99,59	0,06
L3	5	507,82	15037	0,10	44,98	1,89	21,4	99,72	0,06
Camada B	6	510,47	15038	0,21	54,46	1,71	17,58	99,65	0,06
	7	510,83	15039	0,33	35,09	1,52	28,5	99,78	0,06
B-Total				0,54	42,55	1,59	24,29	99,75	0,06
L4	8	512,89	15040	0,2	40,83	1,76	23,99	40,54	35,18
CL4	9	513,25	15041	0,24	40,47	1,50	25,00	41,30	35,53
	11	516,25	15042	0,36	70,46	2,23	12,99	43,97	16,55
	12	516,61	15043	0,11	40,41	0,88	34,86	58,49	24,73
	13	516,97	15044	0,05					
	14	517,35	15045	0,21	67,26	2,03	11,33	99,47	0,06
CL4-Total	15	518,07	15046	0,11	72,21	2,22	10,99	99,45	0,06
				1,08	56,76	1,77	11,15	41,26	8,01
L5	16	518,26	15047	0,2	80,51	2,61	8,98	46,07	15,87
CL6	17	519,10	15048	0,36	78,04	2,4	9,28	42,25	12,68
	18	519,46	15049	0,36	59,22	2,36	11,08	27,17	29,7
	19	519,9	15050	0,36	62,55	1,52	13,43	35,86	24,02
	20	520,35	15051	0,36	81,28	1,81	7,76	41,45	10,96
	21	520,71	15052	0,36	88,11	1,91	7,16	60,21	4,73
	22	521,44	15053	0,36	37,72	1,79	8,36	13,42	53,92
	23	521,8	15054	0,36	53,66	2,05	8,26		
	24	522,16	15055	0,31	48,84	1,56	10,01	19,56	41,15
	25	522,68	15056	0,36	88,9	3,24	6,01	54,19	5,08
	26	524,19	15057	0,36	78,59	1,98	5,78	98,97	0,06
	27	524,91	15058	0,30	81,89	3,28	5,91	98,99	0,06
	28	524,94	15059	0,30	55,37	3,12	5,23	98,86	0,06
	29	525,3	15060	0,36	74,41	2,21	4,9	98,79	0,06
CL6-Total				4,51	81,14	2,58	9,07	37,90	14,85

### 4.3.2. Poder calorífico

Os valores de poder calorífico, das amostras dos cilindros, variam de 20 Kcal/Kg a 5197 Kcal/Kg (tabela 5). Onde o maior valor pertence ao cilindro 22 (amostra 15053) e o menor ao cilindro 25 (amostra 15056), ambos pertencentes à camada CL6. Este valor pode ser relacionado com o baixo teor de cinza (37,72%) encontrado no cilindro.

Analisando os valores recalculados pela espessura de cada camada, é observada uma variância entre 2011,53 Kcal/Kg e 4398,81 Kcal/Kg. Onde a camada B e a camada CL6 apresentam o menor e maior valor, respectivamente. Os maiores valores encontrados, tanto nos cilindros e recalculados para as camadas, podem ser relacionados com o baixo teor de cinza. No caso do cilindro 22 (amostra 15033), seu conteúdo de cinzas é de 37,72% (tabela 5); e no caso da camada B o seu teor de cinza total é de 42,55%, o menor dentre as camadas (tabela 4).

Tabela 5. Valores de poder calorífico obtido para cada amostra, e posteriormente recalculado de acordo com a espessura de cada camada. PC – poder calorífico

Camadas/ Leitos	C	Profundidade (m)	Amostra	PC (Kcal/Kg)
L1	1	503,03	15033	5086
Camada A	2	505,79	15034	2123
	3	506,16	15035	3413
A-Total				2687,37
L2	4	507,45	15036	1932
L3	5	507,82	15037	4371
Camada B	6	510,47	15038	3301
	7	510,83	15039	5087
B-Total				4398,81
L4	8	512,89	15040	4669
CL4	9	513,25	15041	4711
	11	516,25	15042	1862
	12	516,61	15043	3542
	13	516,97	15044	
	14	517,35	15045	2011
	15	518,07	15046	1840
CL4-Total				2594,73
L5	16	518,26	15047	491
CL6	17	519,10	15048	1149
	18	519,46	15049	2984
	19	519,9	15050	2597
	20	520,35	15051	409
	21	520,71	15052	45
	22	521,44	15053	5197
	23	521,8	15054	3425
	24	522,16	15055	3901
	25	522,68	15056	20
	26	524,19	15057	1106
	27	524,91	15058	457
	28	524,94	15059	3439
	29	525,3	15060	1660
CL6-Total				2011,35

### 4.3.3. Difractometria de Raios X

A mineralogia das amostras de carvão estudadas, determinada pela difração de raios X (os difratogramas obtidos para cada amostra estão no apêndice B), mostrou um predomínio de quartzo e caulinita, seguidos secundariamente calcita, argilo mineral (com distância interplanar de 10 angstroms), plagioclásio, pirita, feldspato mostrados na tabela 6. Ocorrem minerais como leucita e titanomagnetita.

Tabela 6. Resultados das análises de difratometria de Raios-X.

Camadas/ Leitos	C	Amos.	Arg.	Caol.	Qtz	Py	Mica	Calc.	Dol.	Plg.
L1	1	15033		X	X	X		X		
Camada A	2	15034	x	x	x	x				x
	3	15035	x		x	x				x
L2	4	15036		x	x		x			x
L3	5	15037		x	x	x	x			x
Camada B	6	15038		x	x	x		x		x
	7	15039		x	x			x		
L4	8	15040		x	x	x	x	x		
CL4	9	15041	x	x	x	x		x		x
	11	15042		x	x	x				
	12	15043			x			x	x	
	14	15045		x	x	x			x	
	15	15046		x	x					
L5	16	15047		x	x					x
CL6	17	15048		x	x					x
	18	15049		x	x	x		x		x
	19	15050		x	x		x	x		
	20	15051	x	x	x					
	21	15052	x	x	x					
	22	15053	x	x	x					x
	23	15054		x	x	x		x		x
	24	15055		x	x	x	x	x		x
	25	15056	x	x	x					
	26	15057	x	x	x					
	27	15058	x	x	x		x			
	28	15059	x	x	x					
	29	15060		x	x		x			



#### 4.3.4. Composição do gás

A composição do gás foi analisada e mostra que este é composto predominantemente por metano, apresentando um range de 85,0% até 96,3%. Seguido de quantidades menores de etano com variação entre 2,9% a 15,0%; de propano com range entre 0,0% e 0,3%; também dióxido de carbono entre 0,0% e 1,5% (tabela 7).

Tabela 7. Composição dos gases analisados por amostra. Cil- Cilindro.

Amostra	Cil.	Metano (%)	Etano (%)	Propano (%)	Dióxido de Carbono (%)
15039	7	94,6	3,4	0,3	1,5
15041	9	85,0	15,0	0,0	0,0
15053	22	96,3	2,9	0,0	0,7
15054	23	95,3	4,3	0,1	0,1
15055	24	95,6	4,0	0,1	0,1

#### 4.4. Medidas de Dessorção do Gás

Foram utilizados 28 cilindros para comportar as amostras do intervalo carbonoso e realizar as medidas de dessorção. As medidas iniciaram no dia 23 de junho e se estenderam até o dia 24 de agosto, contabilizando cerca de 1500 horas de dessorção e medidas. Para cada cilindro foi gerado um gráfico a dessorção do gás CBM na amostra. Os valores de gás perdido (Gás-p), gás medido (Gás-m) e gás total (Gás-Total) são apresentados na tabela 8.

Observa-se nos gráficos que algumas amostras não dessorveram gás nos períodos iniciais, isto se deve ao fato do gás não haver preenchido por completo o volume do cilindro.

Tabela 8. Parâmetros de avaliação das amostras e a estimativa de gás CBM dessorvido Gás-m – Gás medido em cm<sup>3</sup>/g, Gás-p – gás perdido, Gás-T – Gás Total,

Camadas/ Leitos	C	Prof. (m)	Amos.	Rr (%)	Cinza (%)	Gás-p	Gás-m	Gás-T
L1	1	503,03 – 503,4	15033	0,616	38,23	0,08	0,50	0,58
Camada A	2	505,79-506,16	15034	0,618	70,27	0,01	0,14	0,14
	3	506,16 – 506,53	15035	0,683	55,64	0,01	0,18	0,19
L2	4	507,45 – 507,82	15036	0,674	71,71	0,05	0,18	0,23
L3	5	507,82 – 508,19	15037	0,703	44,98	0,09	0,1	0,18
Camada B	6	510,47 – 510,83	15038	0,718	54,46	0,03	0,35	0,38
	7	510,83 – 511,19	15039	0,724	35,09	0,01	0,42	0,43
L4	8	512,89 – 513,25	15040	0,568	40,83	0,03	0,23	0,26
CL4	9	513,25 – 513,61	15041	0,526	40,47	0,01	0,46	0,47
	11	516,25 – 516,61	15042	0,536	70,46	0,00	0,11	0,12
	12	516,61 – 516,97	15043	0,537	40,41	0,00	0,08	0,08
	13	516,97 – 517,33	15044	1,013		0,26	1,67	1,94
	14	517,35 – 517,71	15045	0,721	67,26	0,02	0,12	0,14
	15	517,71 - 518,07	15046	0,657	72,21	0,07	0,13	0,20
L5	16	518,26 – 518,62	15047	0,672	80,51	0,04	0,08	0,12
CL6	17	519,10 – 519,46	15048	0,606	78,04	0,00	0,08	0,09
	18	519,46 – 519,82	15049	0,738	59,22	0,05	0,30	0,35
	19	519,9 – 520,26	15050	0,767	62,55	0,02	0,23	0,25
	20	520,35 – 520,71	15051	0,723	81,28	0,05	0,04	0,09
	21	520,71 – 521,07	15052	0,791	88,11	0,04	0,04	0,08
	22	521,44 – 521,8	15053	1,32	37,72	0,03	0,48	0,51
	23	521,8 – 522,16	15054	1,529	53,66	0,02	0,84	0,86
	24	522,16 – 522,52	15055	2,988	48,84	0,06	0,99	1,05
	25	524,19 – 524,55	15056	4,078	88,9	0,00	0,10	0,11
	26	522,68 – 523,04	15057	3,186	78,59	0,01	0,21	0,23
	27	524,55 – 524,21	15058	4,286	81,89	0,06	0,37	0,44
	28	524,94 – 525,30	15059	4,563	55,37	0,00	1,26	1,26
	29	525,3 – 525,66	15060	4,657	74,41	0,00	0,42	0,43

Os valores de dessorção de cada cilindro variam entre 0,04 até 1,67 cm<sup>3</sup>/g. Na figura 17 é mostrado o gráfico do cilindro com menor e maior valor dessorvido, o

cilindro 20 (amostra15051) pertencente à camada CL6. Os gráficos de dessorção para cada um dos cilindros de armazenamento utilizados estão no apêndice C.

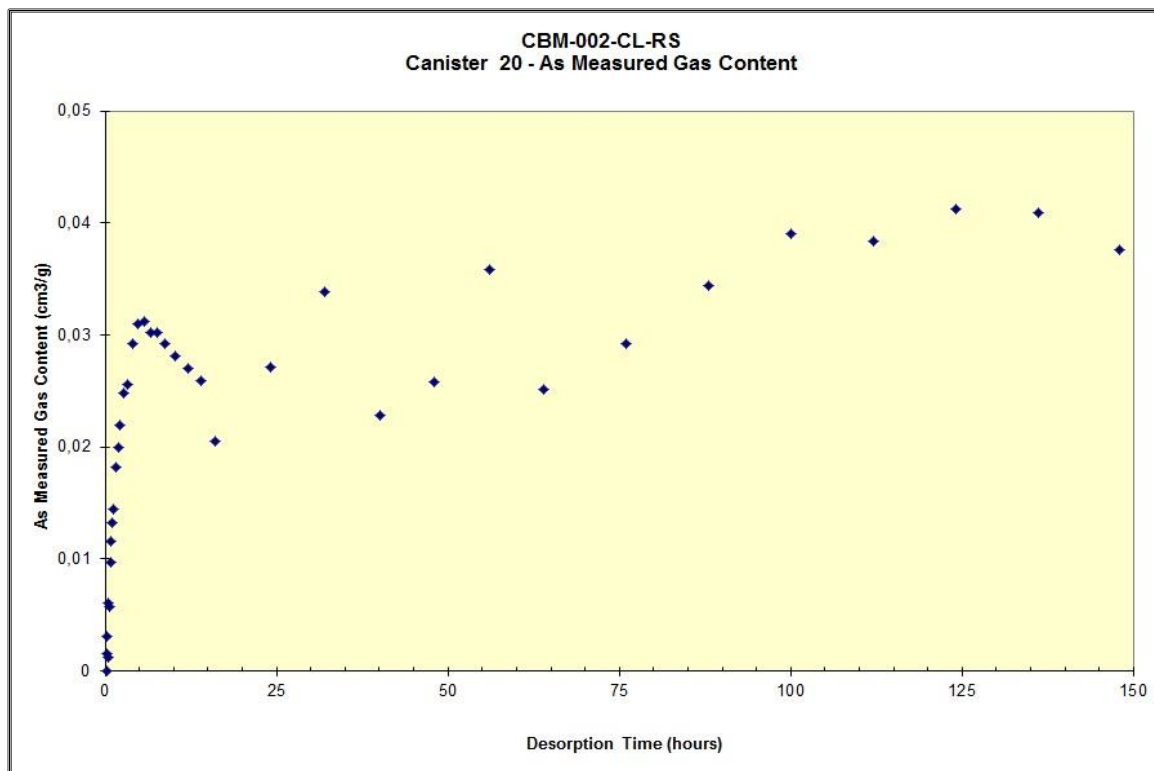


Figura 17. Curva de dessorção de gás natural em carvão. Gráfico demonstrativo da quantidade de gás dessorvida pelo período de tempo do cilindro 20.

Quando analisado o volume total de gás por camada (tabela 9), valor gerado a partir do cálculo relativo à espessura destas, é obtido um range entre 0,16 e 0,42  $\text{cm}^3/\text{g}$ . Sendo que o valor maior pertence à camada CL6 (cilindros 17 a 29), e o menor valor é representativo da camada A (cilindro 2 e 3).

Tabela 9. Valores de gás medido (dessorvido) e gás total, recalculados de acordo com a espessura de cada camada.

Camada	Gás medido (cm <sup>3</sup> /g)	Gás total (cm <sup>3</sup> /g)
Camada A	0,1575	0,16
Camada B	0,392	0,41
Camada CL4	0,26	0,29
Camada CL6	0,395	0,42

Quando comparamos os valores de gás medido obtidos com os valores encontrados no poço CBM-001-CL-RS (Levandowski, 2013), nota-se uma pequena diminuição dos valores referentes às amostras das camadas A, B e CL4. Porém observa-se que nas amostras, analisadas neste trabalho, a camada CL6 apresenta gás e valores de dessorção com uma variação de 0,04 a 1,26 cm<sup>3</sup>/g.

Estes resultados de volume de gás são coerentes com as propriedades do carvão encontradas. Pois o gás começa a ser gerado quando o carvão atinge um *rank* Betuminoso Alto Volátil (em uma temperatura de aproximadamente 80°C), e quanto maior o *rank*, maior o volume de gás gerado.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com os resultados obtidos pelas análises petrográficas e químicas, juntamente com a interpretação dos resultados os carvões da Formação Rio bonito, na Jazida de Chico Lomã, têm as características necessárias para a geração de gás.

A partir das análises petrográficas, foi possível verificar que o *rank* do carvão jazida varia de Betuminoso Alto Volátil C a Meta-Antracito. *Rank* necessário para a geração de gás.

Os volumes de gás desorvidos do carvão variam de 0,04 até 1,67 cm<sup>3</sup>/g. E os valores de gás total, variam de acordo com a espessura de cada uma, e compõe um range de 0,16 a 0,42 cm<sup>3</sup>/g.

O gás é composto, em sua maioria, por metano, seguido de etano, e quantidades mais baixas de propano e dióxido de carbono.

Recomenda-se a realização de testes de adsorção de gás, pois quando comparados aos testes de desorção podemos obter uma estimativa do grau de saturação de gás na jazida. Assim poderíamos saber o volume aproximado de gás associado às camadas de carvão.

A realização de mais poços também é recomendada, com o objetivo de verificar se em outras áreas da jazida o gás ficou armazenado dentro do carvão; além de contribuir para um melhor entendimento dos dados obtidos e posterior comparação.

## REFERÊNCIAS

- ASTM, 1991a. Annual Book of ASTM Standards. Sec 05.05. *Standard Test Methods for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke*. ASTM, D 3173-87, Philadelphia, PA, p. 324-325.
- ASTM, 1991b, Annual Book of ASTM Standards. Sec. 05.05 *Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal*. ASTM, D 3174-89, Philadelphia, PA, p.326-328.
- ASTM, 1991c, Annual Book of ASTM Standards. Sec 05.05. *Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke*. ASTM, D 3175-89a, Philadelphia, PA, p.329-331.
- ASTM, 1991d, Annual Book of ASTM Standards. Sec 05.05. *Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke by the Adiabatic Bomb Calorimeter*. ASTM, D 2015-91, Philadelphia, PA, p.266-273.
- Butland, C. 2006. **Coal seam gas associations in the Huntly, Ohay e Greymouth Regions, New Zealand**. 2006. 163f. Dissertação de Mestrado. Department of Geological Sciences, University of Canterbury, New Zealand.
- Clayton, J. L. 1998. Geochemistry of coal bed gas – A review. **International Journal of Coal Geology**, 35: 159-173.
- Crosdale, P. J.; Beamish, B. B.; Valix, M. 1998.Coalbed methane sorption related to coal composition. **International Journal of Coal Geology**, [S.l.], v. 35, p.
- Diessel, C., 1965. *Correlation of macro-and micropetrography of some New South Wales coals*. Proceedings 8th Commonwealth Mining and Metallurgical Congress, vol.6, p. 669-677.
- Fails, T. 1996. Coalbed Methane potential of some variscan foredeep basins. In: Gayer, R. & Harris, I. *Coalbed Methane and Coal Geology*, edited. Geological Society Special Publication, 344 p, London, N° 109.
- Gomes, AP. Carvão do Brasil, turfa agrícola: geologia, meio ambiente e participação estratégica na produção de eletricidade no Sul do Brasil. Porto Alegre, 164p.,2002.
- ICCP 1971. International Committee for Coal and Organic Petrology. *International handbook of coal petrography*. 2 ed. Paris, Centre National de La Recherche Scientifique. Supplement.
- ISO-7404/3. 1985. Methods for the Petrographic Analysis of Bituminous Coal and Anthracite. Part 3. *Methods of determining maceral group composition*. 4p.
- Kalkreuth, W. and Leckie, D.A. (1989): Sedimentological and petrographical characteristics of Cretaceous strand plain coals: a model for coal accumulation from the North American western interior sea way. In: Lyons, P.C. and Alpern, B., (Ed) *Peat and Coal: Origin, Facies and Depositional Models; International Journal of Coal Geology*, Vol. 12, p. 381–424.
- Kalkreuth, W.; Holz, M.; Casagrande, J.; Cruz, R.; Oliveira, T.; Kern, M.; Levandowski, J.; Rolim, S. 2008. O Potencial de CoalbedMethane (CBM) na jazida de Santa Terezinha – resultados preliminares da modelagem 3D da jazida e do poço de exploração CBM001-ST-RS. **Revista Brasileira de Geociências**, 38 (2), 1–15.
- Kalkreuth, W., Holz, M., Levandowski, J., Kern, M. Casagrande, J., Weniger, P, Krooss, B. 2013. The coalbed methane (CBM) potential and CO<sub>2</sub> storage capacity of the Santa Terezinha Coalfield, Paraná Basin, Brazil - 3D modelling, and coal and carbonaceous shale characteristics and related desorption and adsorption capacities in samples from exploration borehole CBM001-ST-RS. *Energy Exploration & exploitation* 31(4), 485-527.

Kern, M. L. 2002. **Avaliação do potencial gerador de metano das jazidas de Chico Lomã e Santa Terezinha, nordeste do Rio Grande do Sul.** Dissertação de Mestrado, PPGeo/ IG-UFRGS, Porto Alegre, 182 p.

Levandowski, J. 2013. **Características petrográficas e geoquímicas das camadas de carvão do poço CBM 001-CL-RS, jazida de Chico-Lomã e sua relação com coalbed methane associado,** tese de doutorado PPGeo/IG-UFRGS, Porto Alegre, 173p.

Lourenzi, P. 2014. **O potencial de geração CBM (coalbed methane) da jazida sul catarinense da Bacia do Paraná, Brasil: Características petrográficas e químicas das camadas Barro Branco, Irapuá e Bonito.** Dissertação de Mestrado, PPGeo/IG-UFRGS, Porto Alegre, 67p.

Milani, E.J. 1997. *Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica Fanerozóica do Gondwana sul-ocidental.* Tese de Doutorado. 225f. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

Milani, E.J. & Ramos, V.A. 1998. Orogenias Paleozóicas no Domínio Sul-Occidental do Gondwana e os Ciclos de Subsidência da Bacia do Paraná. *Revista Brasileira de Geociências.* 28(4):473-484.

Milani, E. J.; Melo, J. H. G.; Souza, P. A.; Fernandes, L. A.; França, A. B. 2007. Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências da Petrobrás,** Rio de Janeiro, 15 (2): 265–287.

MINEROPAR. 1980. Oportunidades empresariais para a exploração de recursos minerais no Paraná. Governo do estado do Paraná, Secretaria da Indústria e Comércio, Minerais do Paraná, S/A. 278p.

Murray, D. 1996. Coalbed methane in the U.S.A.: analogues for worldwide development. *In: Coalbed methane and Coal Geology.* Geological Society Special Publication, London, UK, 109: 1-12.

Schneider, R.L., Muhlmann, H., Tommasi, E., Medeiros, R.A., Daemon, R.F. & Nogueira, A.A. 1974. Revisão Estratigráfica da Bacia do Paraná. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 28. *Anais,* Porto Alegre, SBG, 1:41-65.

Schopf, J.M. 1956. A definition of coal. *Economic Geology,* 51: 521-527.

Stach, E., Mackowsky, M.Th., Teichmuller, M., Taylor, G., Chandra, G., Teichmuller, R. 1982. *Coal Petrology,* 3.ed. Berlin-Stuttgart: GebruederBorntraeger. 535p.

Süffert, Telmo, 1997. *Carvão nos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina -Porto Alegre :* CPRM,40p.

Taylor, G.H., Teichmüller, Davis, A., Diessel, C.F.K., Littke, R & Robert, P. 1998. *Organic Petrology.* Berlin, 704p

## APÊNDICE A

Histogramas obtidos na análise de reflectância da vitrinita realizada nas 28 amostras de carvão. Onde o eixo x se refere aos valores de reflectância e o eixo y ao número de pontos.

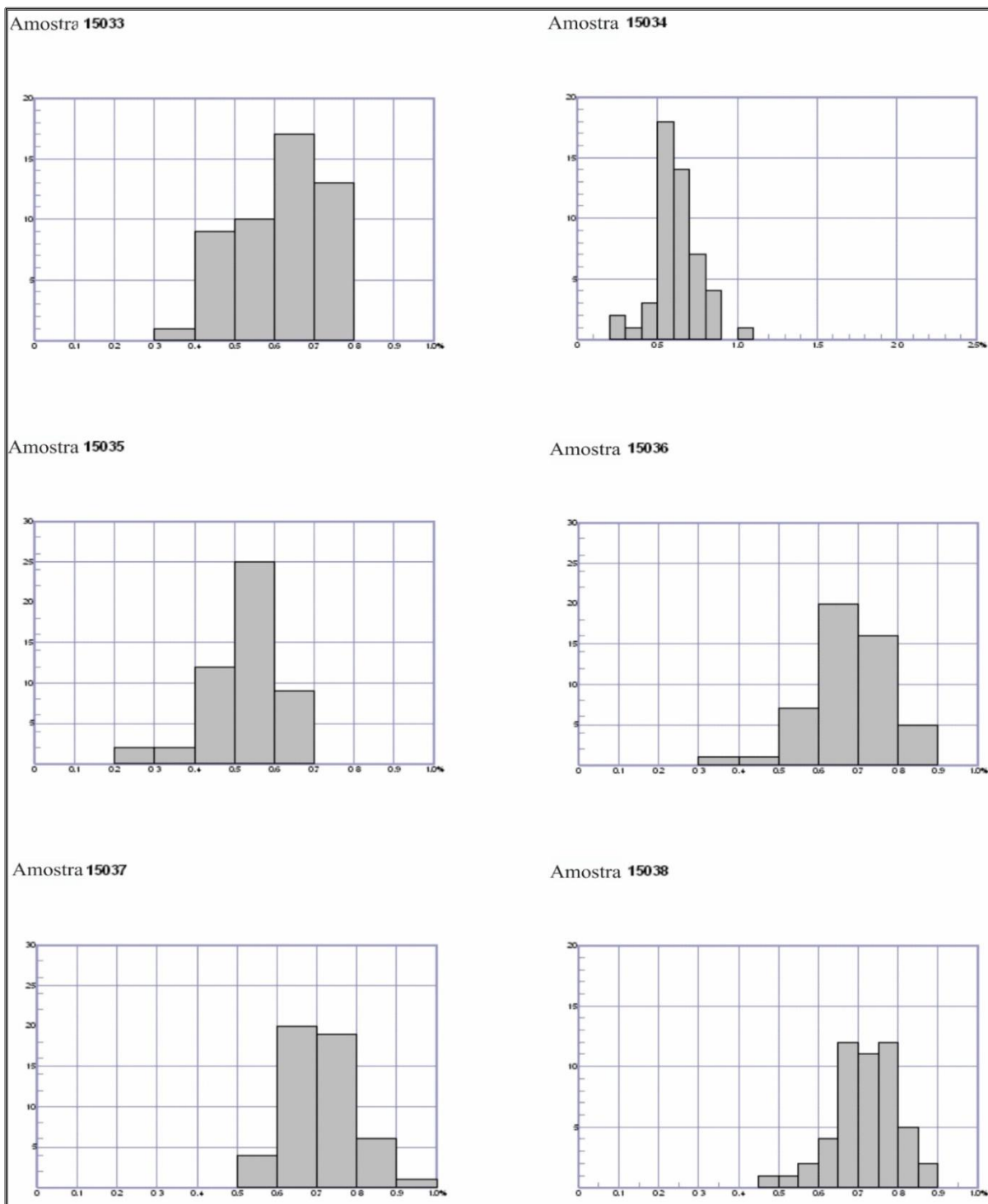
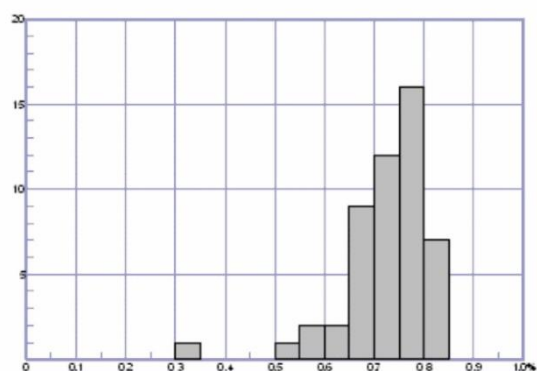


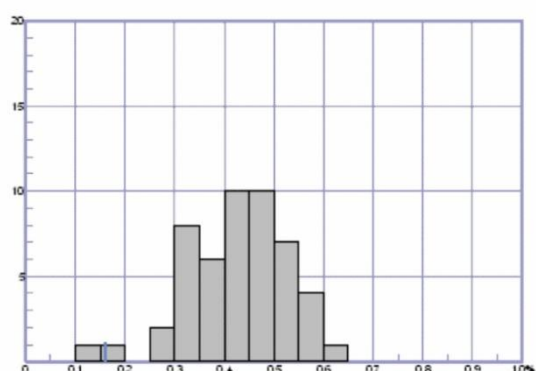
Figura 18. Histogramas referentes às amostras analisadas.



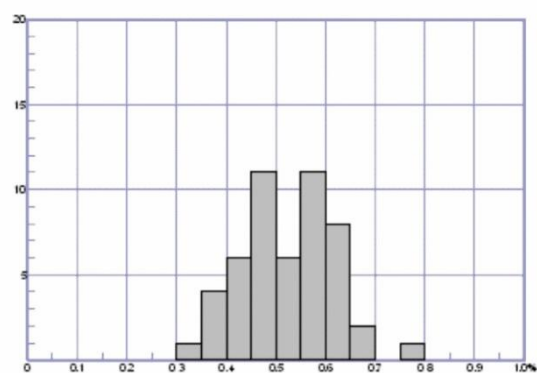
Amostra 15039



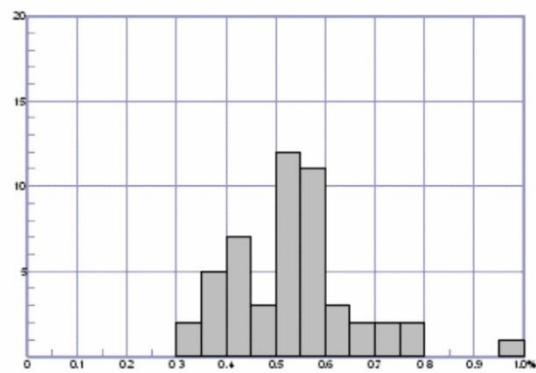
Amostra 15040



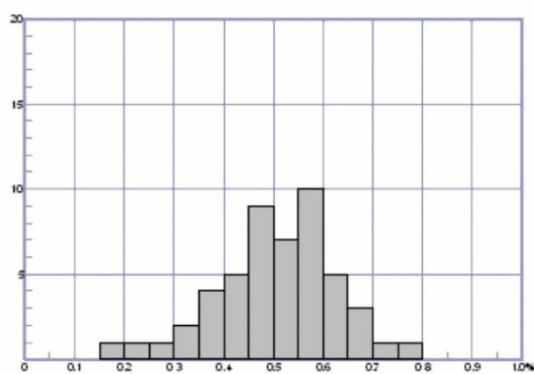
Amostra 15041



Amostra 15042



Amostra 15043



Amostra 15044

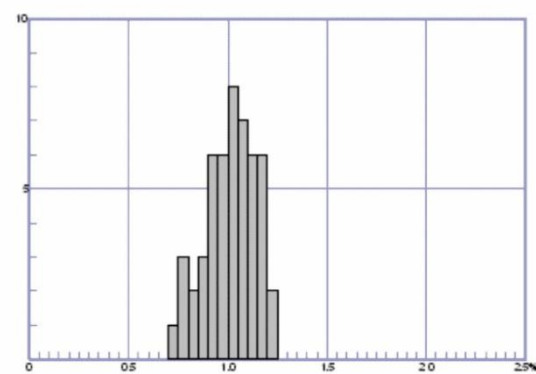
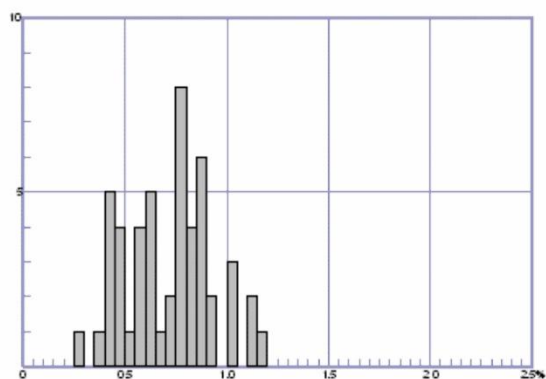
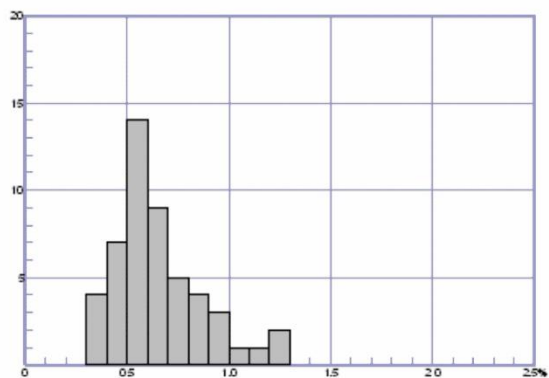


Figura 18. Continuação

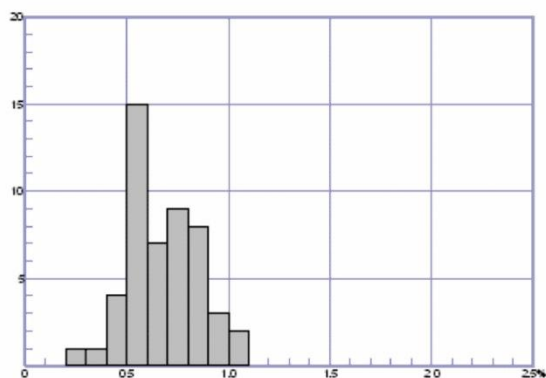
Amostra 15045



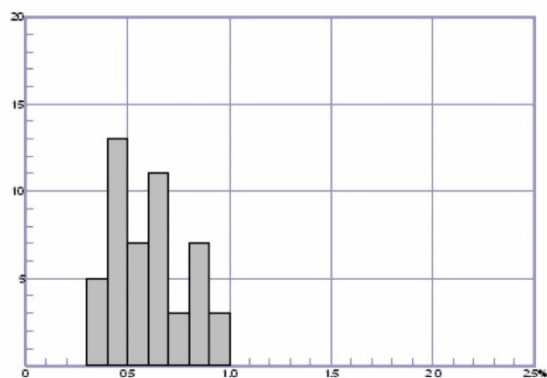
Amostra 15046



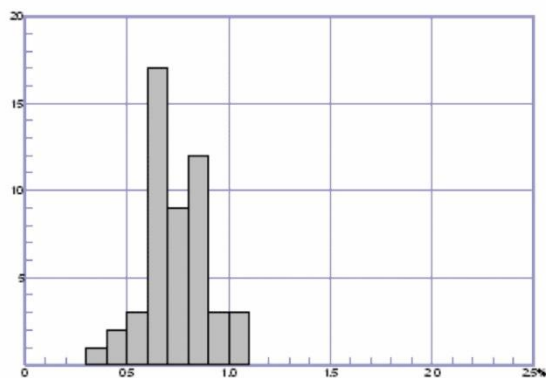
Amostra 15047



Amostra 15048



Amostra 15049



Amostra 15050

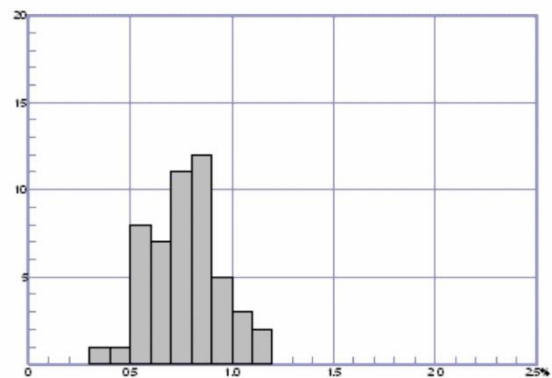
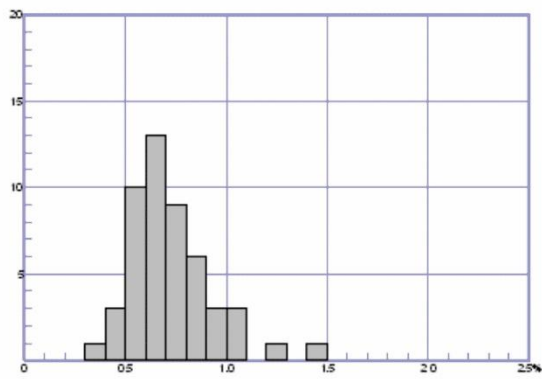
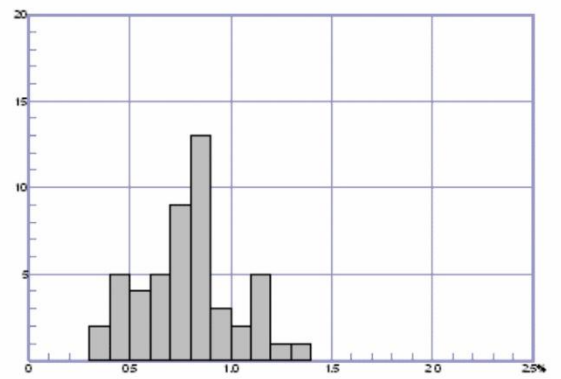


Figura 18. Continuação

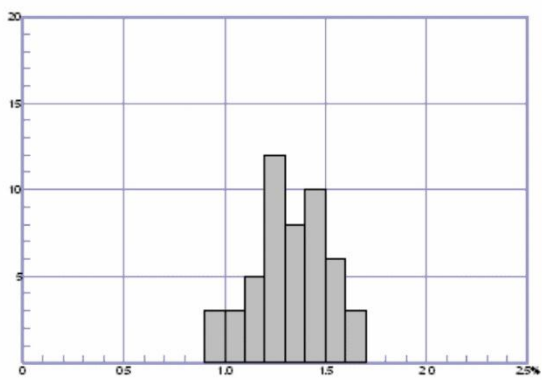
Amostra 15051



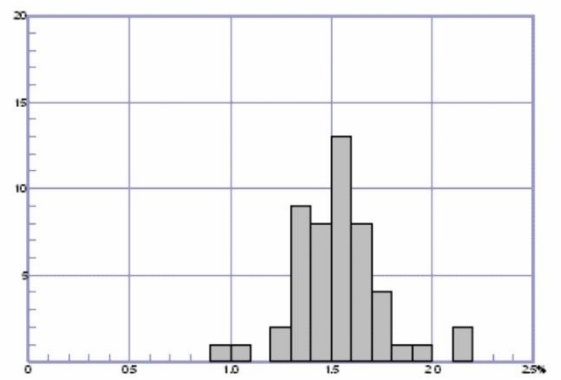
Amostra 15052



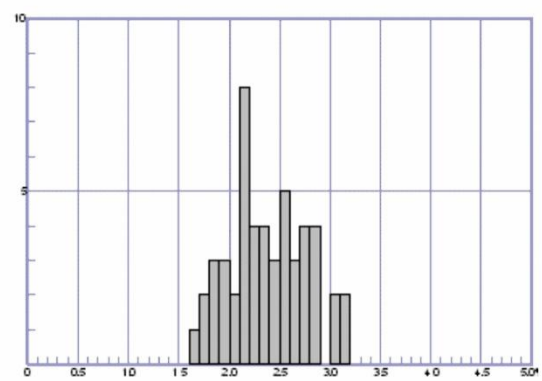
Amostra 15053



Amostra 15054



Amostra 15055



Amostra 15056

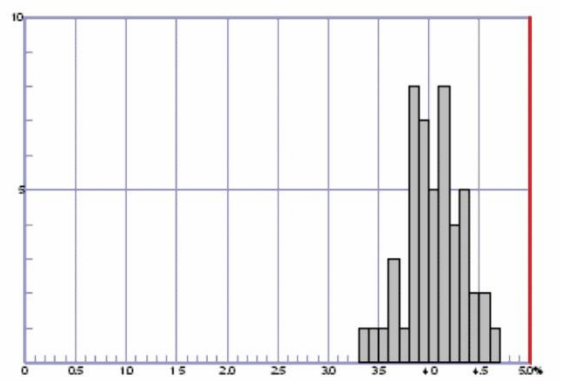


Figura 18.Continuação

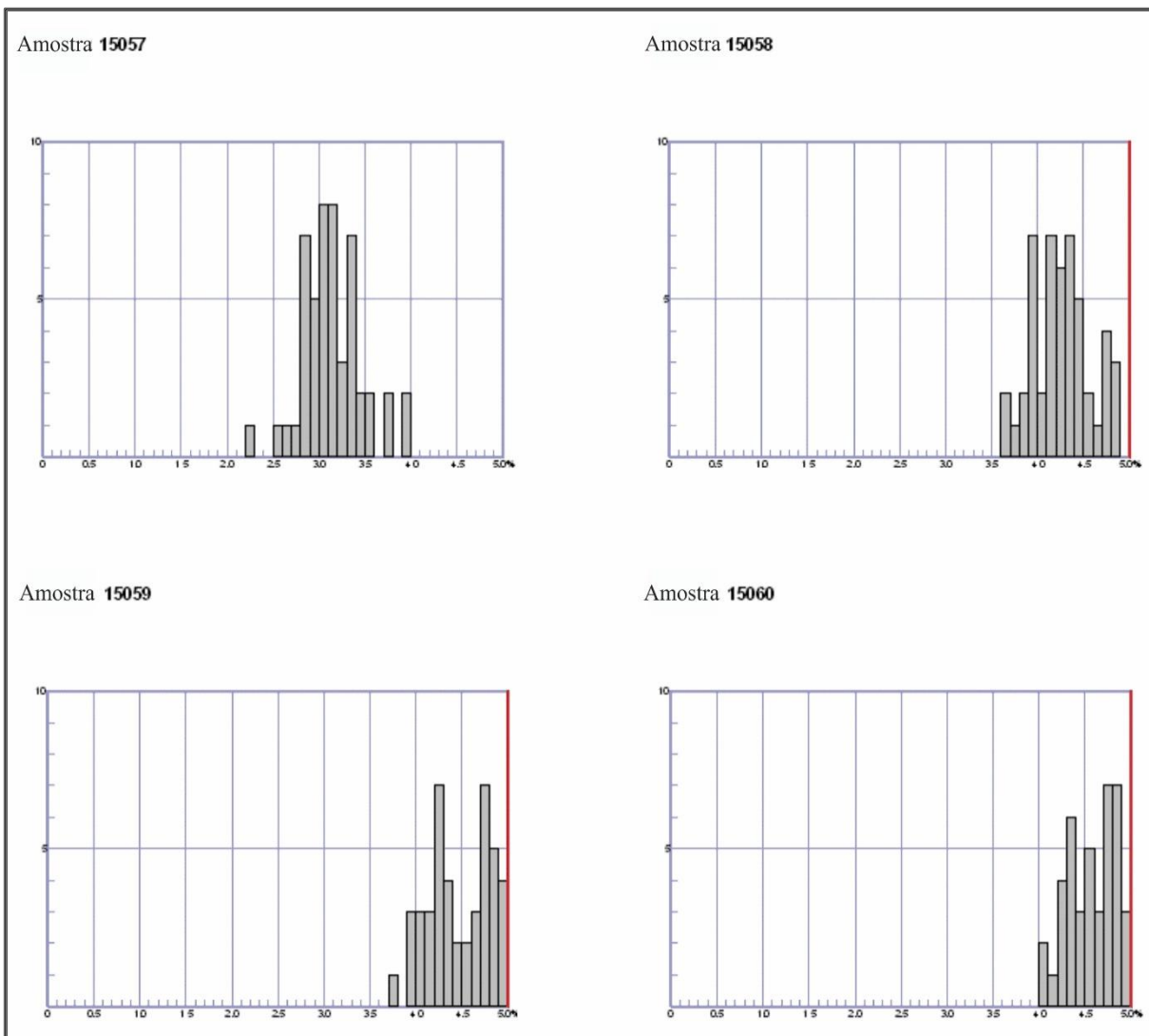


Figura 18.Continuação

## APÊNDICE B

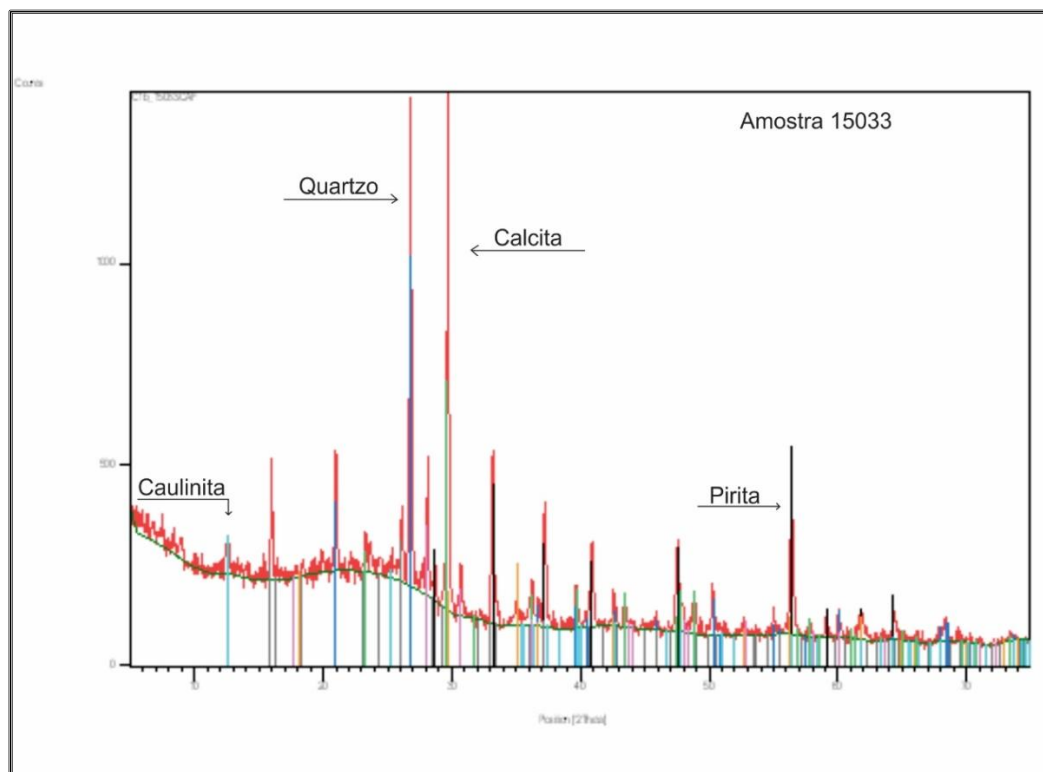


Figura 19. Difratomogramas das 28 amostras de carvão obtidos através da análise de difração de raios X.

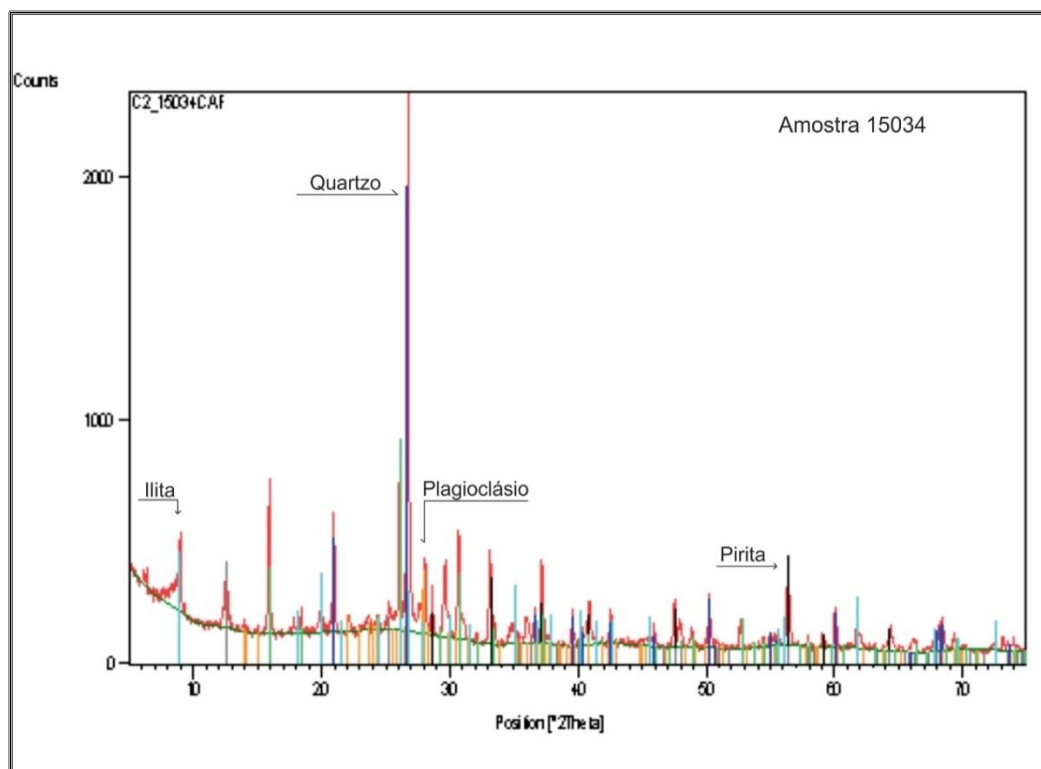


Figura 19. Continuação.

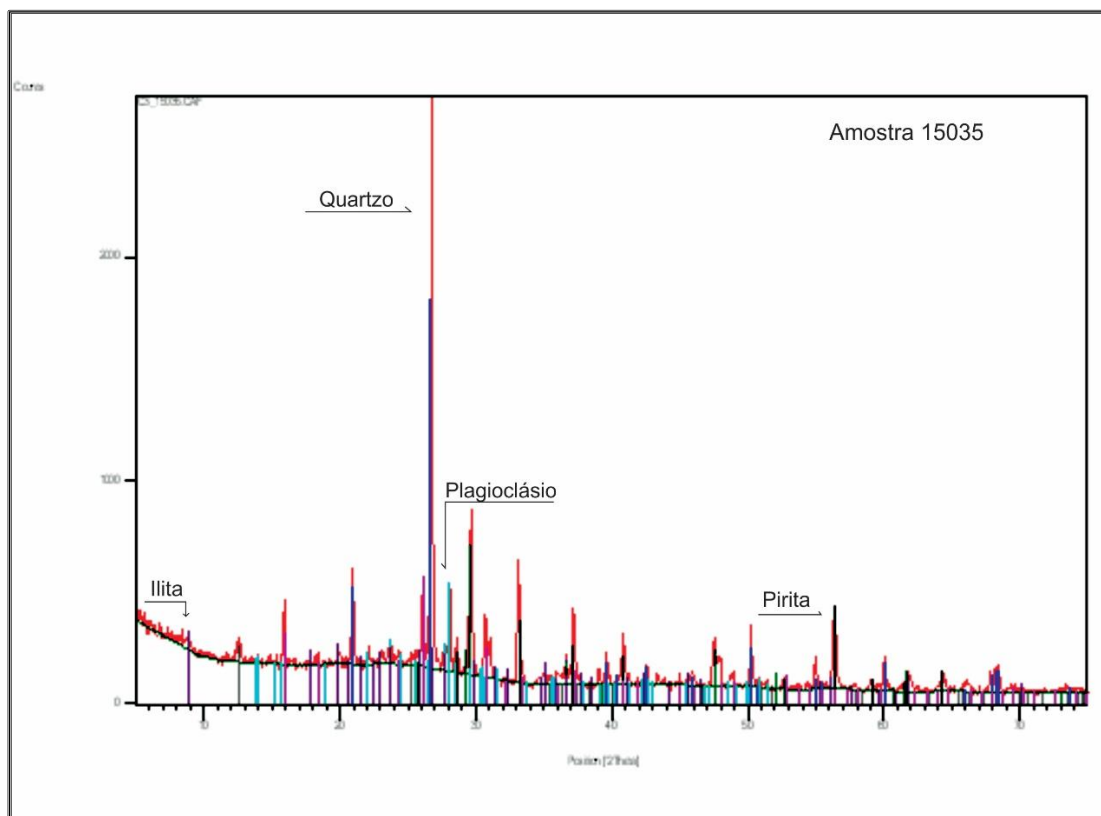


Figura 19. Continuação.

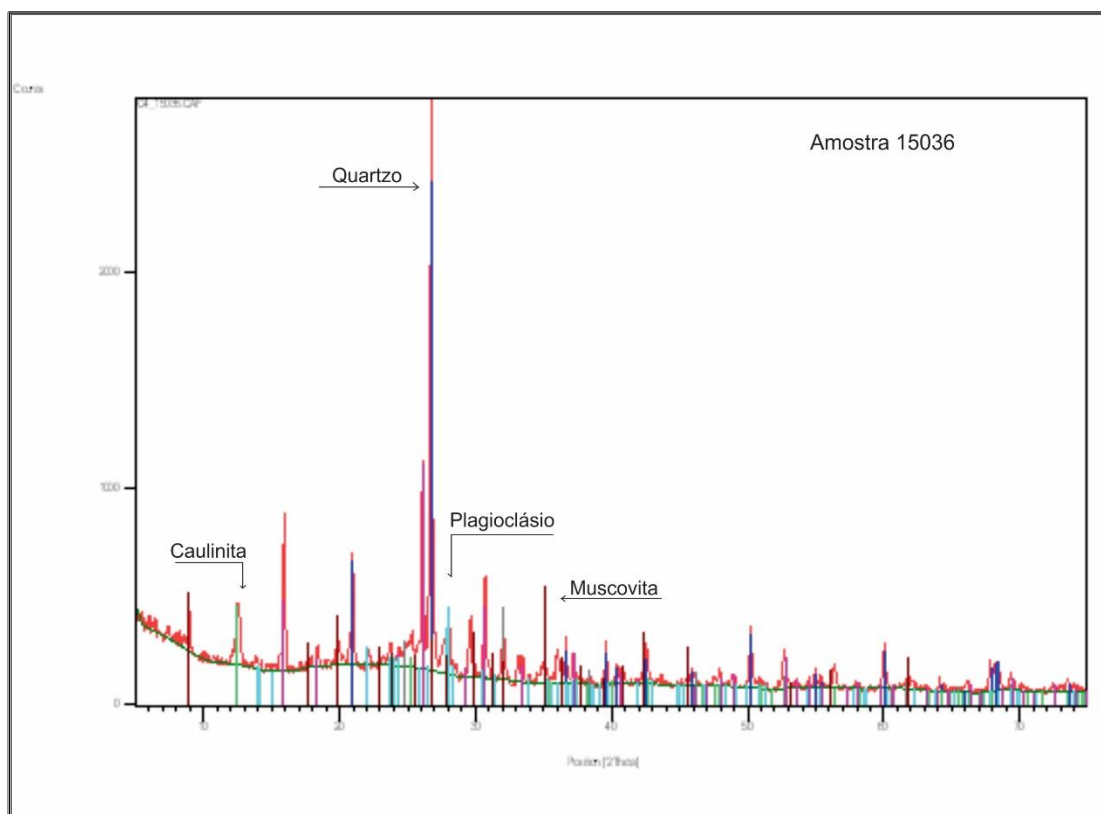


Figura 19. Continuação.

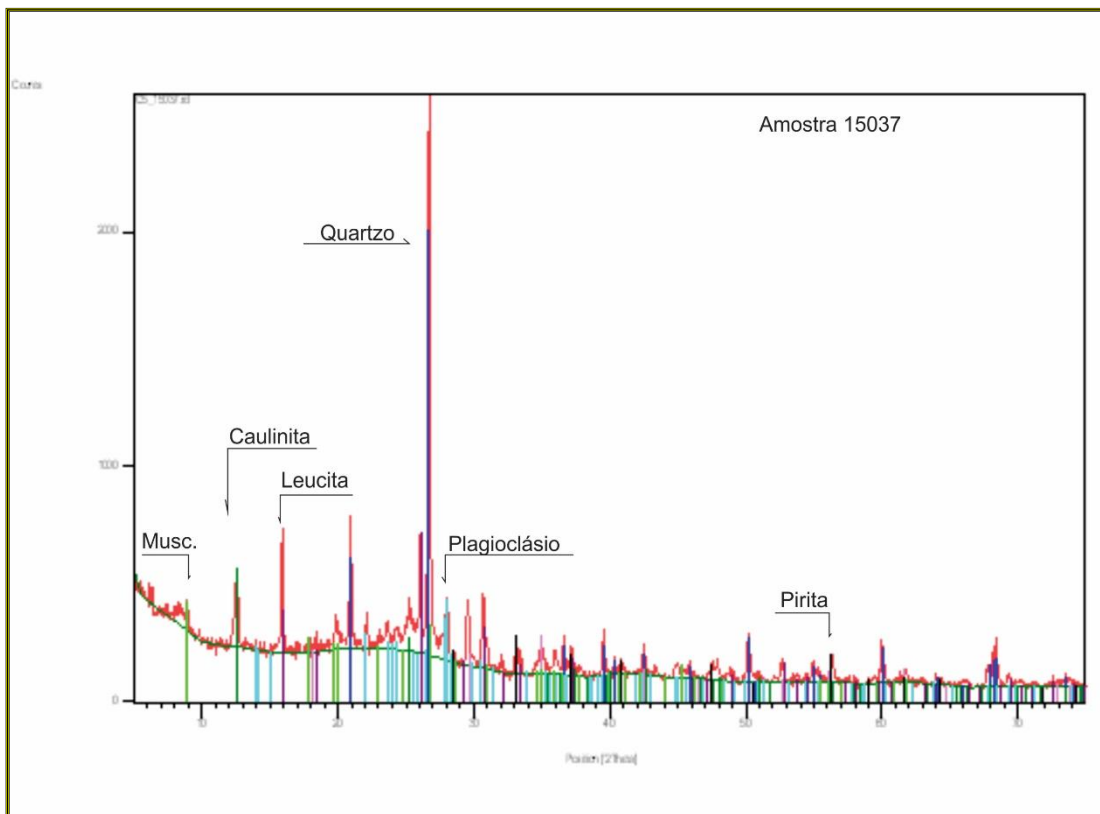


Figura 19. Continuação.

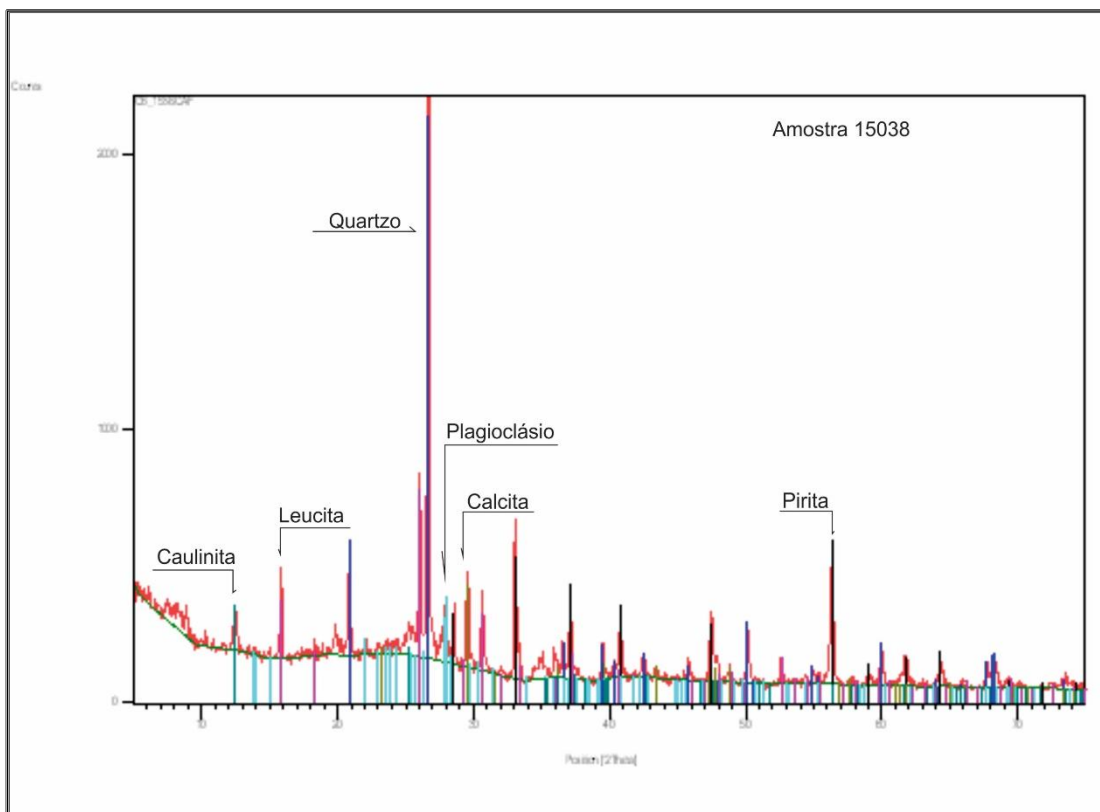


Figura 19. Continuação.

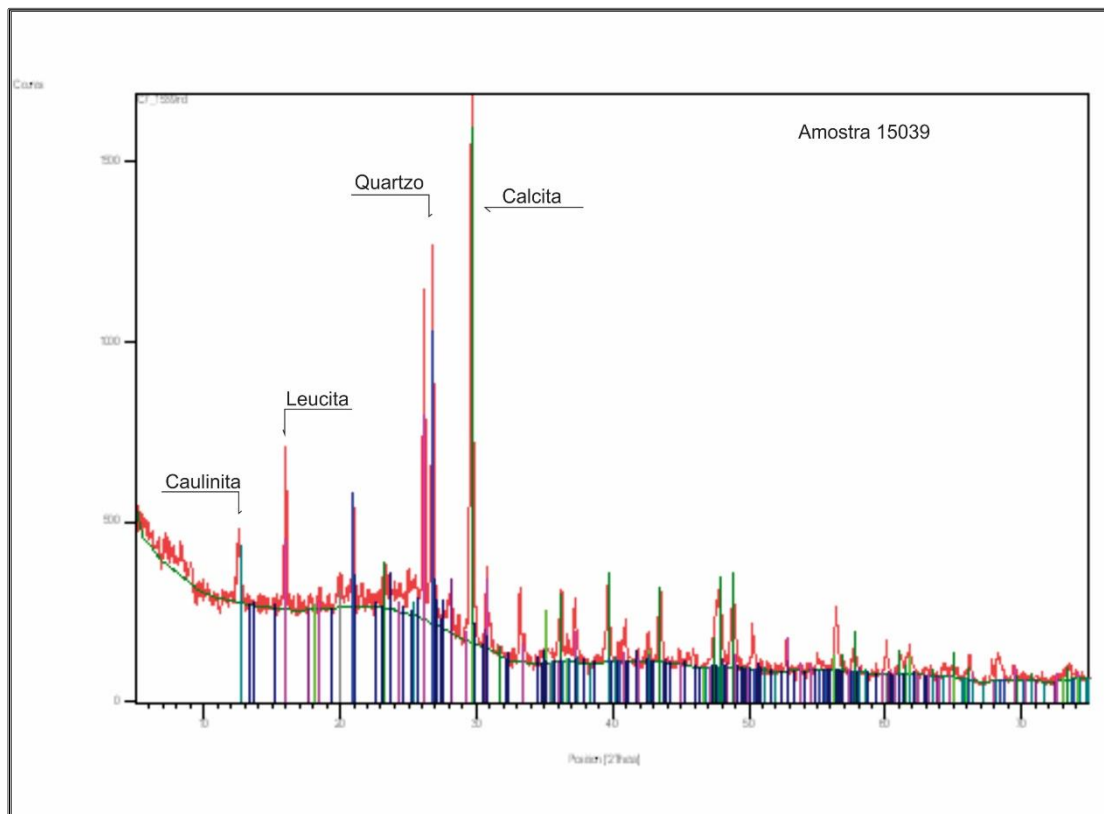


Figura 19. Continuação.

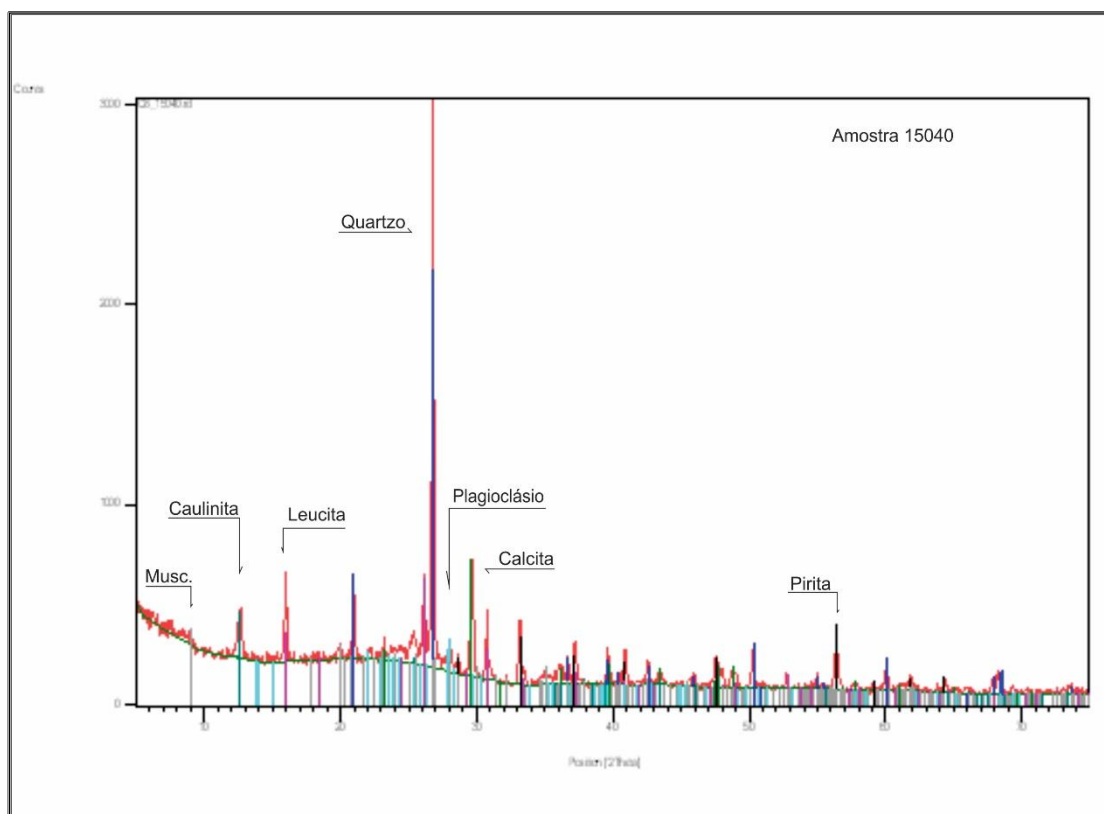


Figura 19. Continuação.



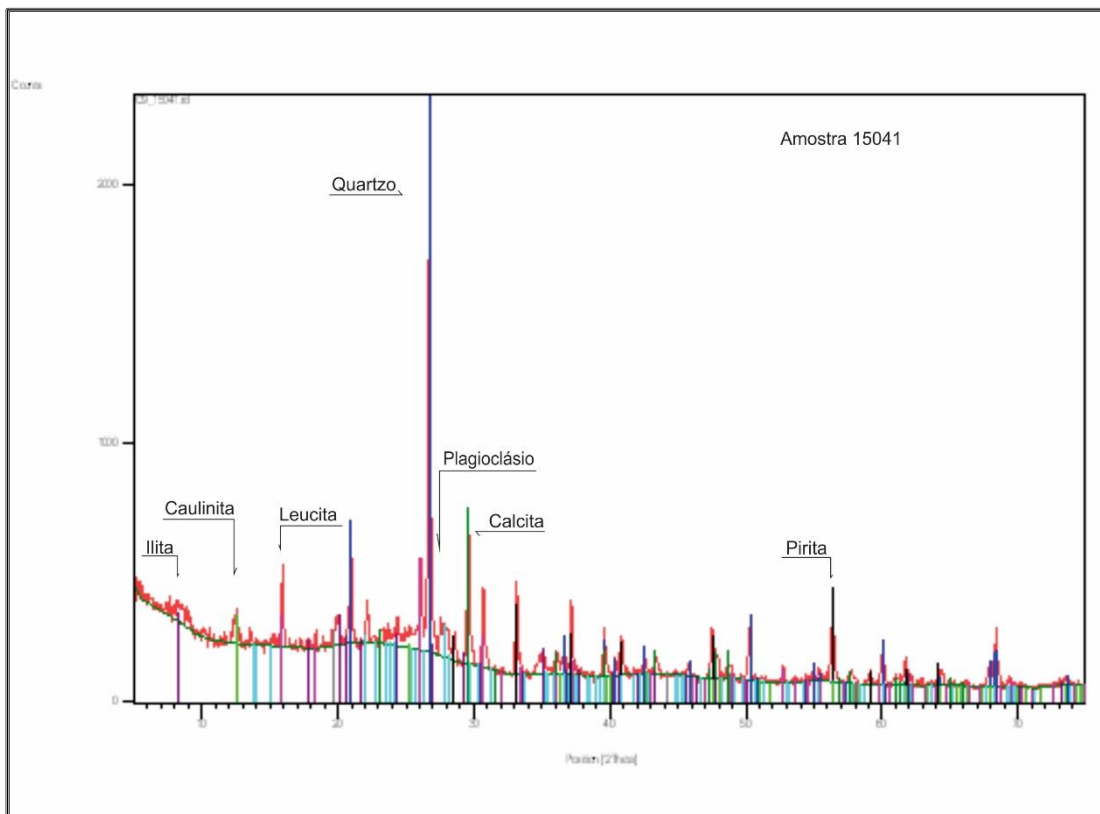


Figura 19. Continuação.

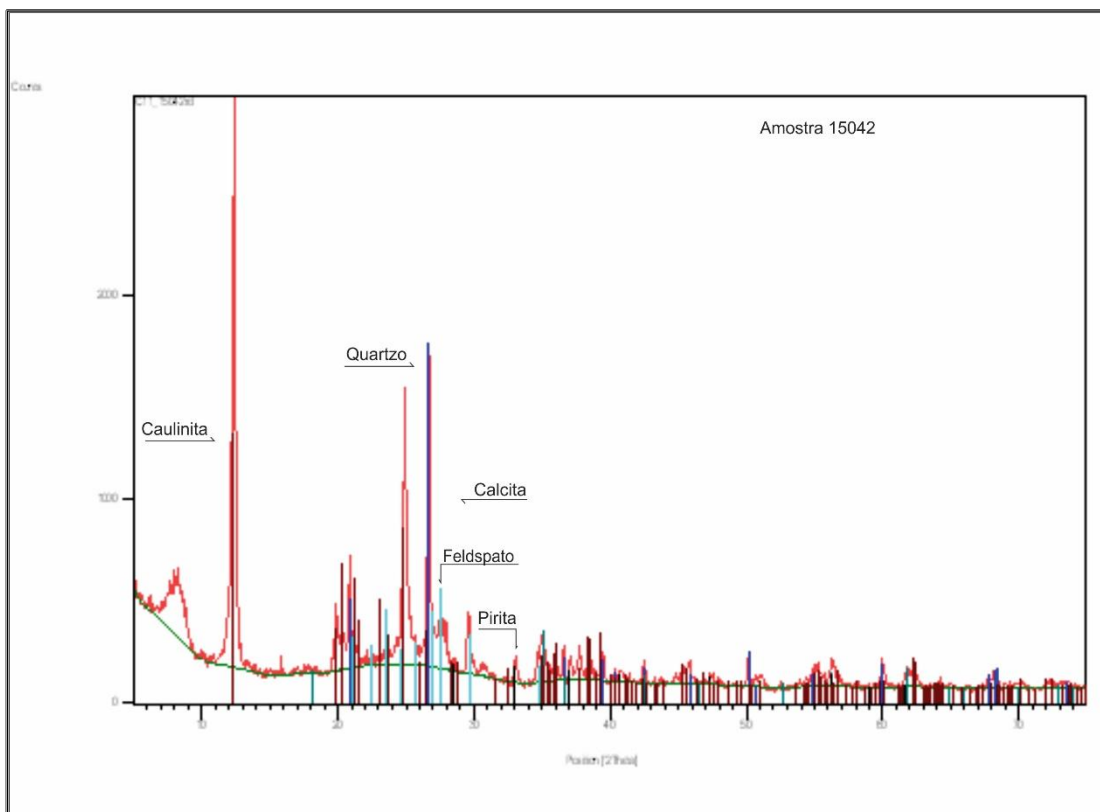


Figura 19. Continuação.

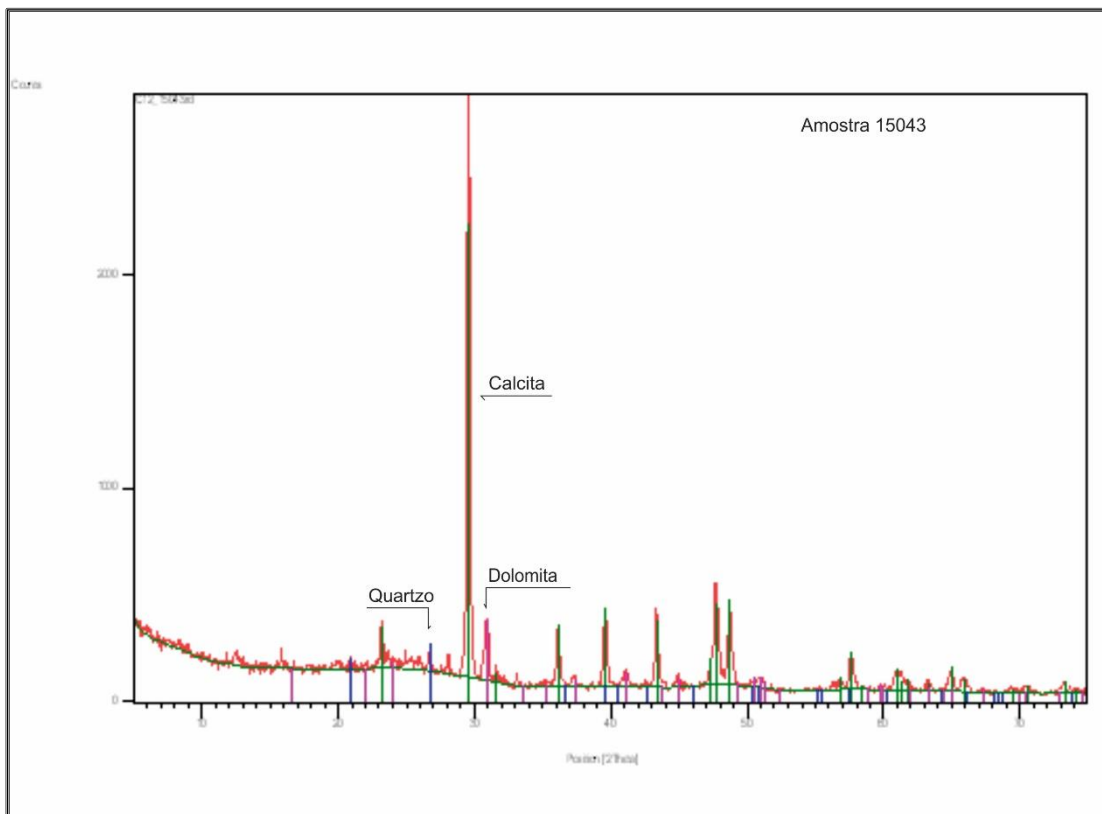


Figura 19. Continuação.

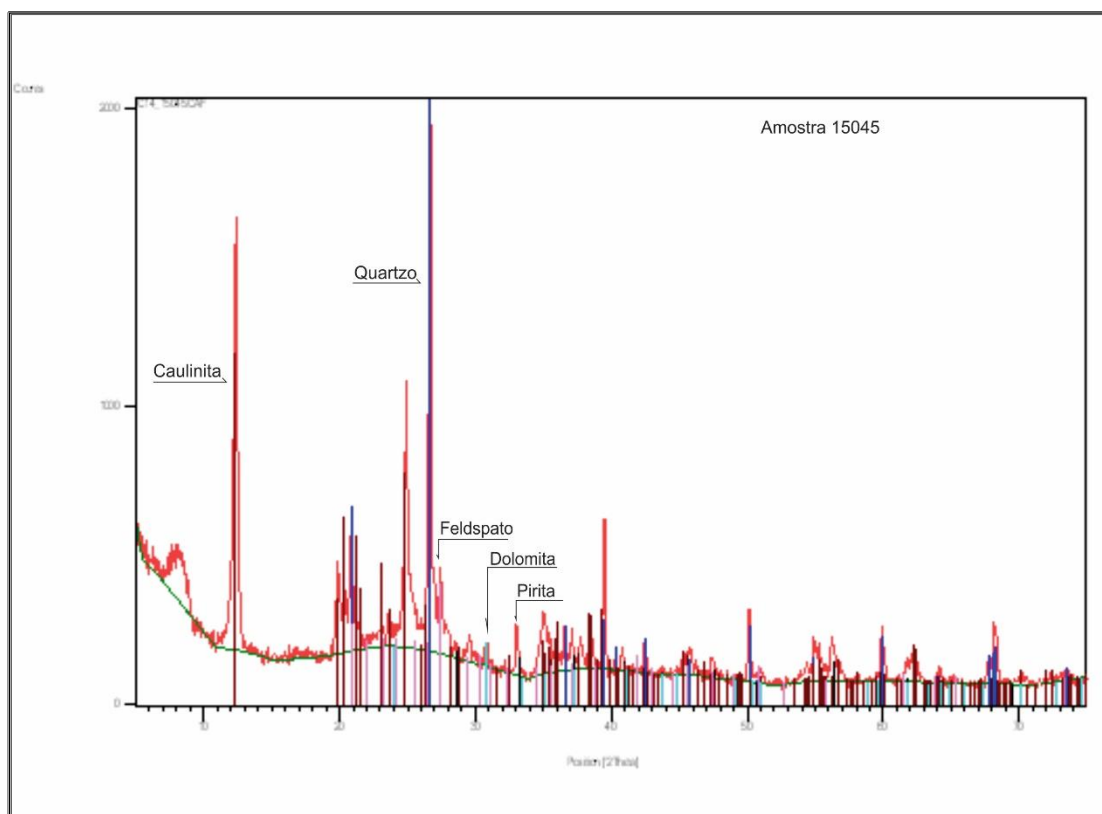


Figura 19. Continuação.

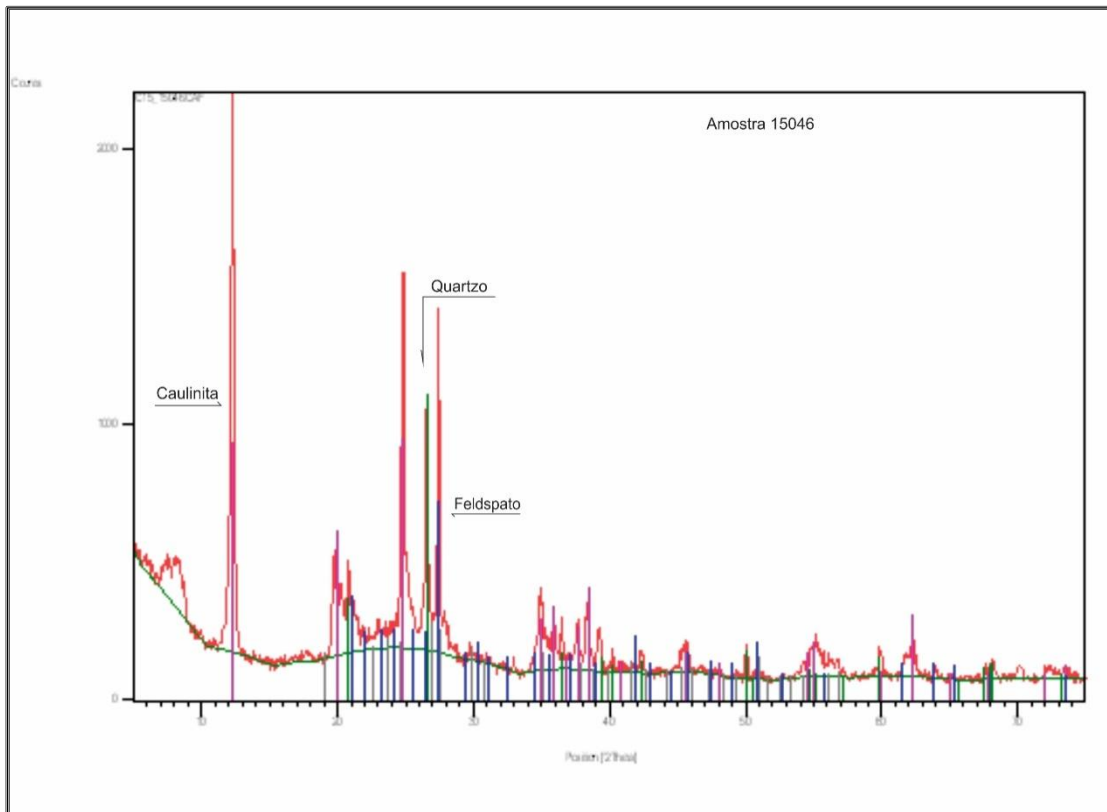


Figura 19. Continuação.

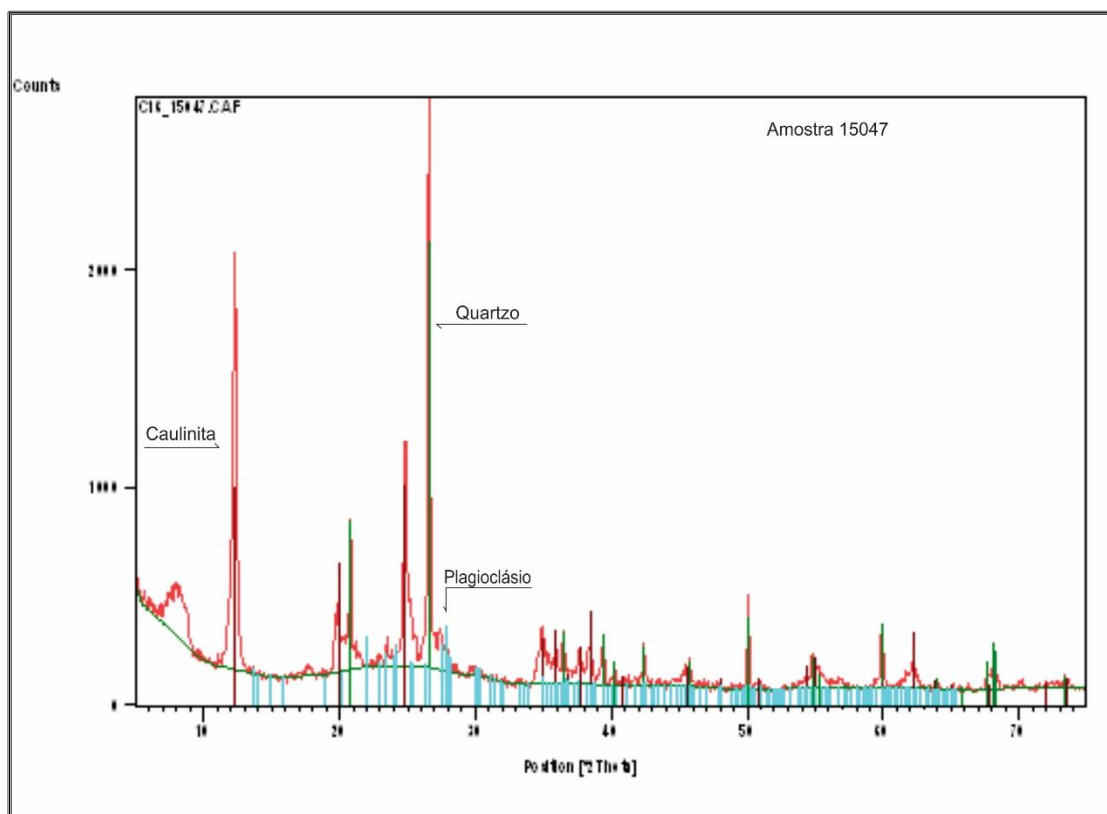


Figura 19. Continuação.

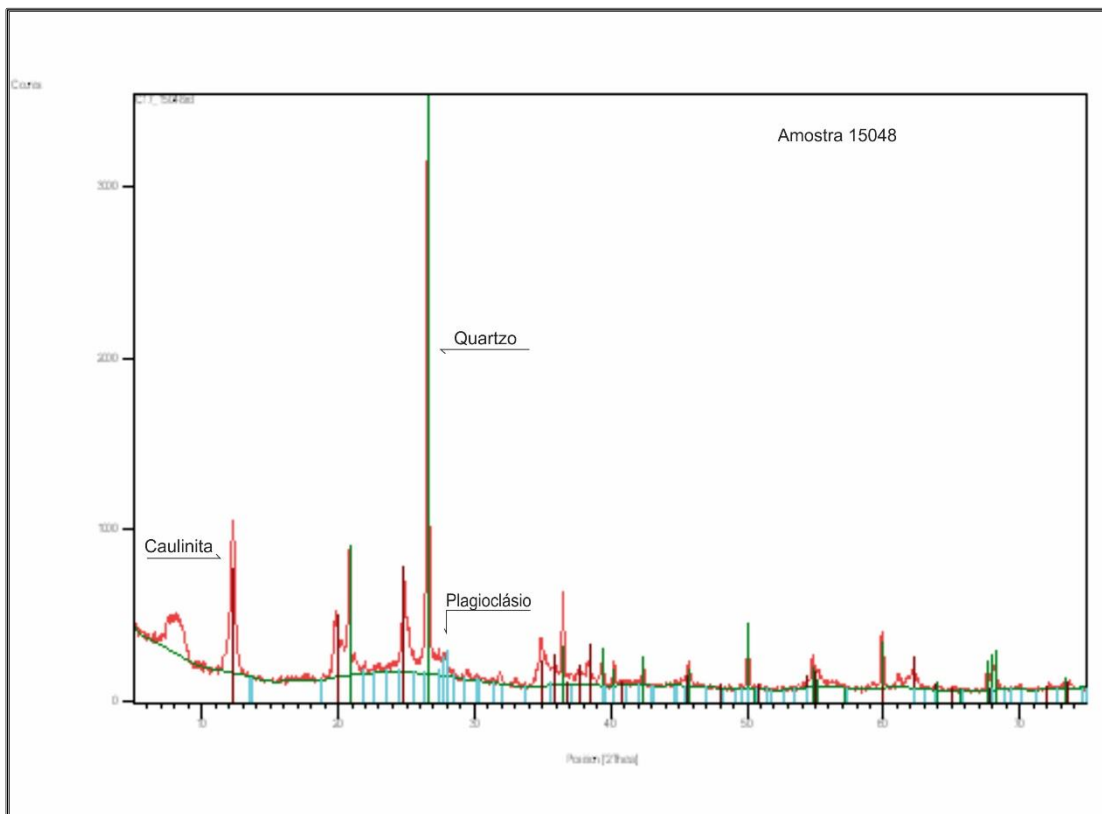


Figura 19. Continuação.

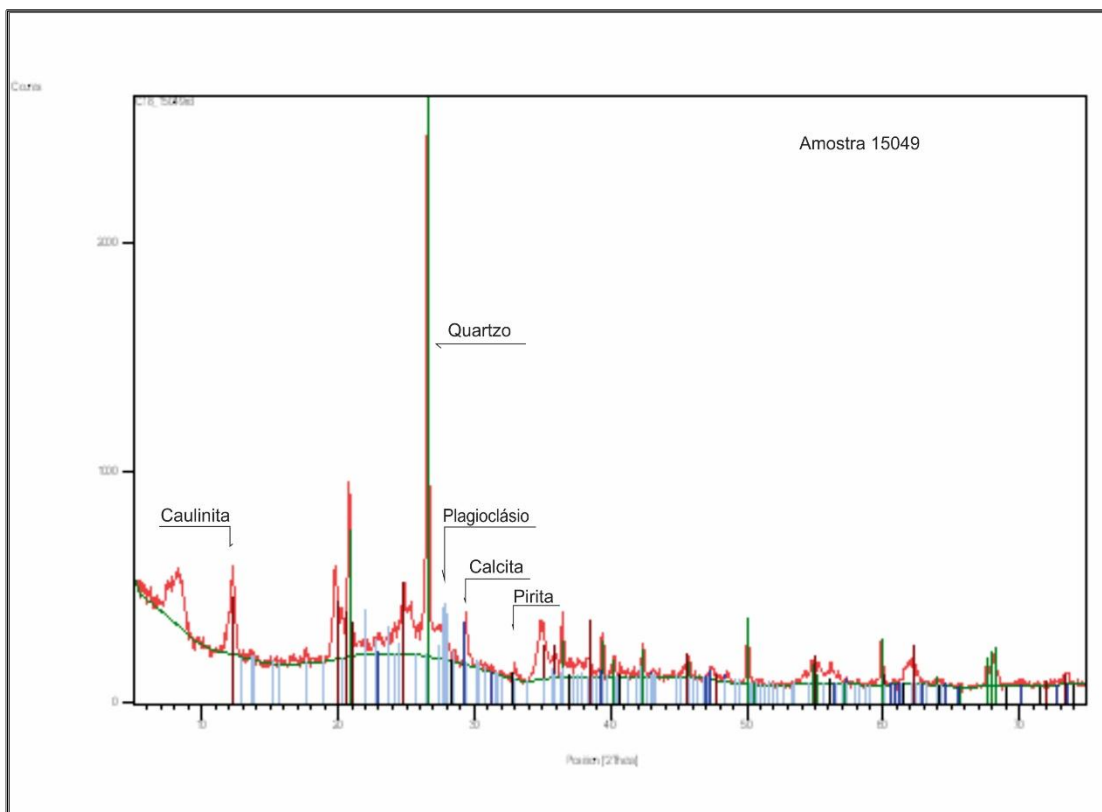


Figura 19. Continuação.

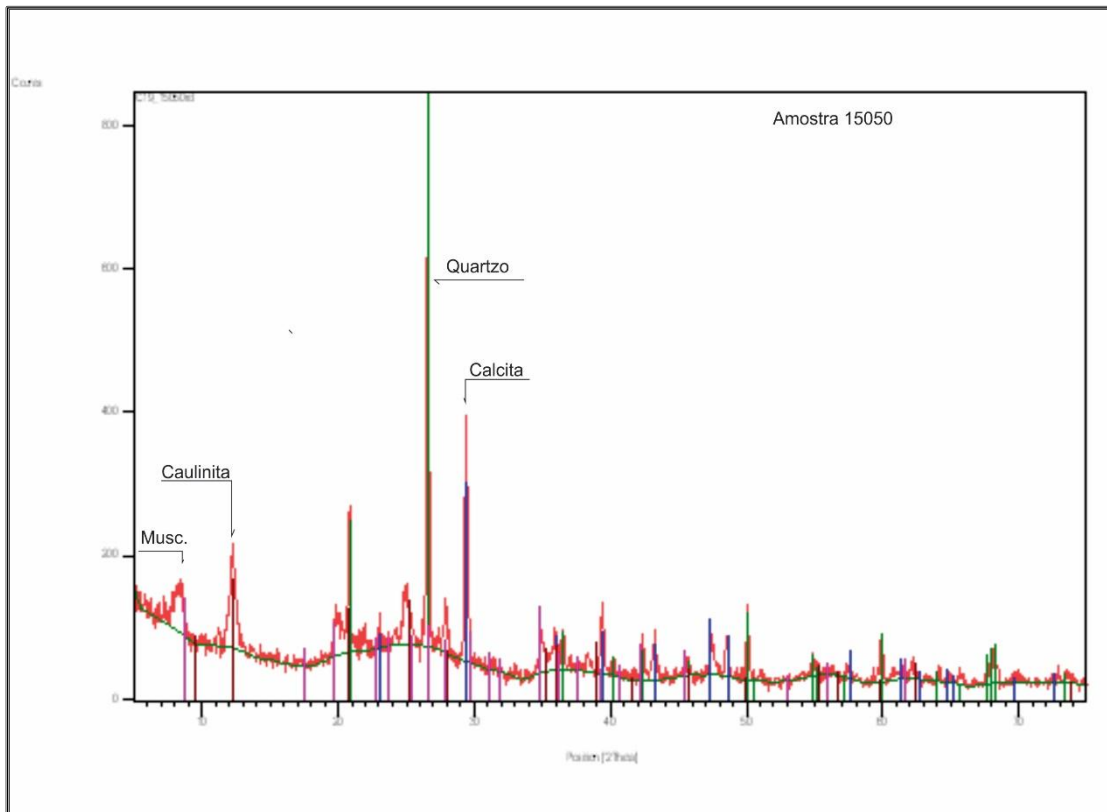


Figura 19. Continuação.

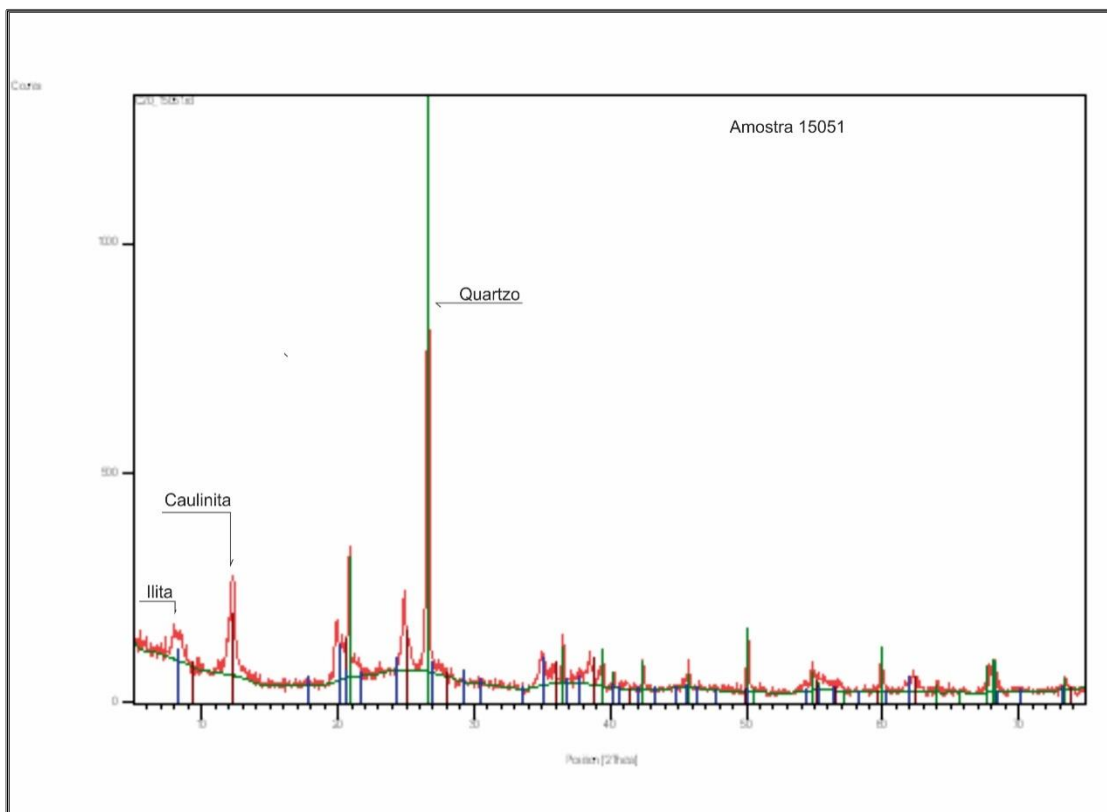


Figura 19. Continuação.

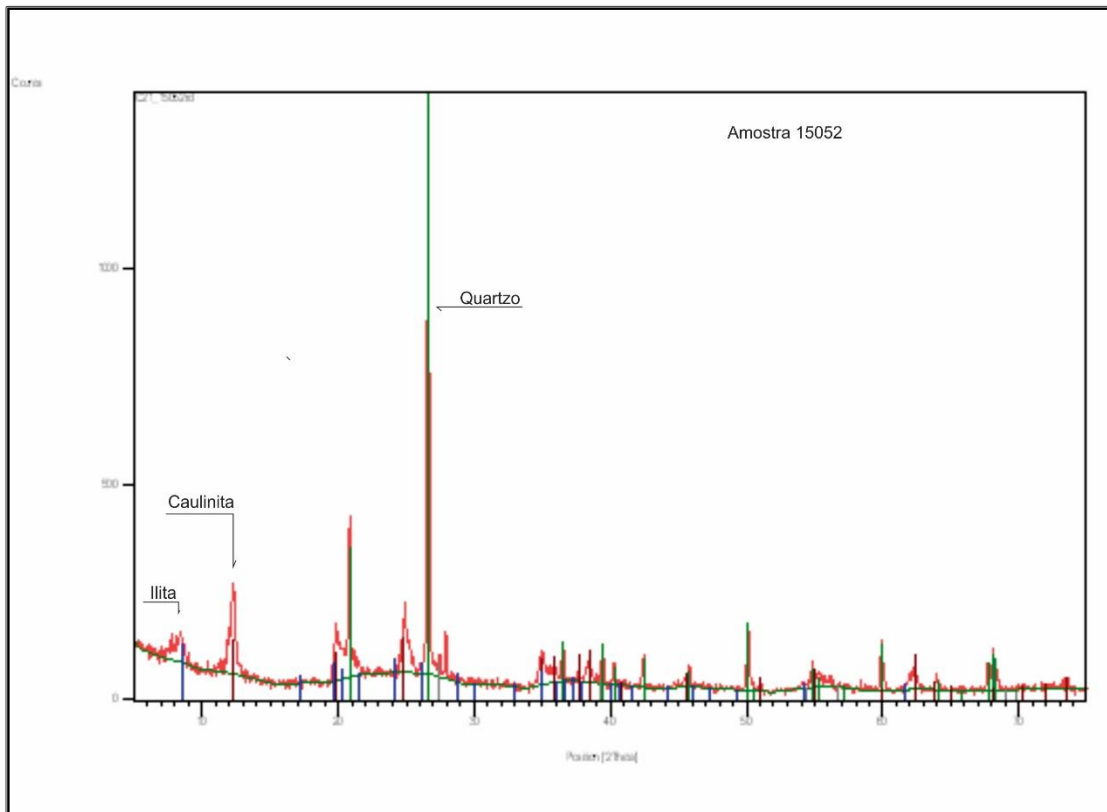


Figura 19. Continuação.

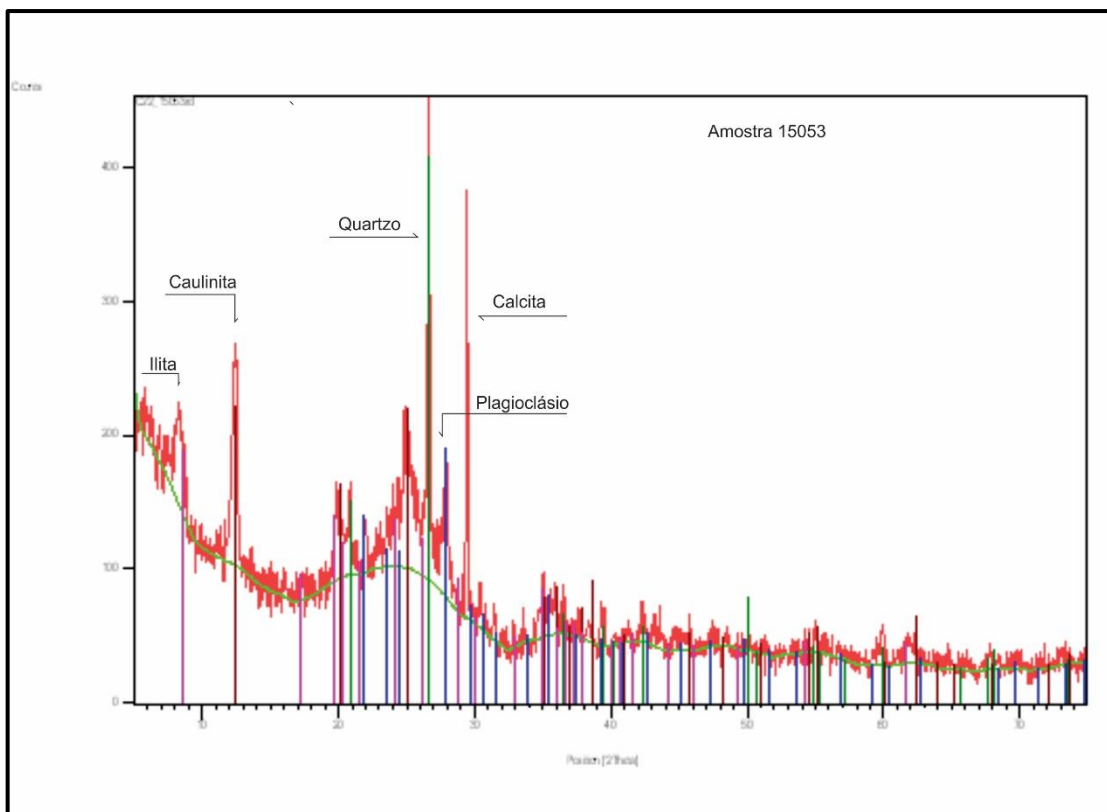


Figura 19. Continuação.

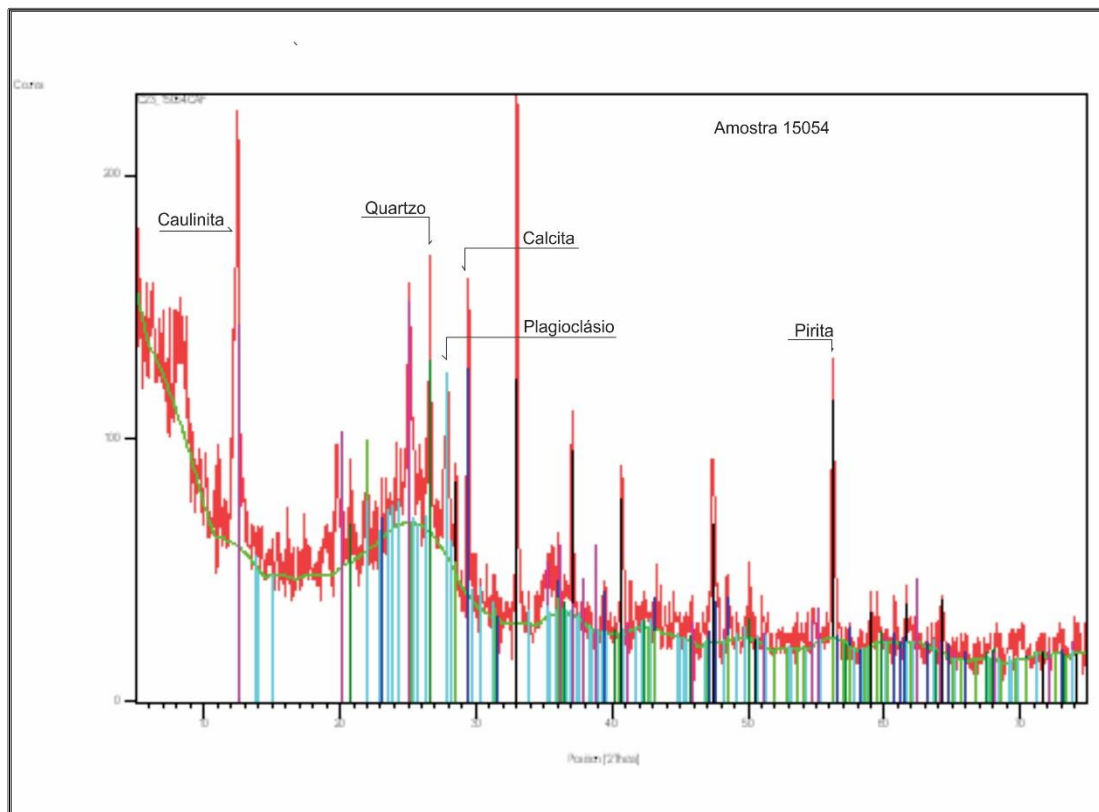


Figura 19. Continuação.

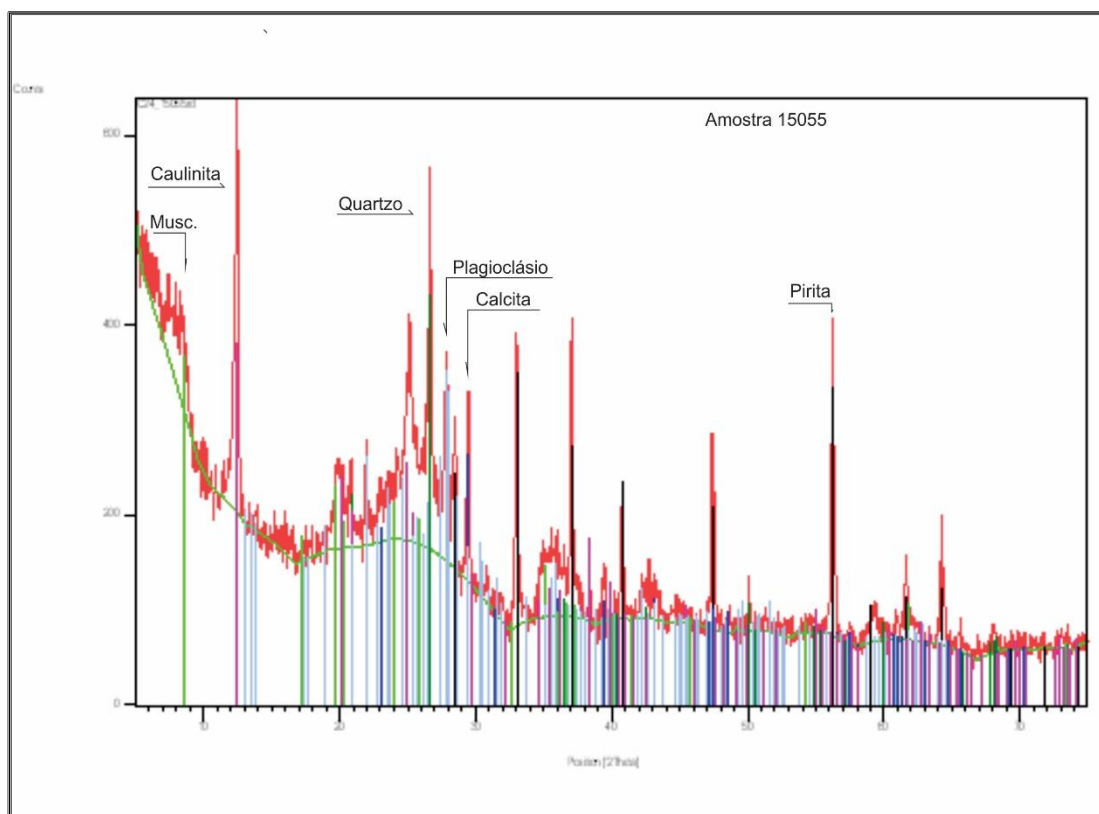


Figura 19. Continuação.

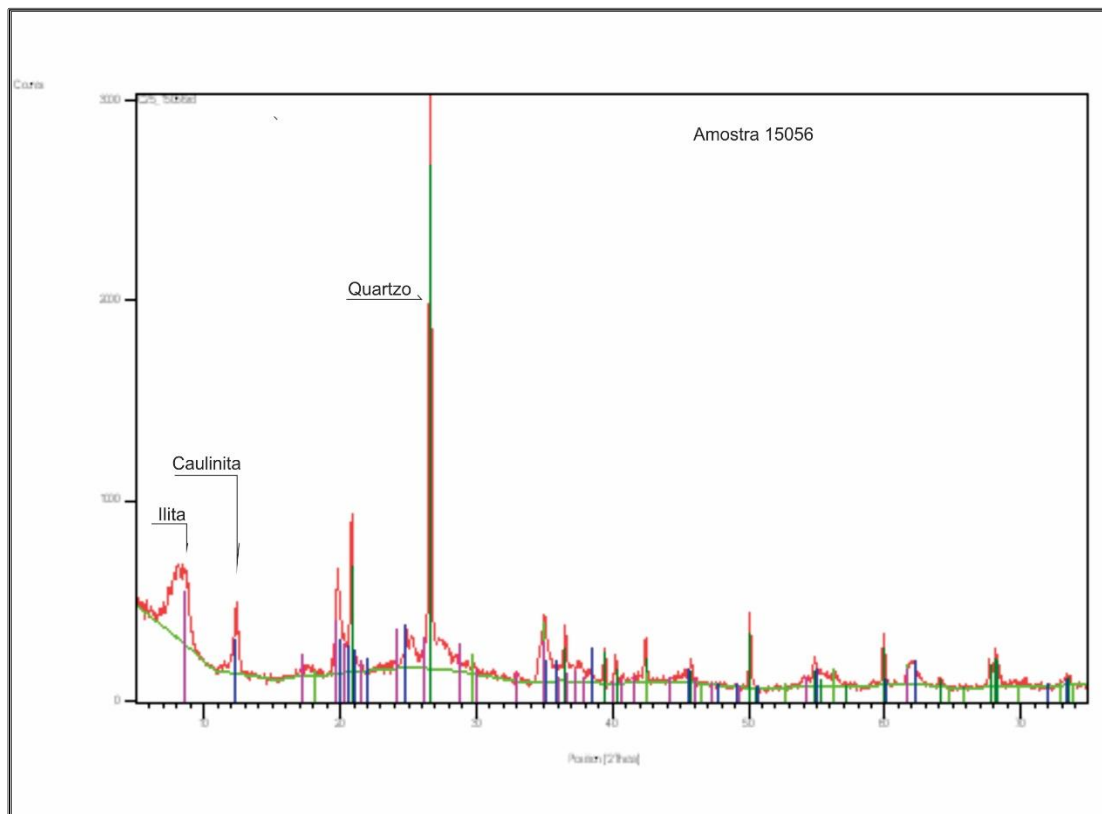


Figura 19. Continuação.

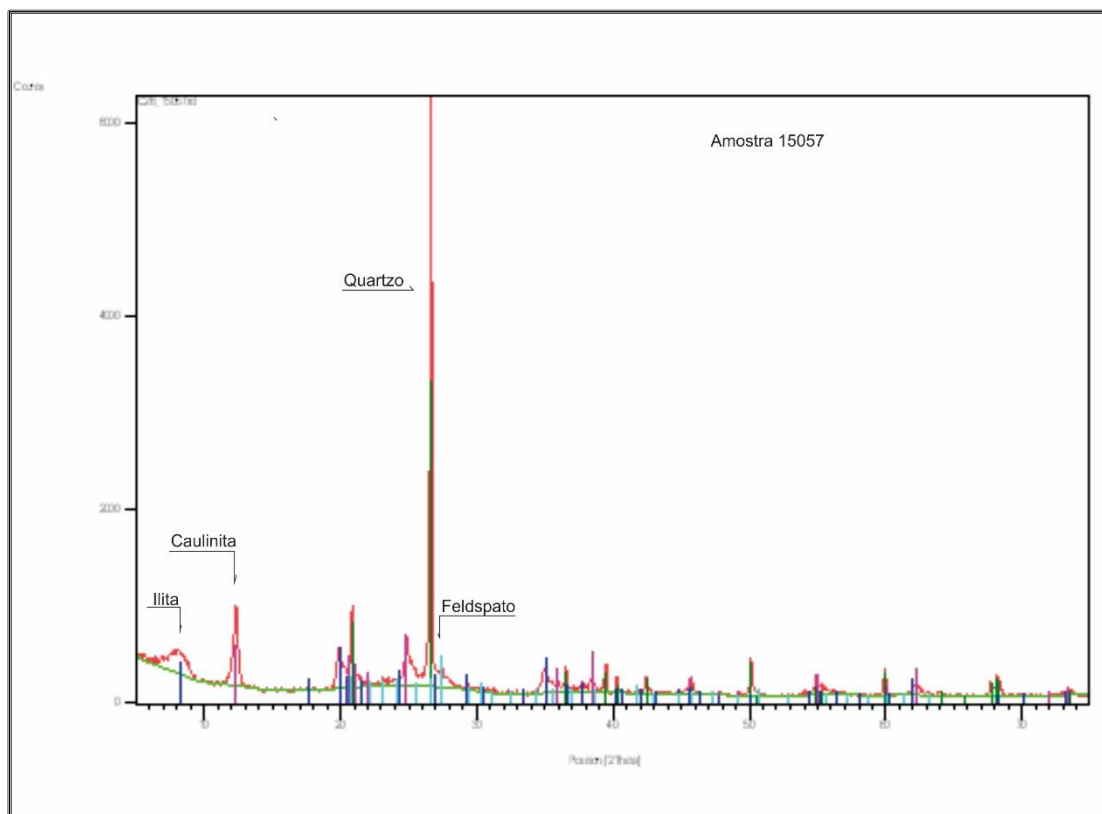


Figura 19. Continuação.



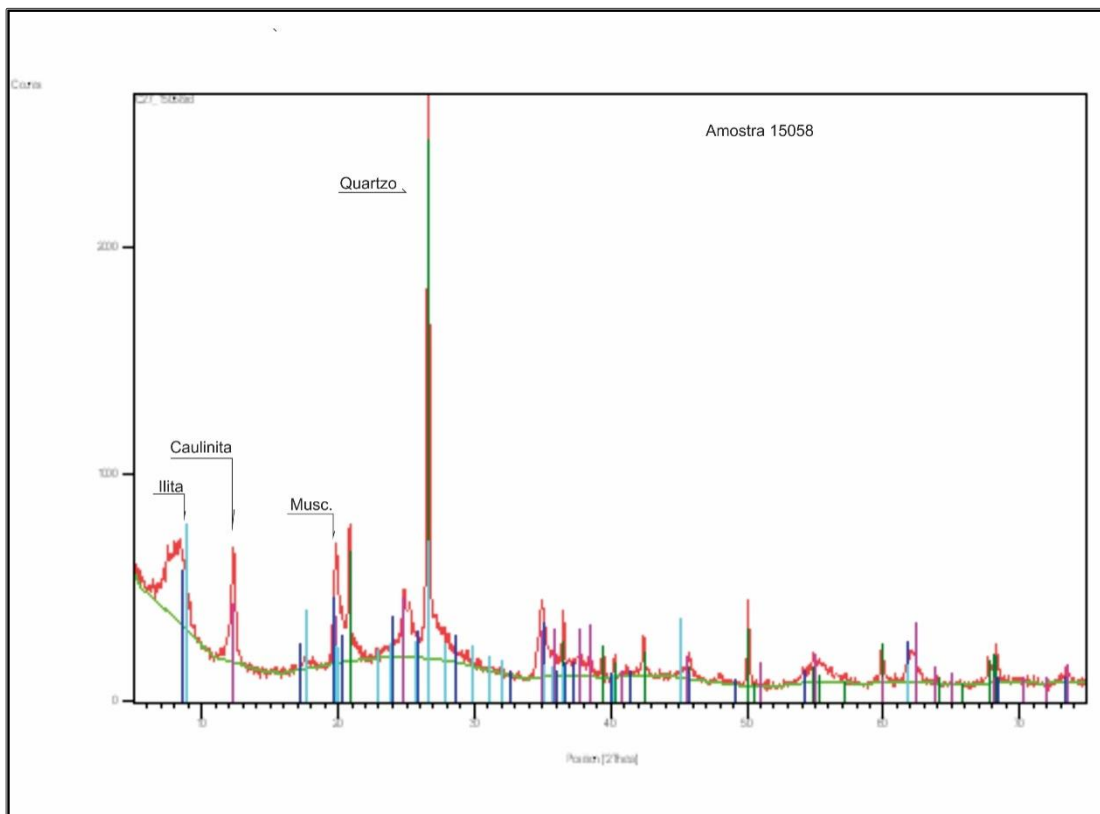


Figura 19. Continuação.

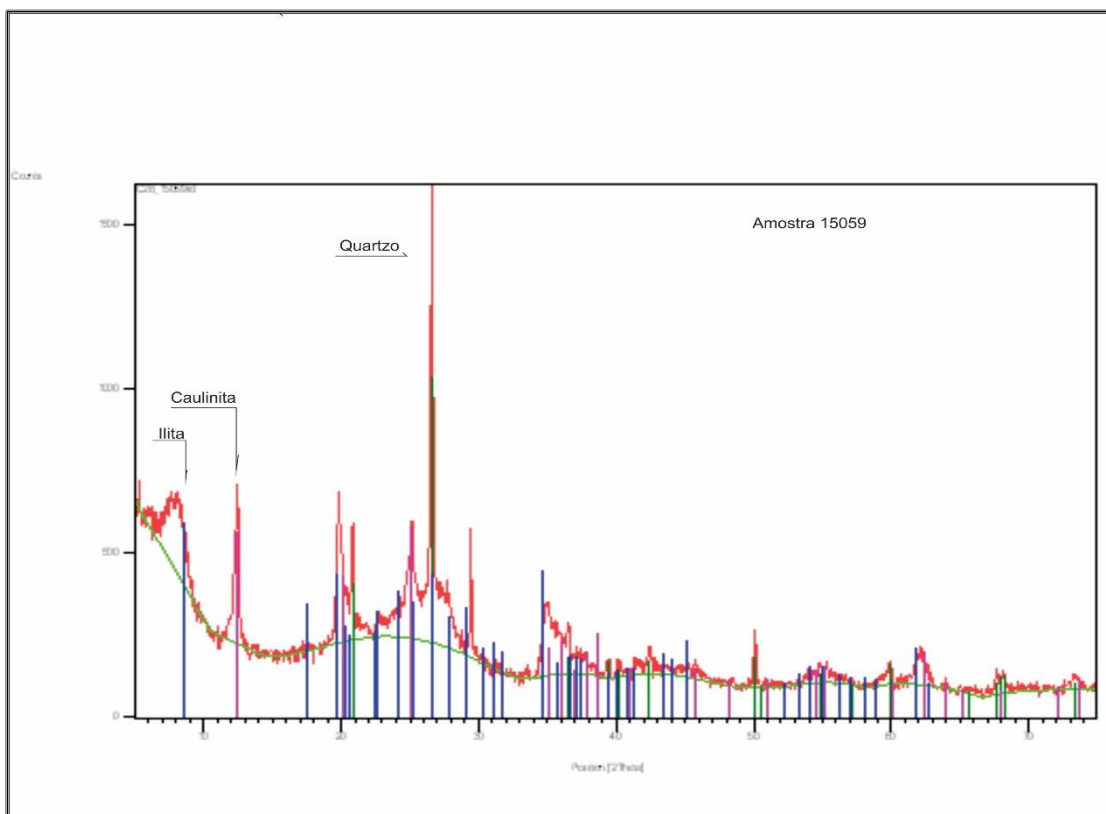


Figura 19. Continuação.

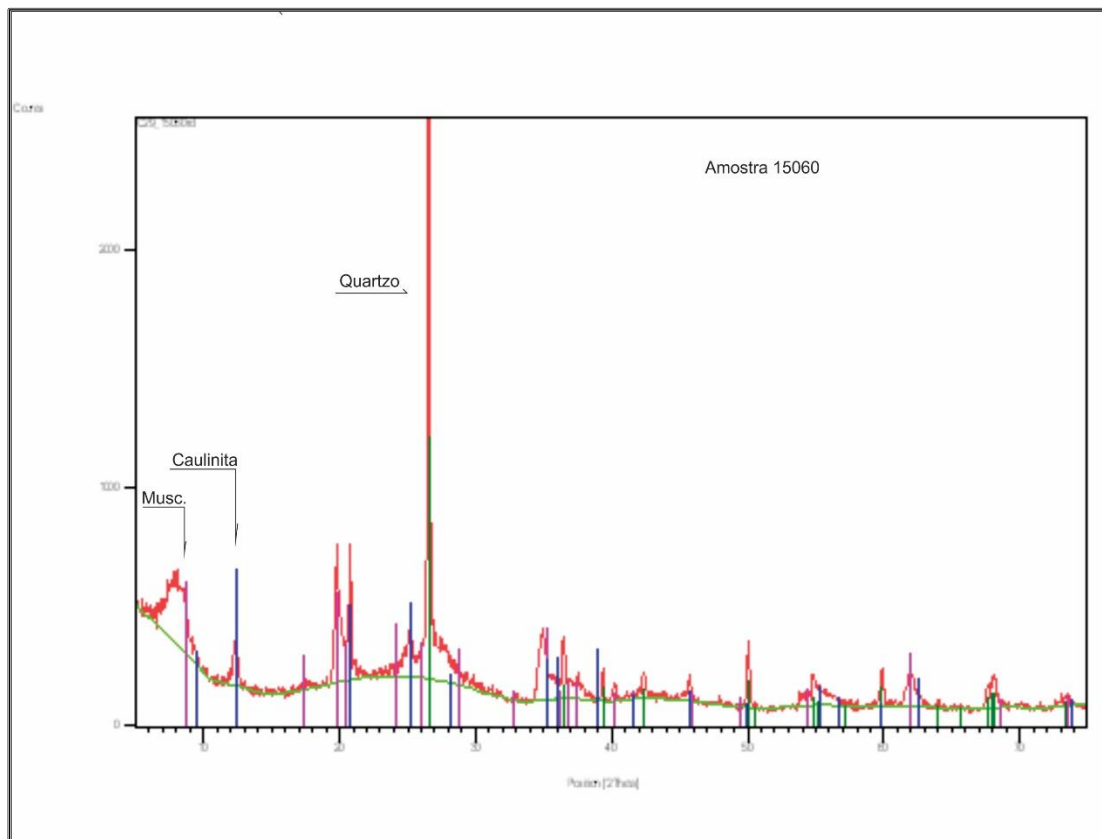


Figura 19. Continuação.

## APÊNDICE C

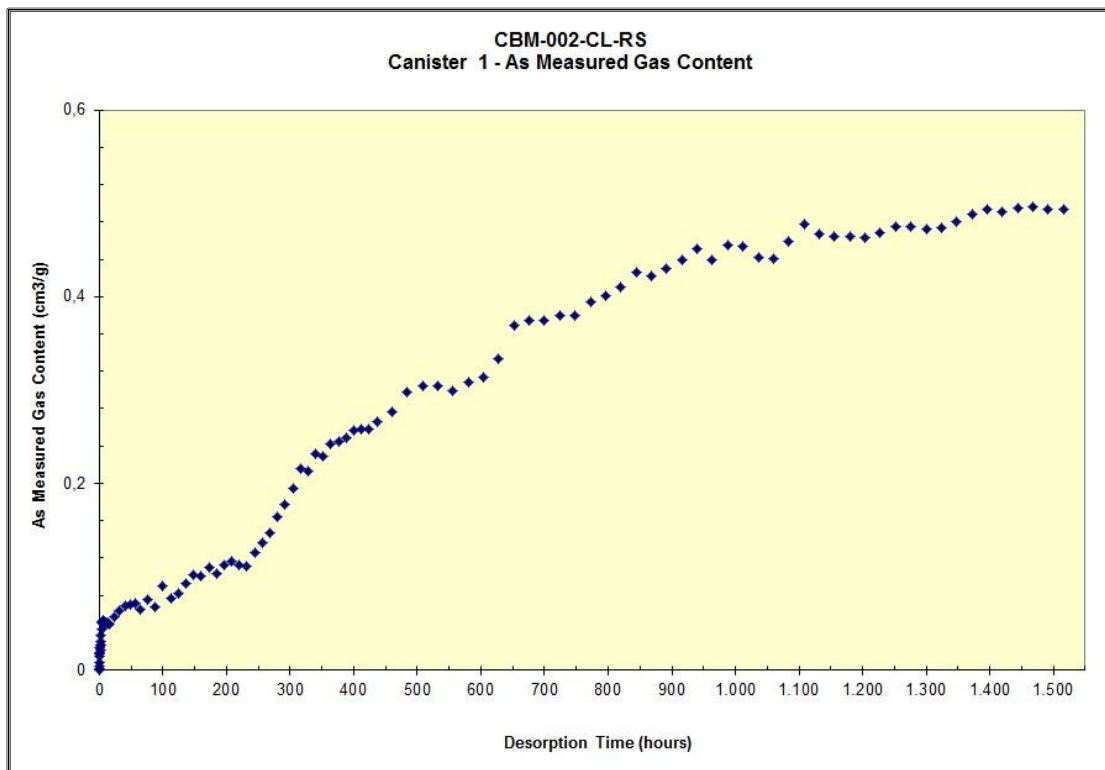


Figura 20. Gráficos dos testes de dessorção para os 28 cilindros analisados

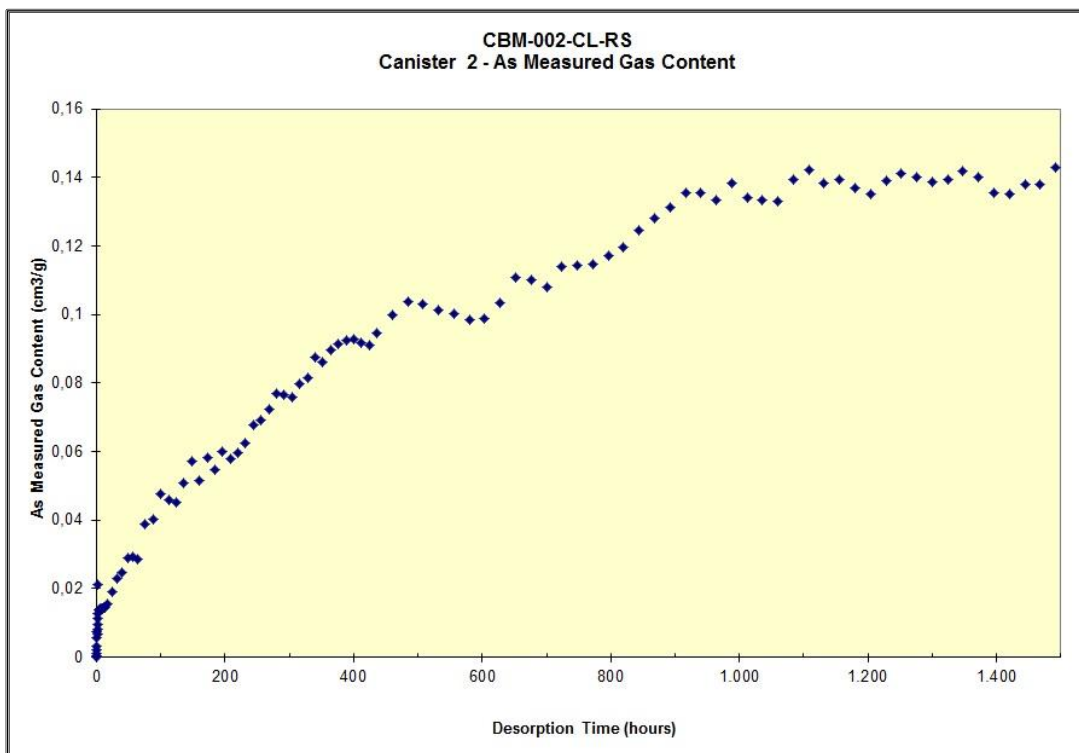


Figura 20. Continuação.

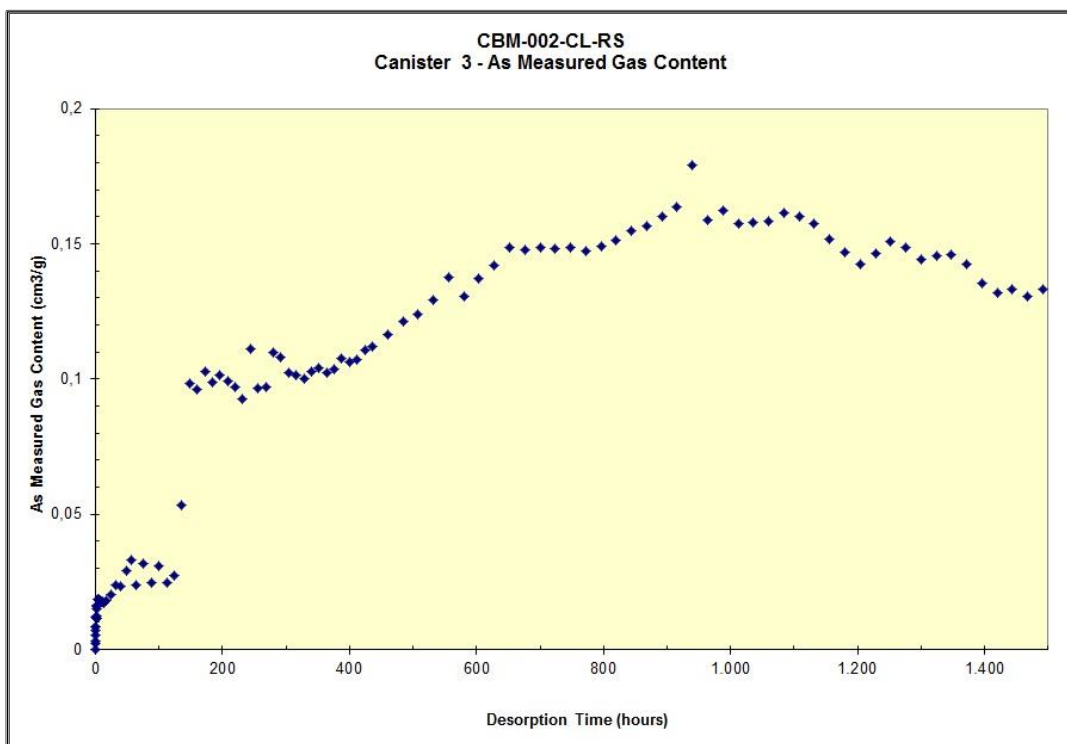


Figura 20. Continuação.

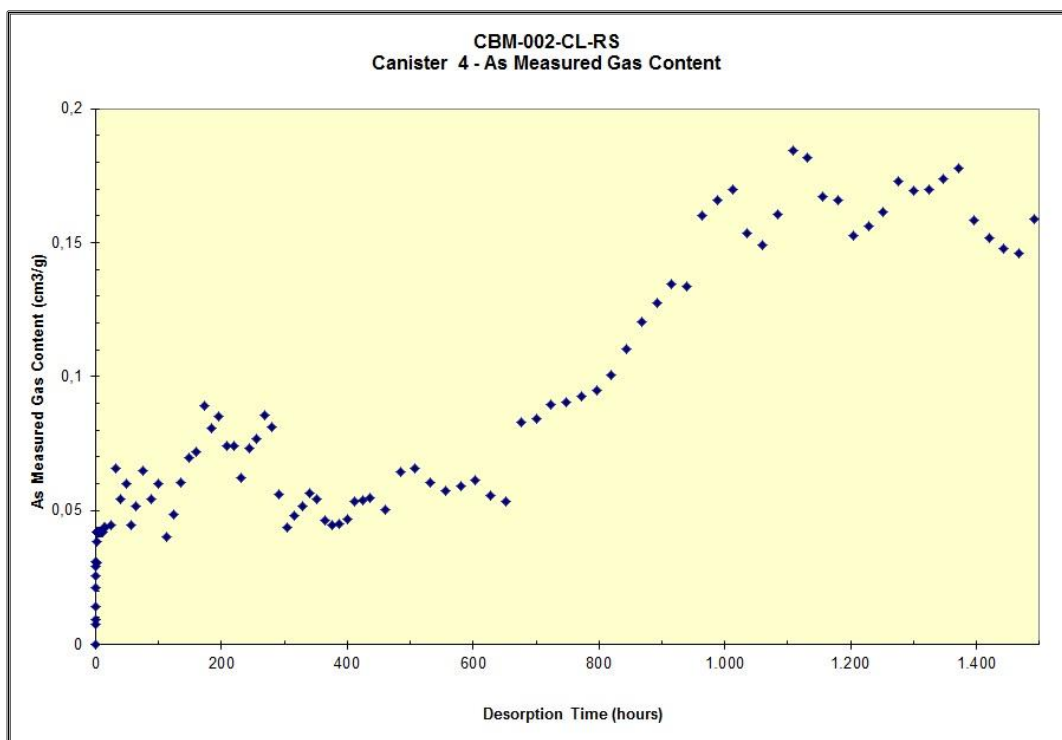


Figura 20. Continuação.

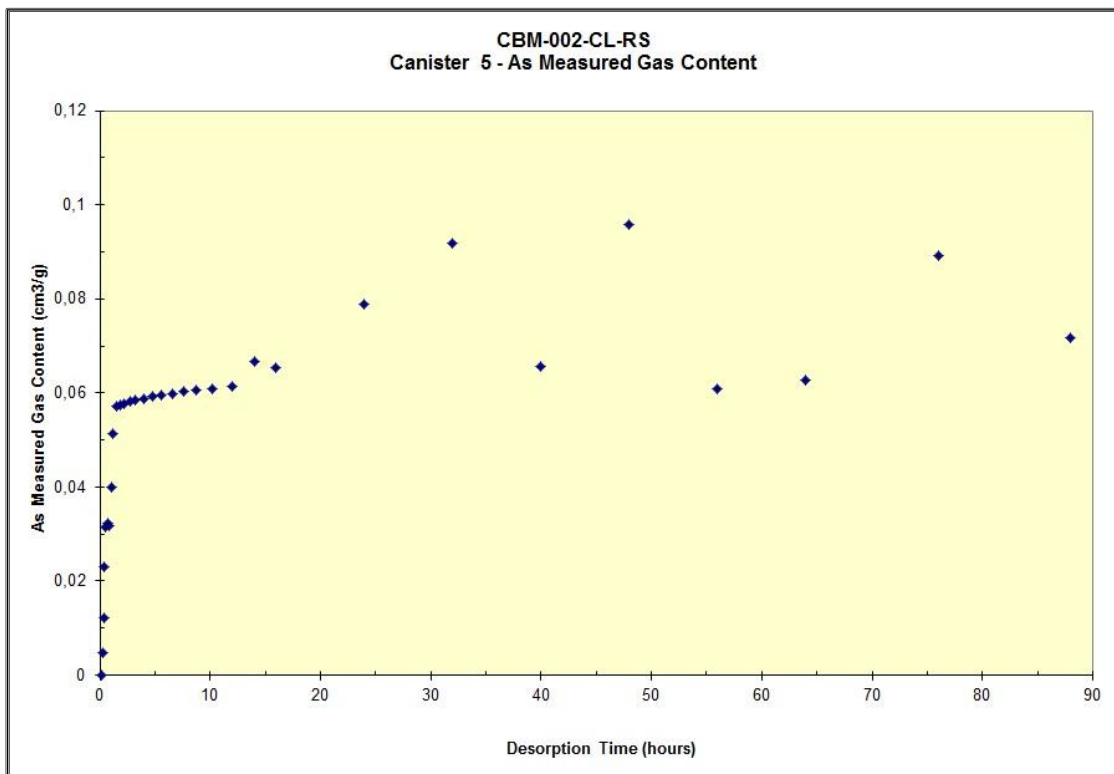
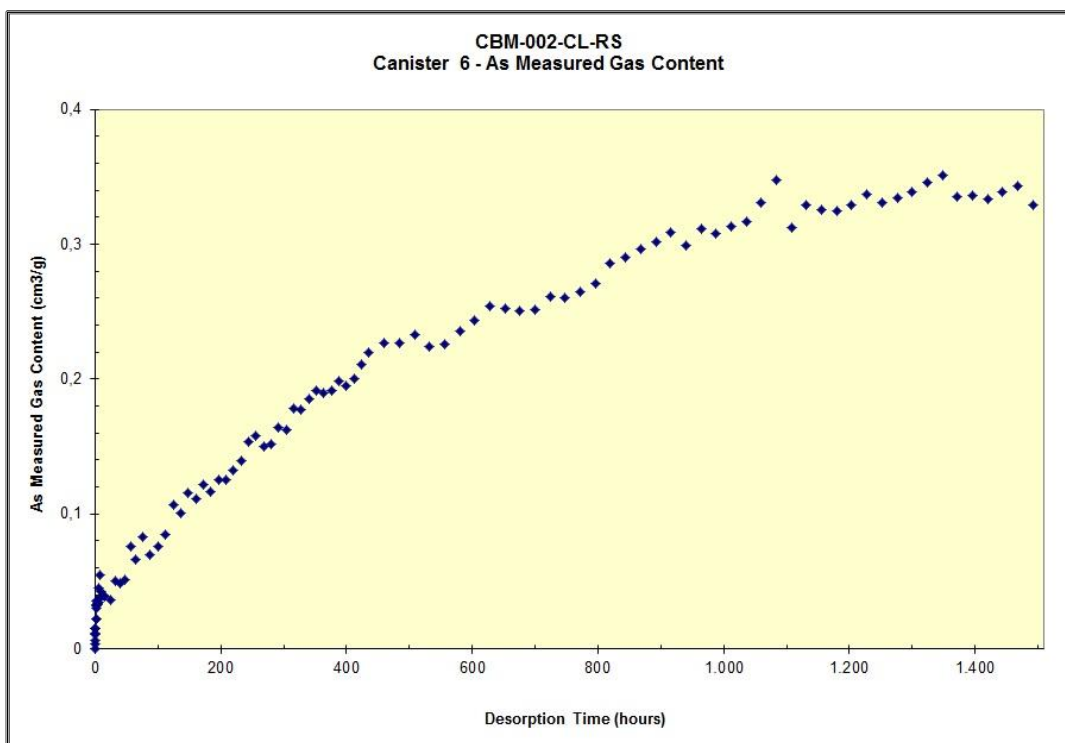


Figura 20. Continuação.



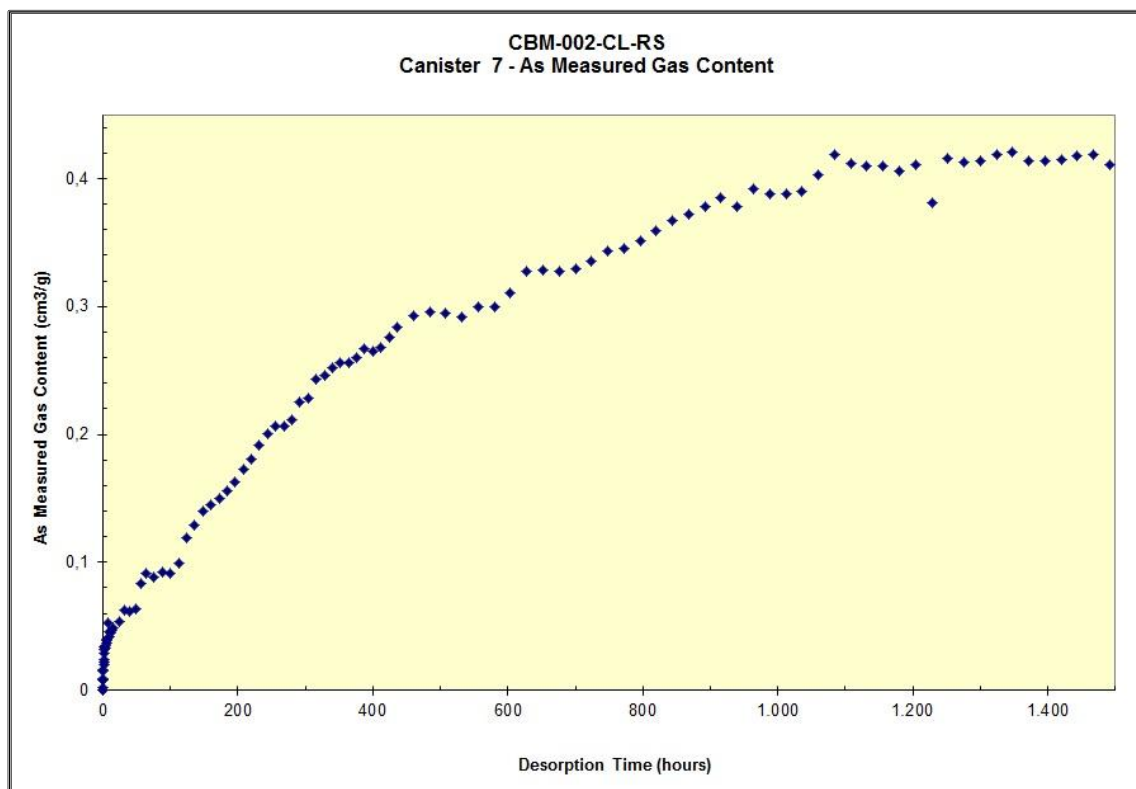


Figura 20. Continuação.

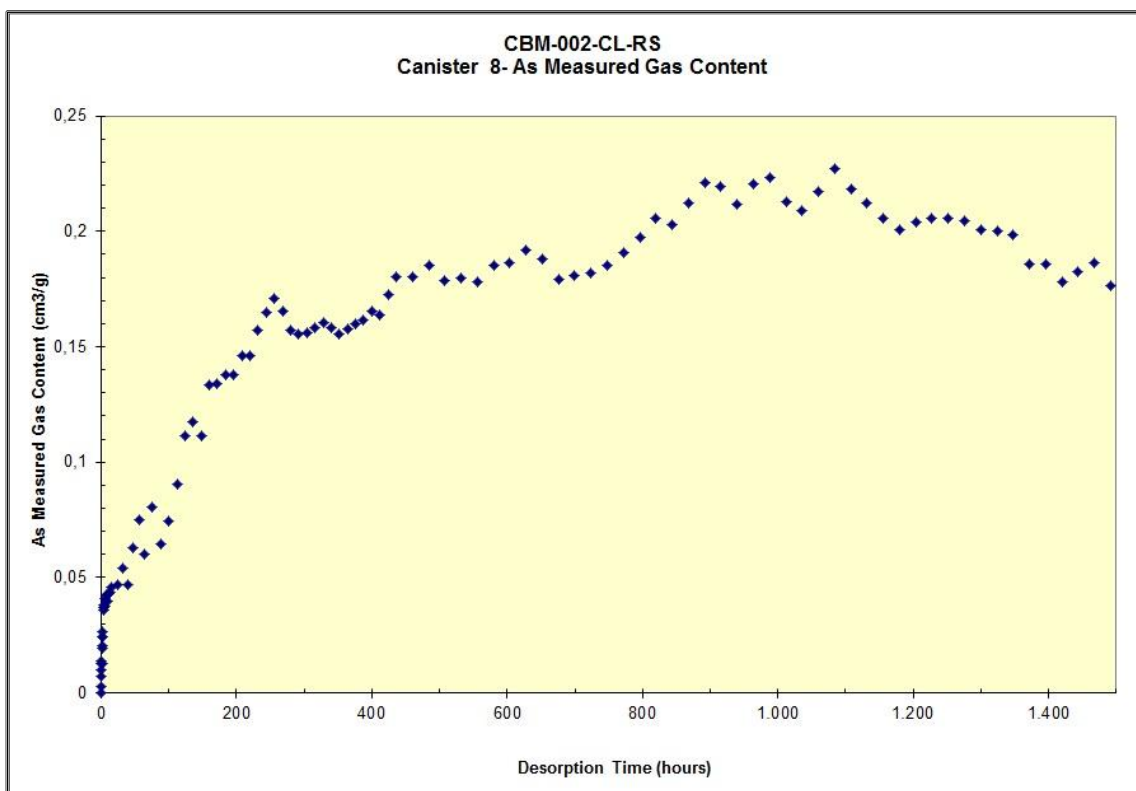


Figura 20. Continuação.

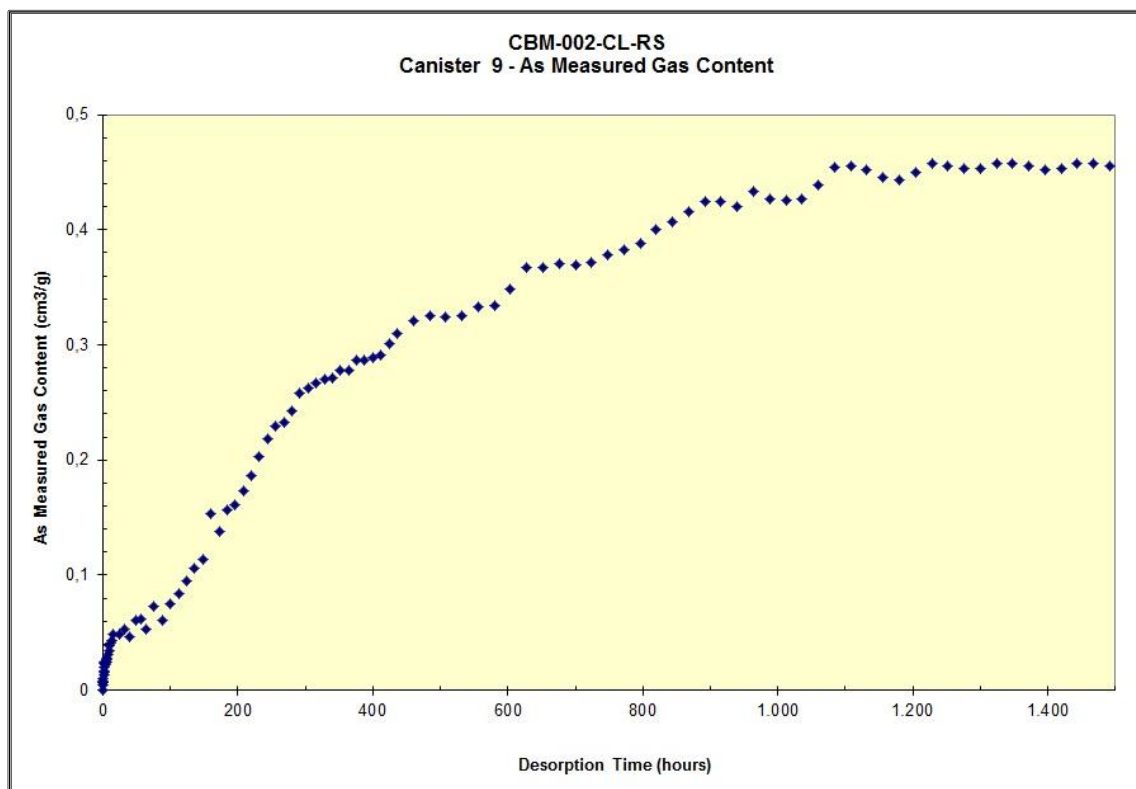


Figura 20. Continuação.

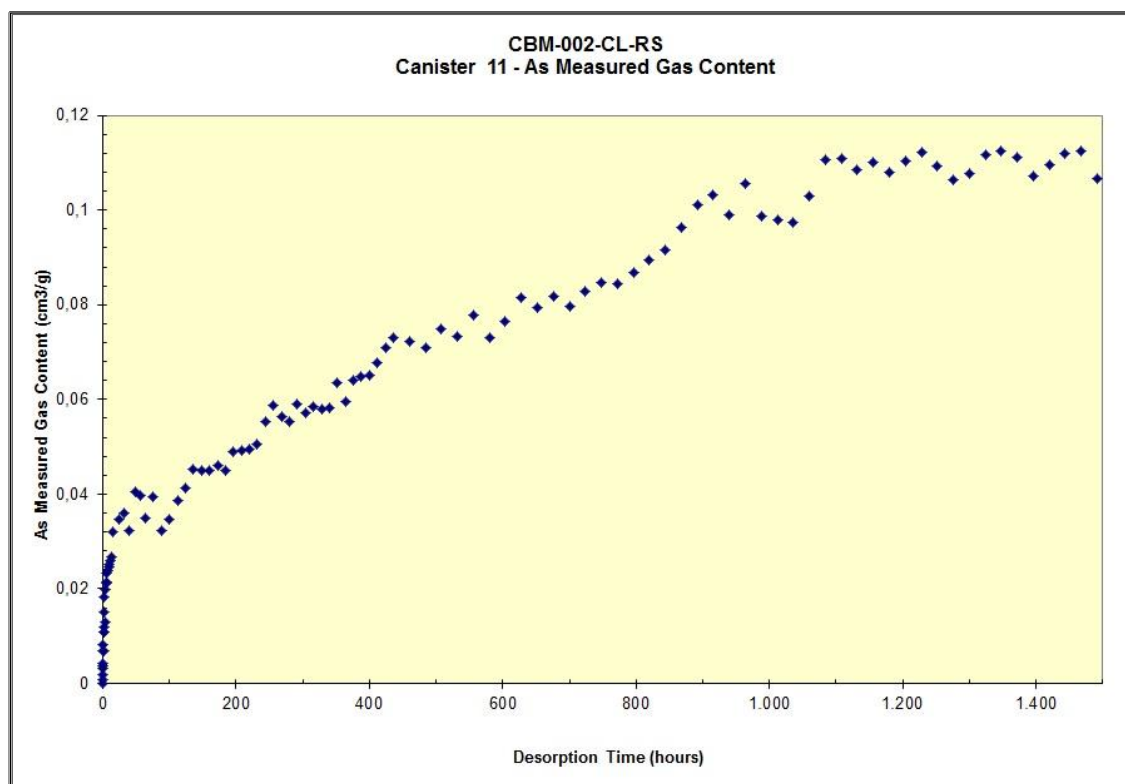


Figura 20. Continuação.

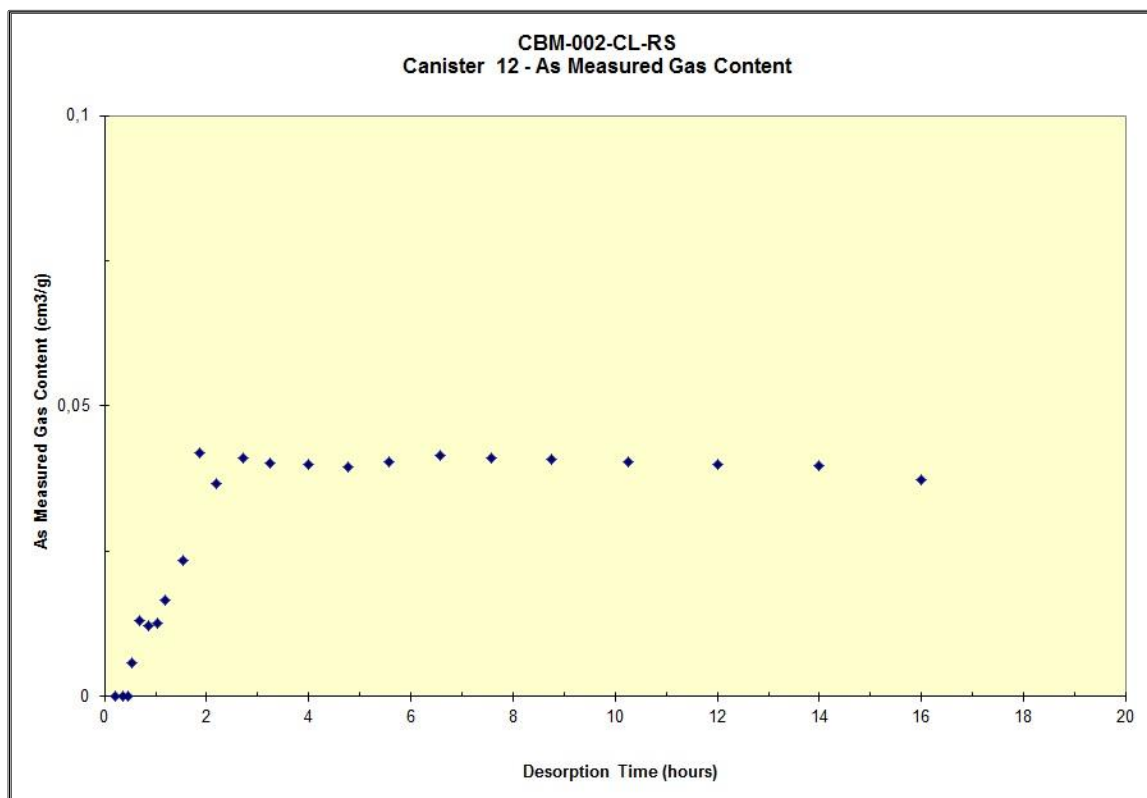


Figura 20. Continuação.

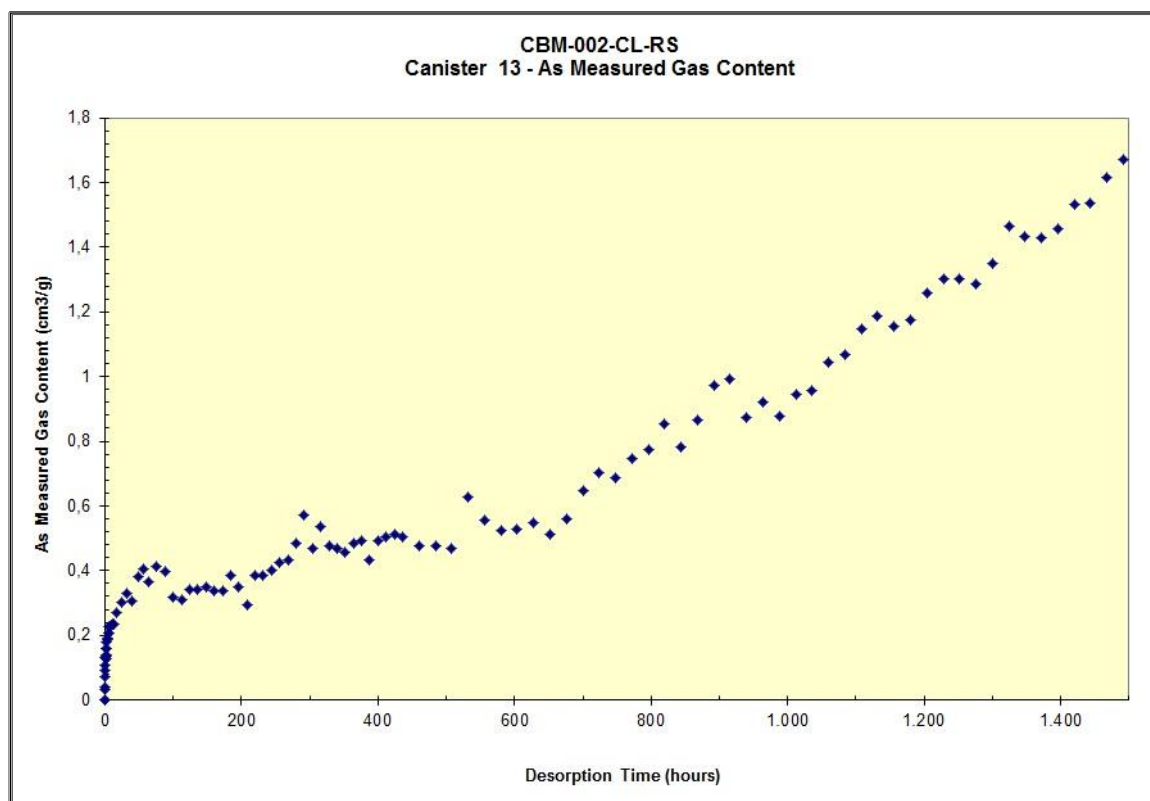


Figura 20. Continuação.



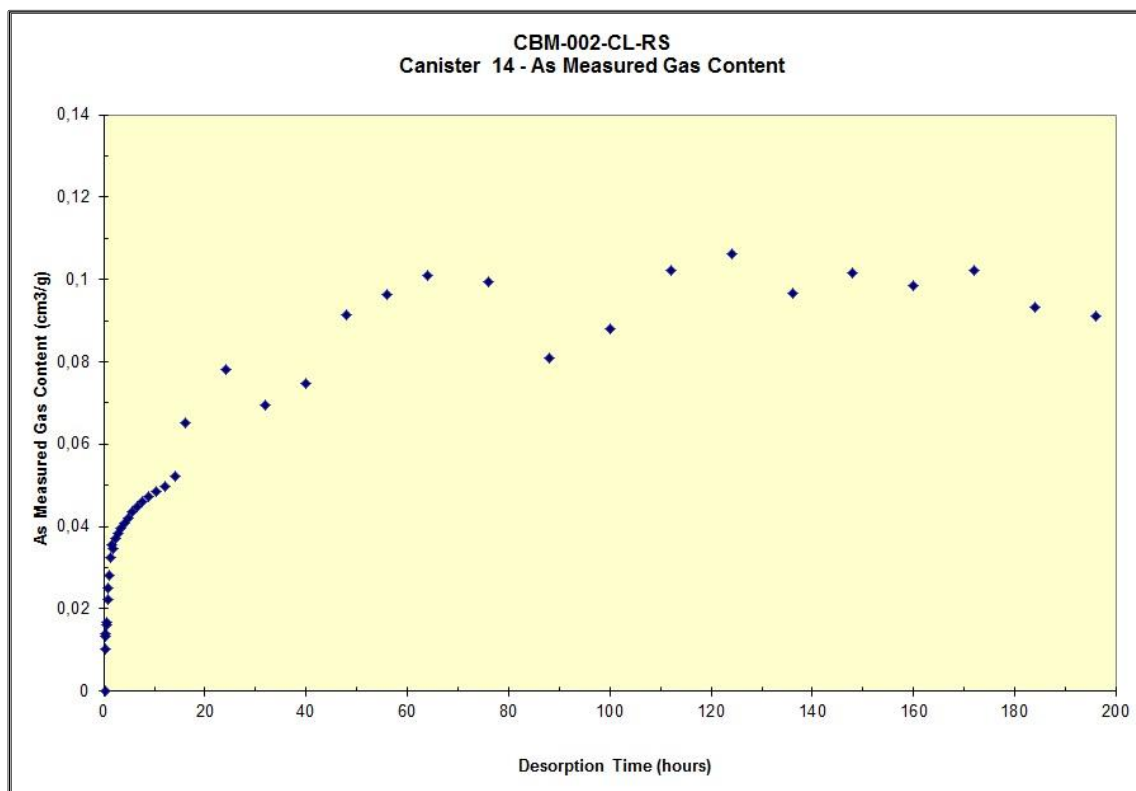


Figura 20. Continuação.

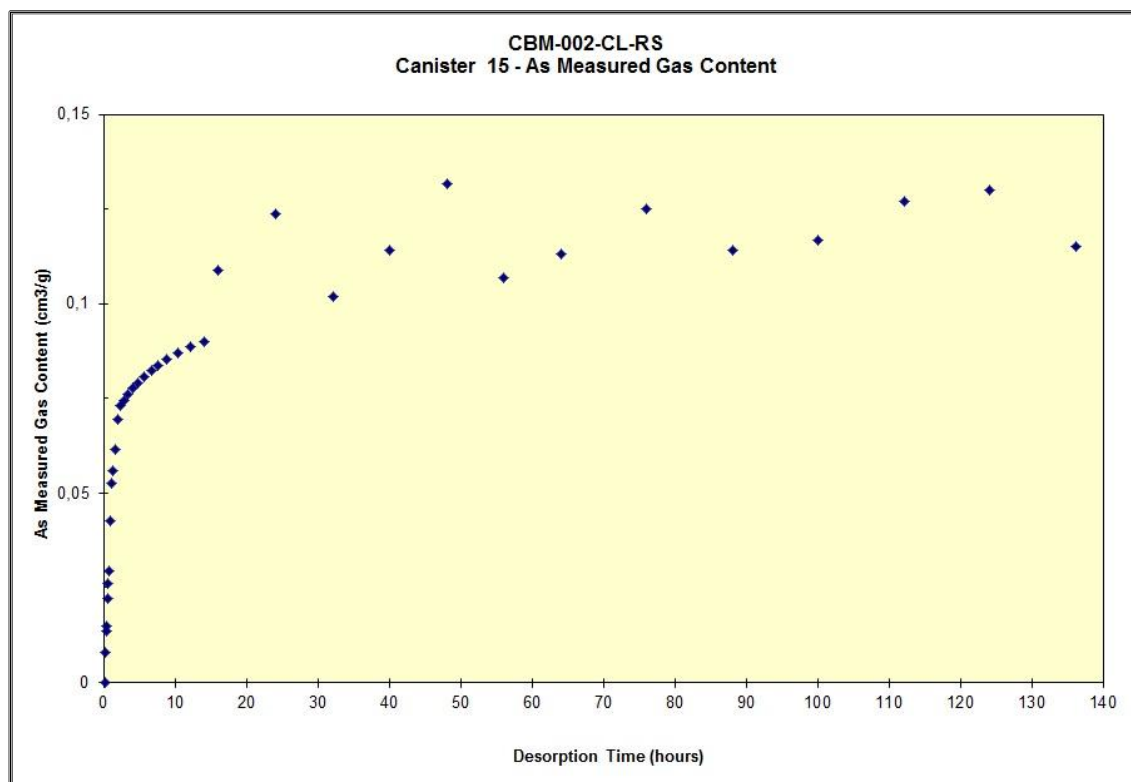


Figura 20. Continuação.

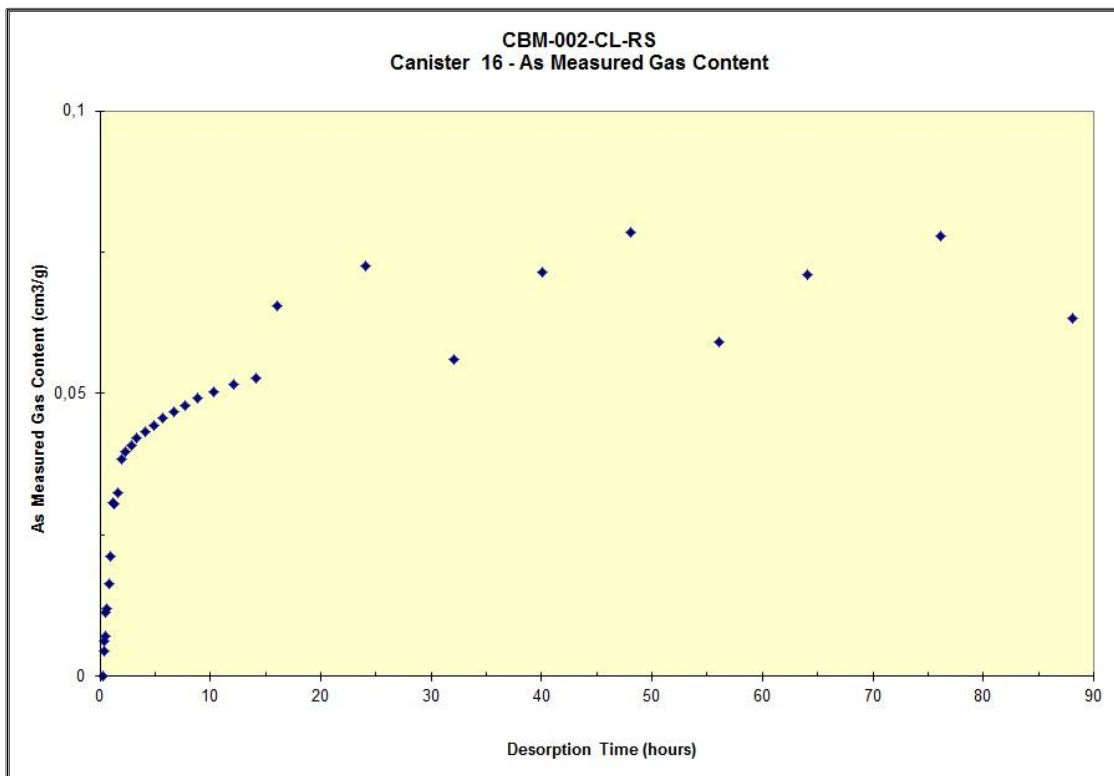


Figura 20. Continuação.

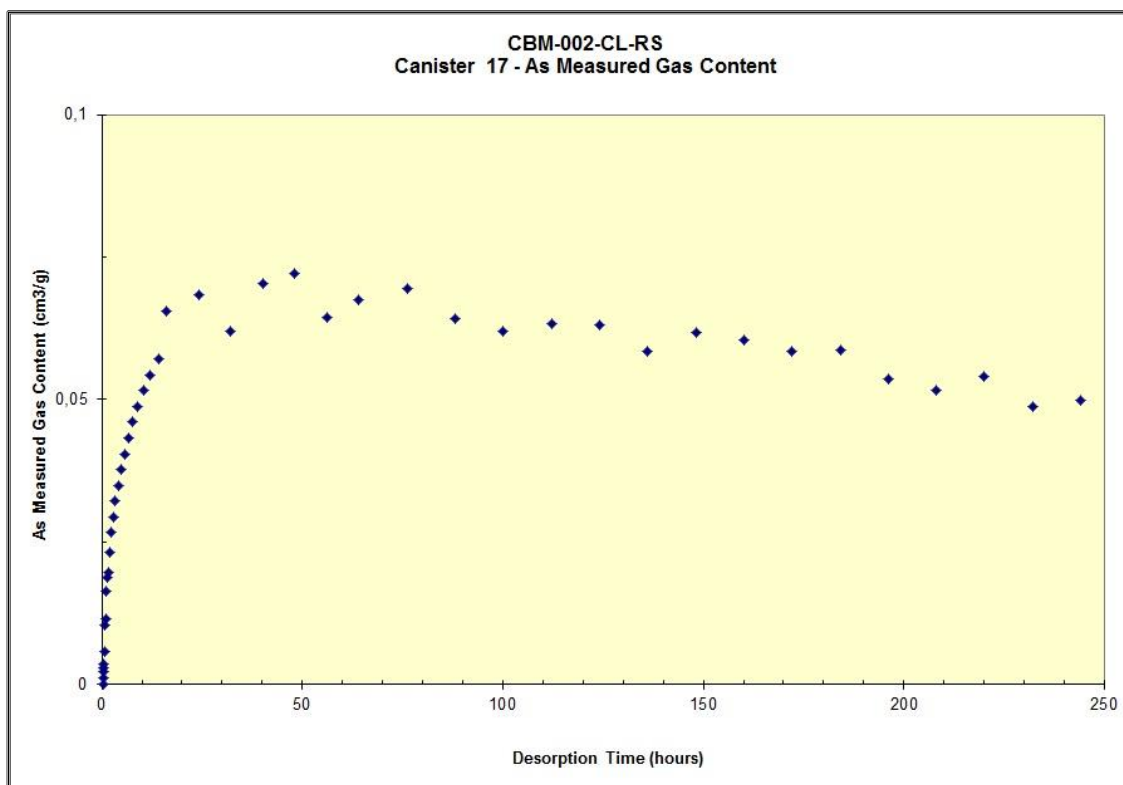


Figura 20. Continuação.

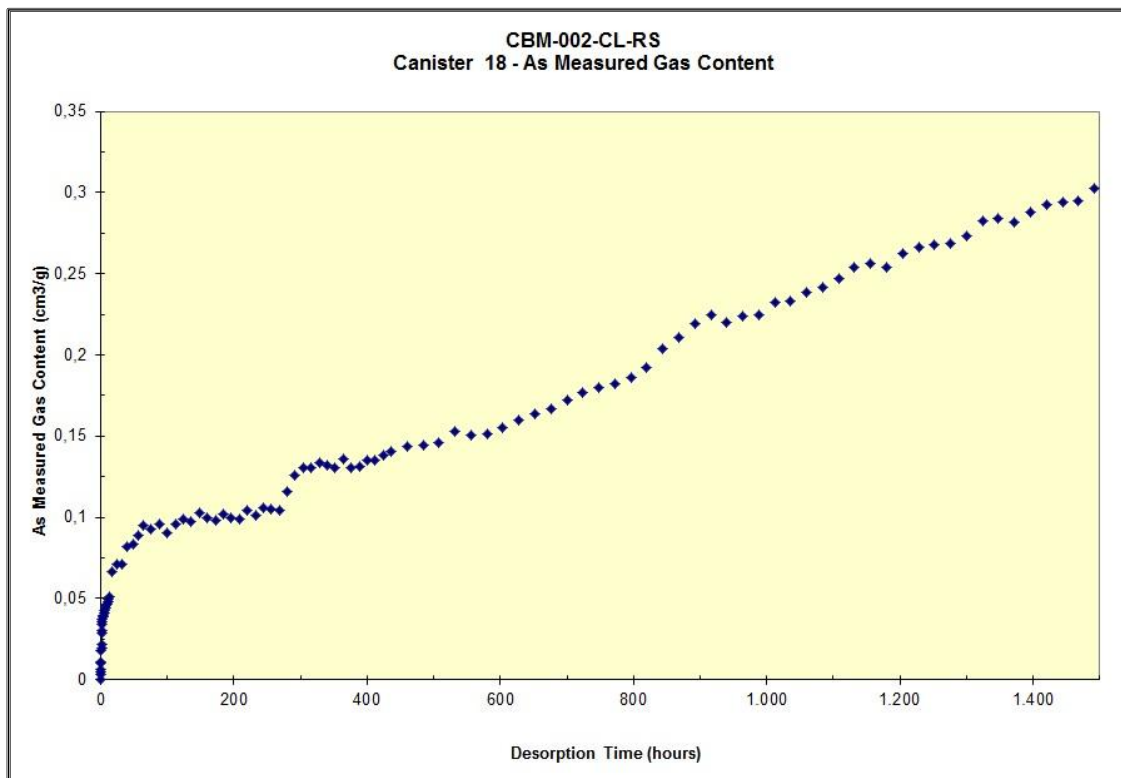


Figura 20. Continuação.

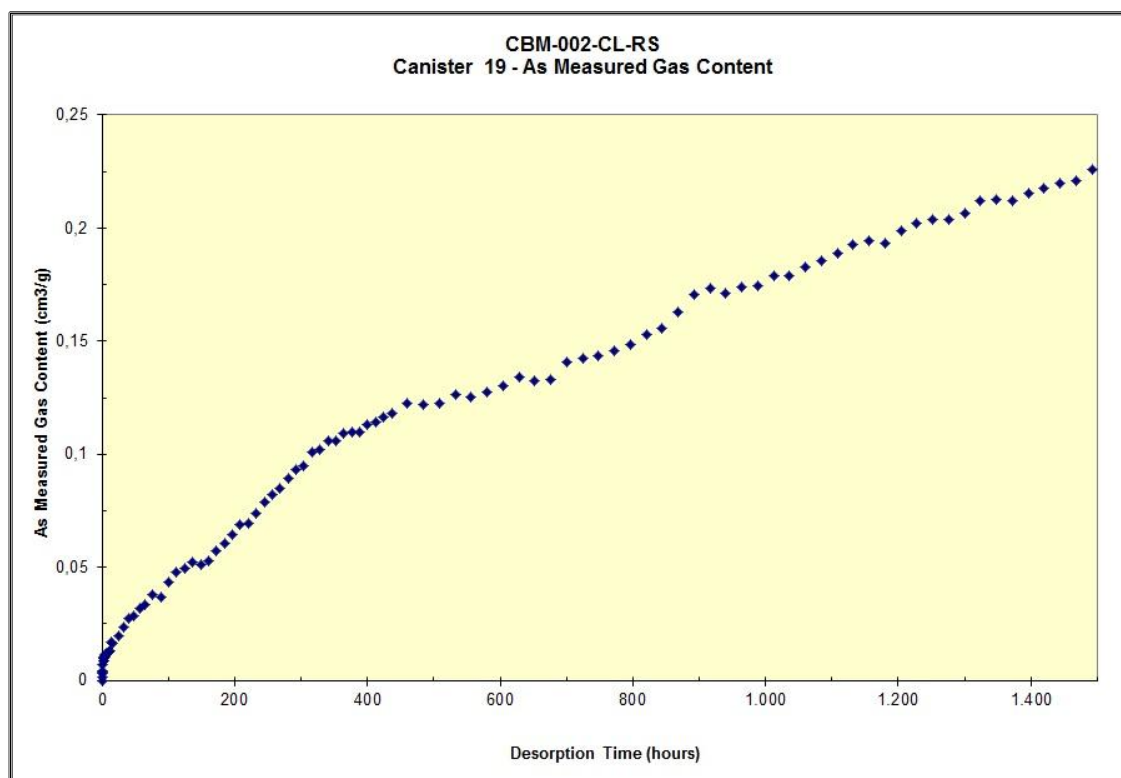


Figura 20. Continuação.

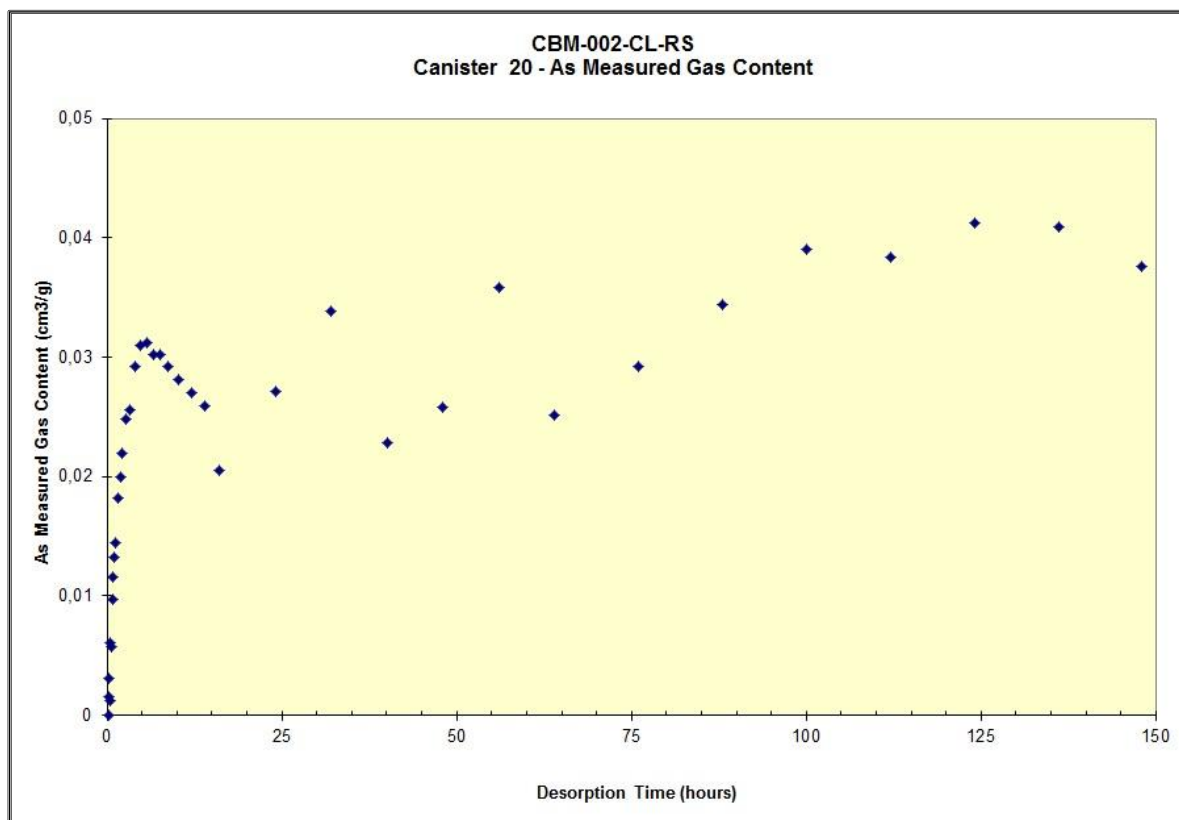


Figura 20. Continuação.

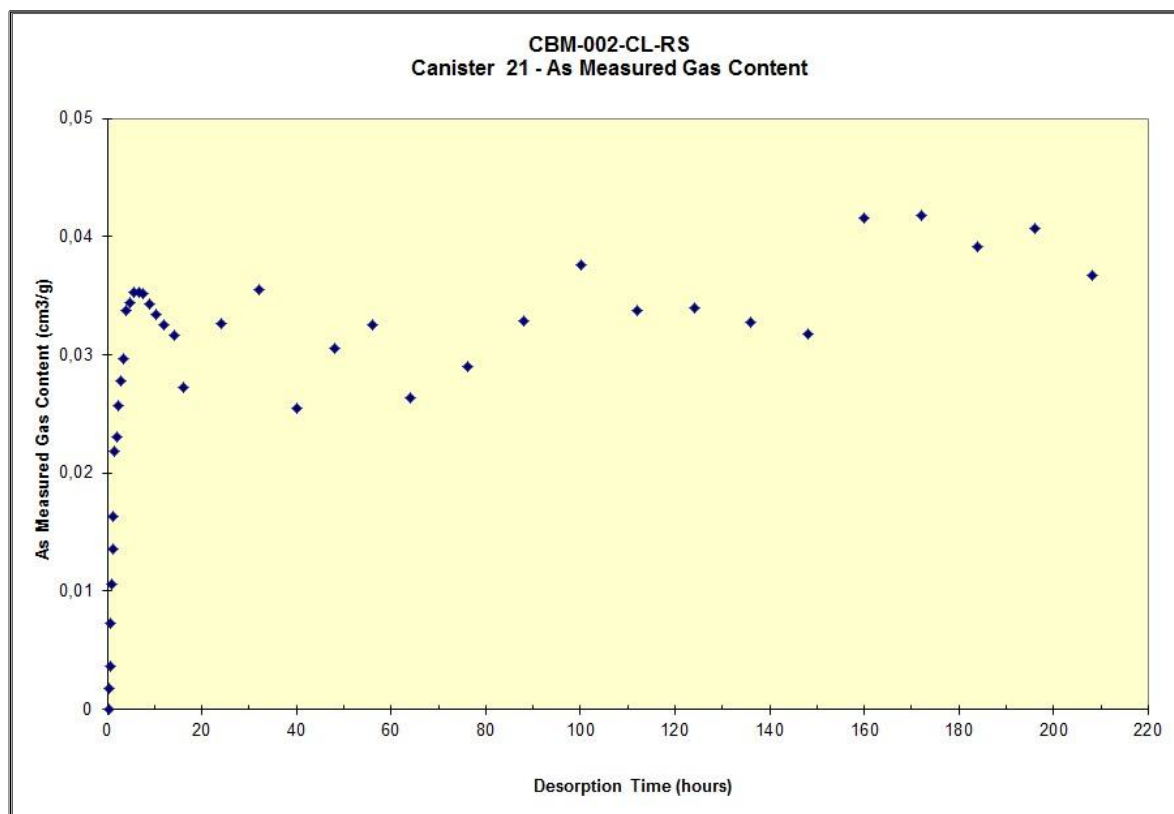


Figura 20. Continuação.

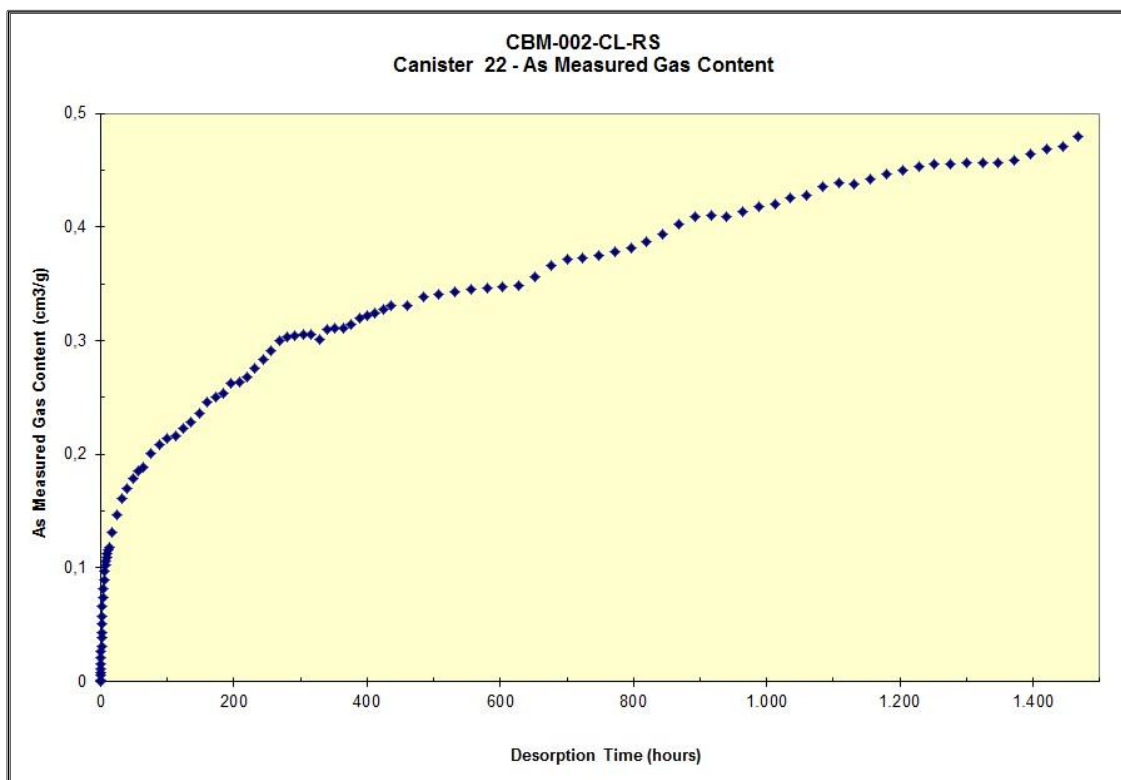


Figura 20. Continuação.

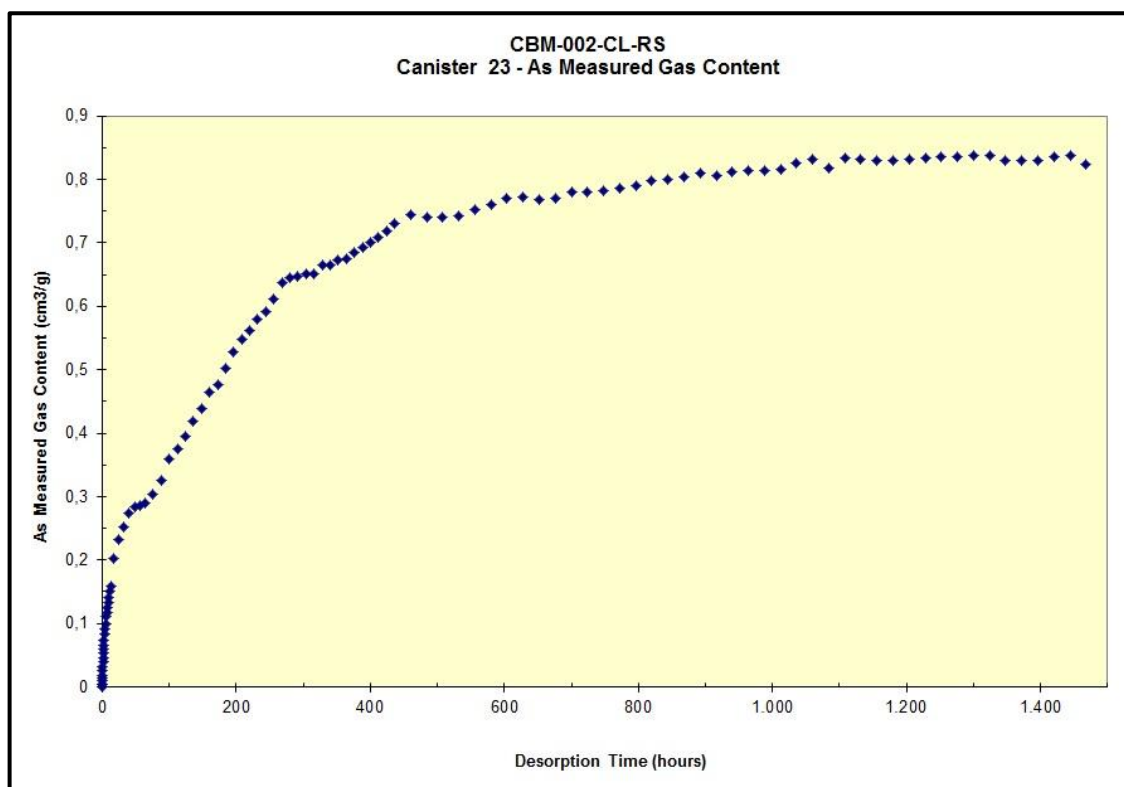


Figura 20. Continuação.

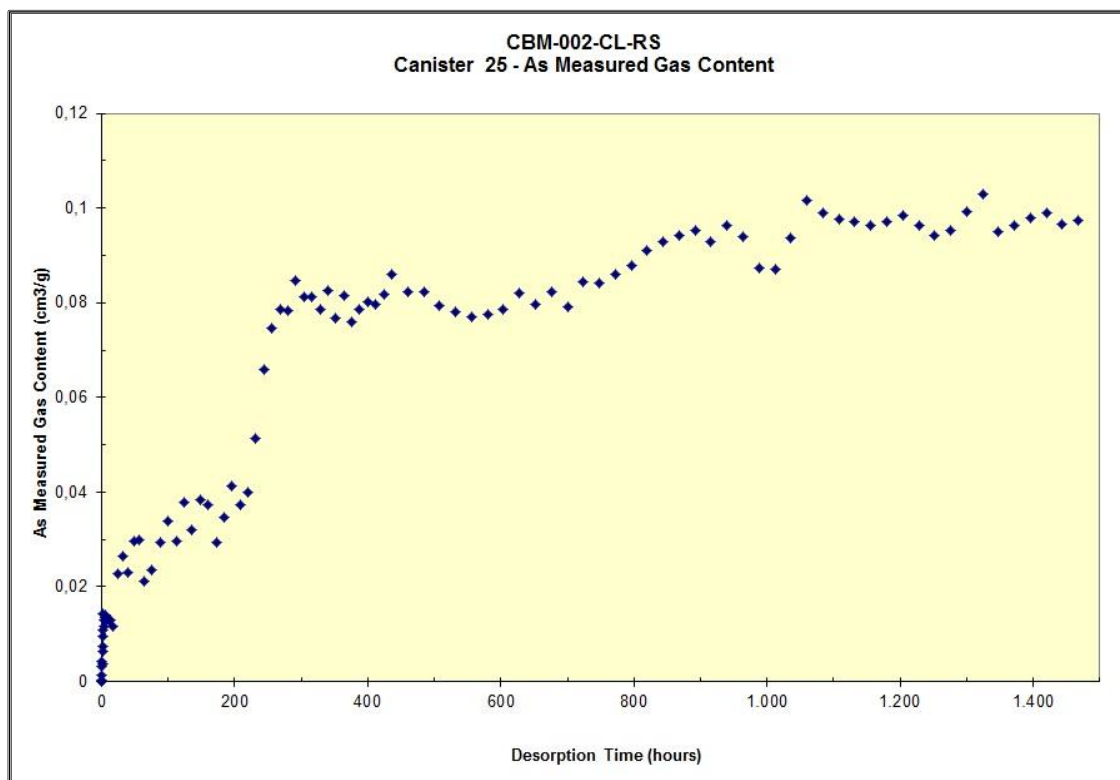


Figura 20. Continuação.

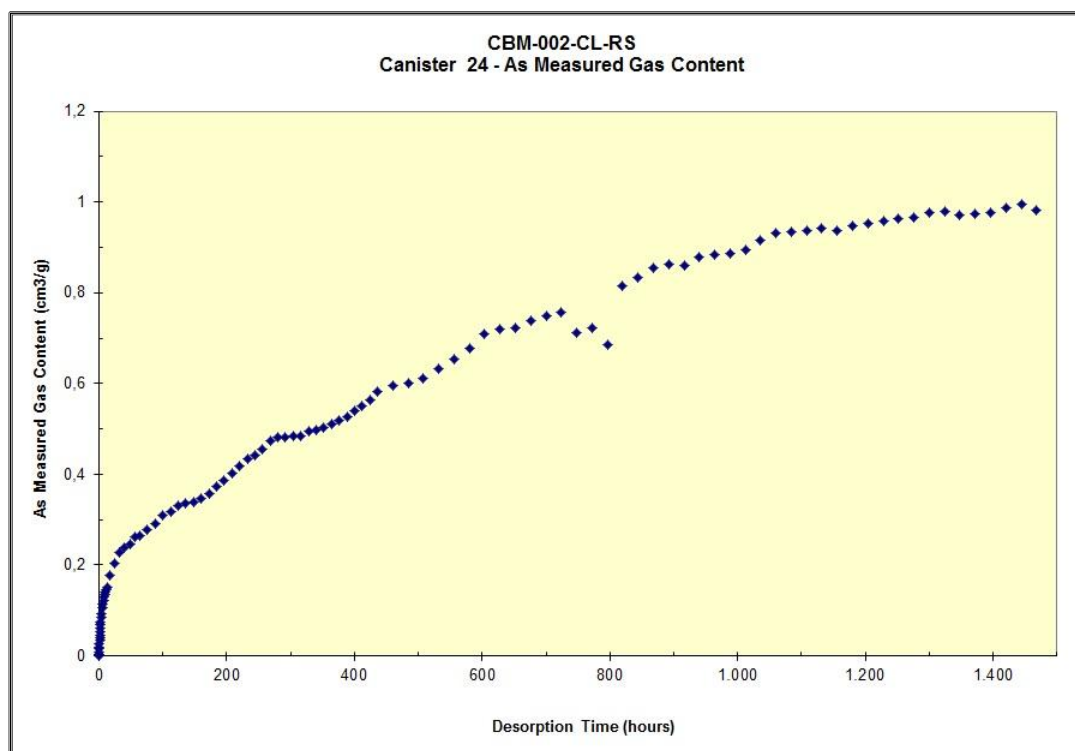


Figura 20. Continuação.

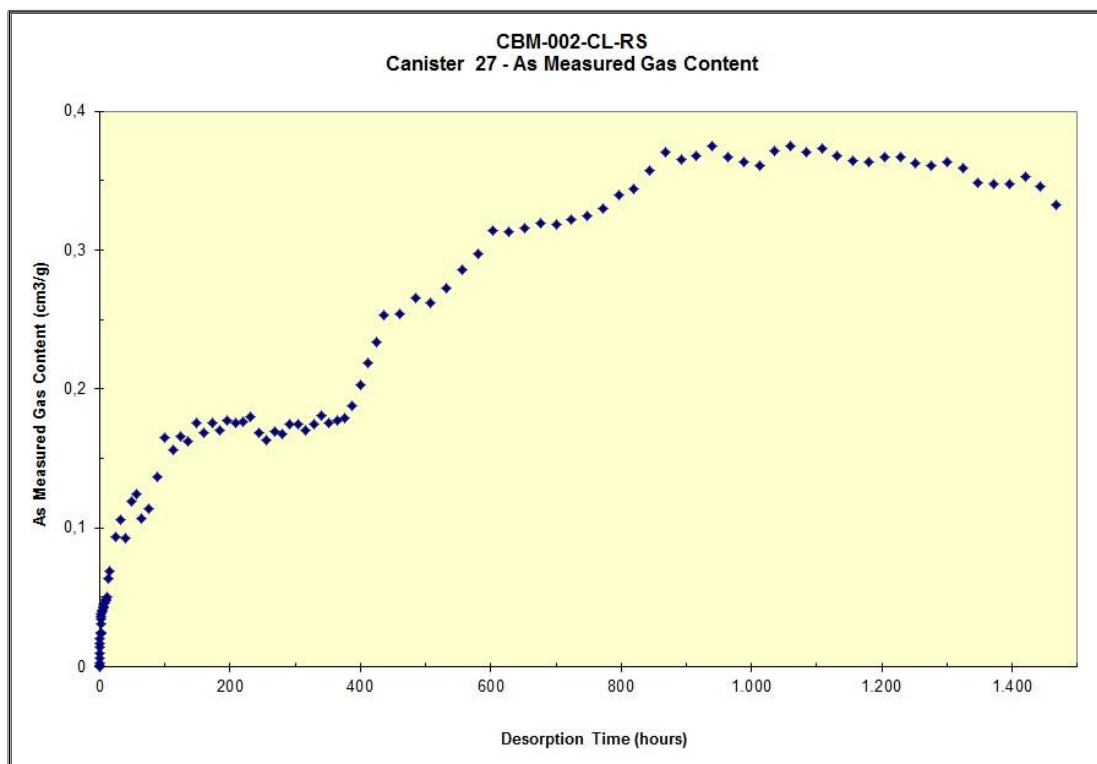


Figura 20. Continuação.

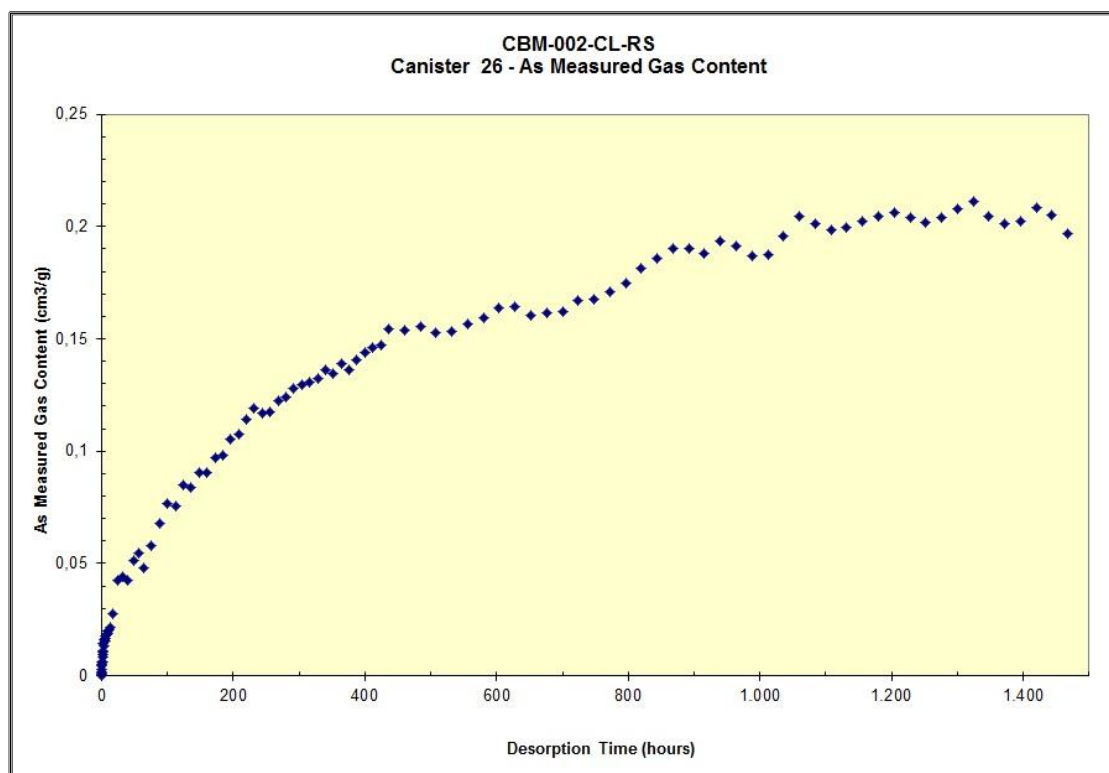


Figura 20. Continuação.

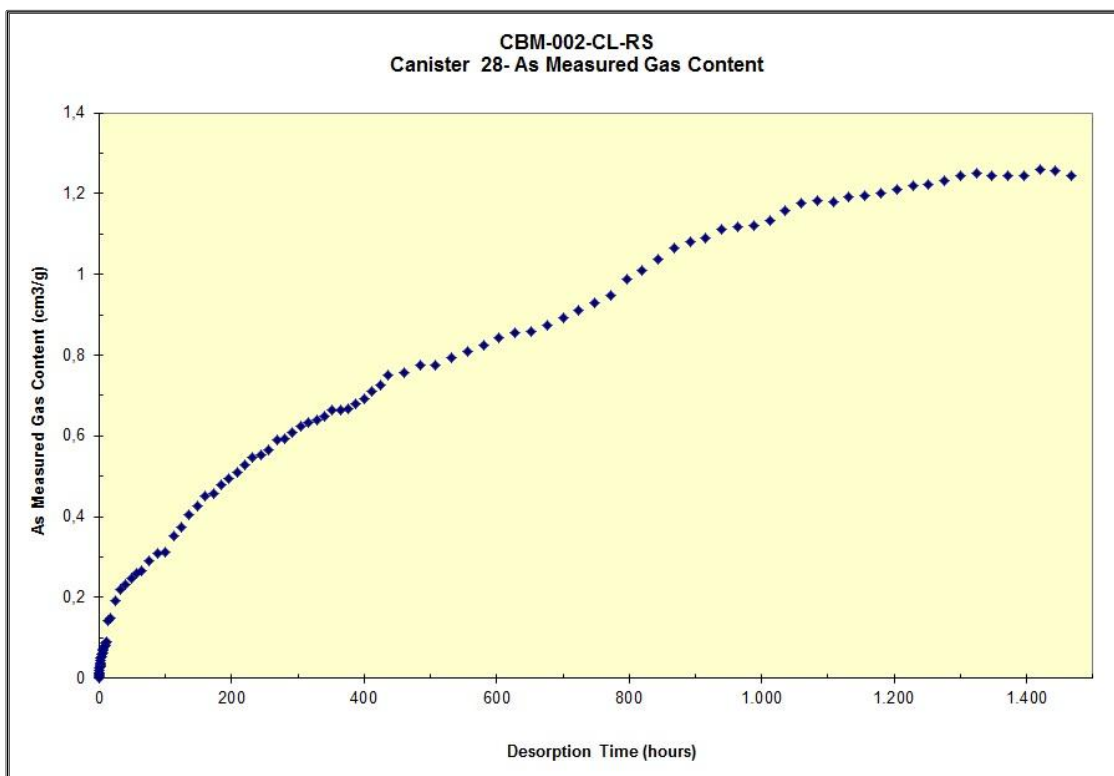


Figura 20. Continuação.

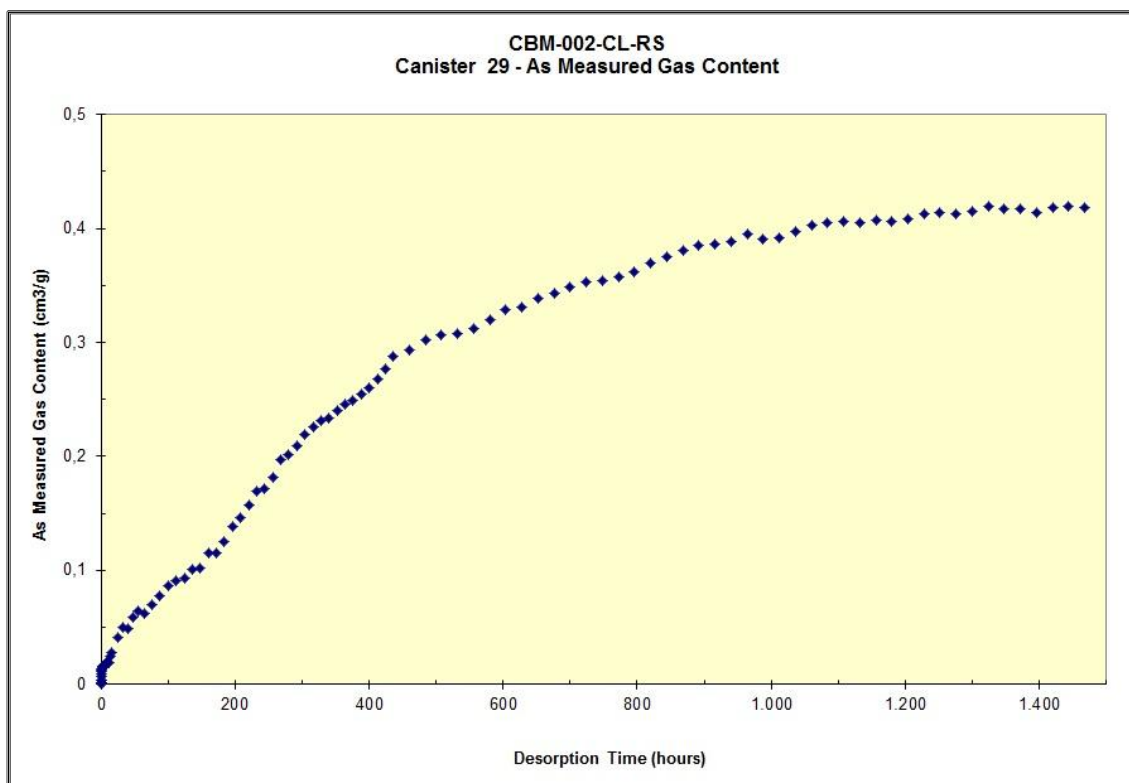


Figura 20. Continuação.