

CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA E TERMOPLÁSTICA DO CARVÃO DA CAMADA CHIPANGA DA MINA DE MOATIZE - MOÇAMBIQUE

Marthina KNIPPLING¹; Ivo André Homrich SCHNEIDER²; Bruno Deves FLORES³; Eduardo OSÓRIO⁴; Eunírio Z. FERNANDES⁵; Wilson MIOLA⁶

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul, marthina.k@hotmail.com; ²Universidade Federal do Rio Grande do Sul, ivo.andre@ufrgs.br; ³Universidade Federal do Rio Grande do Sul, bruno.flores@ufrgs.br; ⁴Universidade Federal do Rio Grande do Sul, eosorio@ufrgs.br; ⁵Instituto Tecnológico Vale, eunirio.zanetti@itv.org; ⁶Instituto Tecnológico Vale, wilson.miola@itv.org

RESUMO

A camada Chipanga da Mina de Moatize – Moçambique, África - tem sido explorada para a produção de carvões com propriedades térmicas e metalúrgicas. O carvão é caracterizado, com base na refletância da vitrinite, como um carvão betuminoso alto volátil A conforme ASTM. A camada apresenta aproximadamente 30 m de espessura, sendo lavrada a céu aberto em 3 ou 4 níveis ou seções de trabalho. O beneficiamento de grossos é feito por ciclones de meio denso e os finos por espirais, elutriação e flotação. O objetivo do presente trabalho foi avaliar a recuperação mássica e as propriedades térmicas e metalúrgicas do carvão nestas quatro seções de trabalho. O intuito foi ter informações sobre os produtos e as possibilidades ou não de mistura entre os carvões, auxiliando nas operações de lavra, beneficiamento e produto final desejado. A amostragem foi realizada de forma composta em 4 níveis da camada Chipanga, denominadas, da base para o topo, de LC456, MLCU, UCB e UCT. A recuperação mássica dos produtos, carvão coqueificável e carvão térmico, foi fornecidos pelo setor de operação da usina. Em laboratório, caracterizou-se o carvão em relação aos seguintes parâmetros: análise imediata (cinzas, matéria volátil e carbono fixo), poder calorífico, enxofre total, dilatométrica Audibert-Arnu, Plastometria Gieseler e análise petrográfica. Os resultados mostram que a recuperação mássica do carvão metalúrgico aumenta da base para o topo. As propriedades do carvão térmico são semelhantes nos diferentes níveis. Contudo, as propriedades do carvão metalúrgico diferem, sendo, de modo geral, melhor no nível LC456. Os resultados são discutidos em termos de possibilidades de diluição de lavra e misturas entre as camadas.

Palavras-chave: carvão, coque, termoeletricidade, metalurgia, camada Chipanga - Moatize.

ABSTRACT

Chipanga seam of Moatize Mine – Moçambique, África, has been mining for the production of thermal and metallurgical coal. The coal is characterized, in terms of vitrinite reflectance, as a high volatile A bituminous coal, according to ASTM. The seam has approximately 30 m thick, and mining operation occurs by the open pit method in 3 or 4 work sections. Coal processing is carried out by dense medium cyclones (coarse particles) and coal fines by gravity processes (spirals or elutriation) and flotation. The aim of this work was to evaluate the yield and the thermal and metallurgical properties in different levels of the seam with the intention of helping the mining and the beneficiation operation. Work methodology included sampling, quantification, and characterization of coal products of the work sections named from the base to the top as LC456, MLCU, UCB, and UCT. The yield, of both thermal and metallurgical coal, was provided by the production sector of the plant. The coals were characterized in terms of the following parameters: proximate analysis (ash, volatile matter, fixed carbon), calorific value, total sulfur, Audibert-Arnu dilatometer test, Gieseler plastometer test, and petrographic analysis. The results showed that the yield of metallurgical coal increased from the base to the top. The properties of the thermal coal are similar in the different work sections. However, the properties of the metallurgical coal are better in the work section LC456. The results are discussed in terms of mining dilution and mixtures between the coal of the different levels of Chipanga seam.

Key-words: coal, coke, thermoelectricity, metallurgy, Chipanga seam - Moatize

1 INTRODUÇÃO

A região de Moatize em Moçambique destaca-se por apresentar uma das maiores reservas a nível mundial de carvão proveniente da Formação Moatize-Minjova, de idade permiana inferior, sendo explorada pela empresa multinacional brasileira Vale S.A.

A produção de carvão em Moatize foca a produção de carvão metalúrgico e na produção de carvão térmico. O primeiro é empregado na produção de coque para fabricação de aço e segundo no mercado de produção de energia em termoeletricas. Isso faz com que os dois tipos de carvão sejam negociados em mercados diferentes.

O mercado de carvão metalúrgico enfatiza principalmente as propriedades importantes para a produção de coque, que incluem propriedades como “rank”, propriedades plásticas, composição maceral e composição química da matéria mineral (SCHAPIRO ET AL., 1961, 1964; NAKAMURA, 1977; LOISON ET AL, 1989; PRICE ET AL., 1994; DIEZ ET AL, 2002). O mercado do carvão térmico foca principalmente no teor de cinzas, poder calorífico e teor de enxofre.

Neste contexto, o presente estudo se propõe a realizar a caracterização dos produtos do carvão da Mina de Moatize, com enfoque na aplicação (térmico e metalúrgico). O trabalho foi realizado em quatro seções de lavra da camada Chipanga.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A camada de carvão Chipanga, alvo da presente investigação, apresenta aproximadamente 30 metros de espessura. Essa camada foi dividida em quatro subcamadas (ou seções de trabalho), denominadas, da base para o topo, como: LC456, MLCU, UCB e UCT. Nessas subcamadas ocorre um enriquecimento do carvão da base para o topo, sendo que as camadas inferiores possuem um maior rendimento mássico do as camadas superiores. A Mina de Moatize é lavrada pelo método a céu aberto. O beneficiamento de grossos (50 mm > d > 2 mm) é feito por ciclones de meio denso e os finos (d < 2 mm), por espirais, elutrição e flotação. O presente estudo foi realizado com rejeitos grossos, que representam aproximadamente 90% da produção.

Valores de rendimento mássico foram calculados a partir do balanço de massa da usina de beneficiamento no período de janeiro de 2014 a março de 2015. A amostragem do material, realizada no mesmo período, foi realizada pela Vale e compreendeu vários meses de produção. A preparação das amostras incluiu processo de britagem em britador de mandíbulas, cominuição em moinho de rolos. Após esta etapa, a amostra foi moída a mão para a caracterização metalúrgica e, para as demais análises, em moinho pulverizador para granulometria inferior a 0,25 mm (60# Tyler).

A caracterização dos materiais foi realizada pelas seguintes análises:

- Análise imediata:

O teor de cinzas (CZ) foi realizada conforme procedimento ASTM-D3174 (2012) e análise de matéria volátil (MV) pelo procedimento ASTM-D3175 (2012). O valor de carbono fixo (CF) foi determinado pela diferença de 100% e os valores cinzas e matéria volátil. Os valores foram convertidos em base seca através de medidas de umidade. A análise de umidade foi realizada conforme ASTM D 3173 (2011).

- Formas de enxofre (Stotal):

O teor de enxofre é importante para quantificar as formas de enxofre presentes na amostra. O teor de enxofre total foi determinado no equipamento LECO SC 457.

- Análise Petrográfica:

A análise petrográfica dos carvões foi realizada com o objetivo de avaliar o “rank” e a composição maceral dos carvões. O grau de evolução (“rank”) do carvão foi determinado pelo índice de refletância da vitrinita (250 medidas), de acordo com os procedimentos descritos na norma ISO 7405-5 (2009). A média e o desvio padrão foram calculados.

O conteúdo em grupos de macerais individuais e da matéria mineral foi determinado de acordo com classificação estabelecido pelo International Committee for Coal and Organic Petrology (ICCP). A análise foi baseada em 500 pontos de acordo com a norma ISO 7403-3 (2009) e os resultados expressos em percentuais volumétricos.

- Plastometria Gieseler:

O ensaio de plastometria foi realizado conforme a norma ASTM D2639 (2011). O teste consiste em preparar uma amostra de 5 g de carvão com granulometria inferior a 0,85 mm, a qual é compactada no interior de uma retorta cilíndrica. No interior da amostra compactada de carvão é inserida uma pequena hélice, que é submetida a torque constante. A retorta contendo a amostra de carvão é inserida em banho de estanho/chumbo a uma temperatura de 320°C e sofre aquecimento a uma taxa de 3°C/min até 500°C. Durante o aquecimento da amostra a rotação da hélice no interior da amostra de carvão é medida em dial (1 dial = 3,6°) divisões por minuto (ddpm). Os parâmetros retirados do teste são a temperatura de amolecimento (Tamol – temperatura na qual é registrada 1 ddpm), temperatura de máxima fluidez (Tmax – temperatura na qual a rotação da hélice é máxima), temperatura de ressolidificação (Tress – temperatura em que a rotação da hélice é cessada) e máxima fluidez (MF – máxima rotação da hélice). Além disso, a diferença entre temperatura de ressolidificação e temperatura de amolecimento fornece o intervalo plástico (IP). O valor de MF representa um dos mais importantes parâmetros utilizados na caracterização de carvões coqueificáveis.

- Dilatometria Audibert-Arnu

O ensaio de dilatométrica foi realizado conforme a norma ASTM D5515 (2010). O teste consiste na preparação de uma amostra de carvão com granulometria inferior a 0,25 mm, a qual é compactada em formato cônico com 60 mm de altura. A amostra é inserida em uma retorta cilíndrica e submetida a aquecimento entre 350 a 500°C a uma taxa de 3°C/min. As variações percentuais da altura da amostra são registradas em função da temperatura, onde variações negativas representam contração e variações positivas representam dilatação. Os parâmetros retirados do ensaio são a temperatura de amolecimento (T1), temperatura de máxima contração (T2), temperatura de ressolidificação (T3), máxima contração (%C) e máxima dilatação (%D).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 são apresentados a recuperação mássica e os resultados da análise imediata, de enxofre total e do poder calorífico dos carvões metalúrgicos e térmicos produzidos nos 4 níveis da camada Chipanga. Pode-se observar que a

recuperação mássica do carvão metalúrgico aumenta da base para o topo, com valores de 35,7%, 23,5%, 22,3% e 13,2% para as subcamadas LC456, MLCU, UCB e UCT, respectivamente. A produção de carvão térmico mantém-se relativamente constante, com valores 12,6%, 13,4%, 14,8% e 13,7% para o mesmo ordenamento das subcamadas. O teor de cinzas dos produtos é parecido, de 10 a 12 % para o carvão metalúrgico e de 24 a 31% para o carvão térmico. O poder calorífico ficou no intervalo de 7400 a 7600 kcal kg⁻¹ para o carvão metalúrgico e de 5900 a 6600 kcal kg⁻¹ para o carvão térmico. Cabe ressaltar que o carvão metalúrgico da camada UCT apresentou um aumento no teor de matéria volátil com 28%. Nas demais camadas esse valor não ultrapassou a 26,1%. O teor de enxofre no carvão metalúrgico variou de 0,9% a 1,2% e o térmico de 0,8% a 1,1%, ambos com um aumento da base para o topo.

Tabela 1 – Recuperação mássica (R), análises imediata, teor de cinza, enxofre total e poder calorífico do carvão metalúrgico e térmico produzido em quatro subcamadas da Camada Chipanga .

Sub camadas	Produto	R (%)	CZ (%)	MV (%)	CF (%)	S (%)	PC (kcal kg ⁻¹)
UCT	Metalur.	13,2	10,3	28,0	61,7	1,2	7532
	Térmico	13,7	26,5	24,2	49,3	1,1	6608
UCB	Metalur.	22,3	10,6	25,7	63,7	1,1	7590
	Térmico	14,8	27,5	22,5	50,0	0,9	5951
MLCU	Metalur.	23,5	11,9	25,1	63,0	0,9	7491
	Térmico	13,4	30,4	22,5	47,1	0,9	6334
LC456	Metalur.	35,7	10,7	26,1	63,2	0,9	7524
	Térmico	12,6	24,9	21,8	53,3	0,8	6174

R = recuperação mássica, Cz = cinzas, MV = matéria volátil, CF = carbono fixo, S = enxofre total, PC = poder calorífico.

A Tabela 2 apresenta a composição petrográfica do carvão metalúrgico produzido nos 4 níveis da camada Chipanga. O valor médio da refletância da vitrinita variou de 1,02 até 1,13%. Esses valores correspondem ao “rank” betuminoso, variando de médio a alto volátil (ASTM D388).

A matéria orgânica é dominada por macerais do grupo da vitrinita, com variação de 93,3 a 79,3%, com predominância da colotelinita. Macerais do grupo da liptinita não foram encontrados. Macerais do grupo da inertinita perfazem de 20,7 a 6,7%, sendo comum a semifusinita, inertodetrinita e fusinita. A matéria mineral compõe de 19,8 a 14,0%, com predominância de argila.

Tabela 2 – Resultados da análise petrográfica do carvão metalúrgico produzido em quatro subcamadas da Camada Chipanga.

Macerais					
Sub camadas	Rm vit	Vitrinita	Liptinita	Intertinita	Matéria Mineral
	(%)		(% vol. Imm)		(%)
UCT	1,02	93,3	0	6,7	14,0
UCB	1,13	79,3	0	20,7	19,8
MLCU	1,07	83,9	0	16,1	10,8
LC456	1,13	84,4	0	15,6	14,2

Rm=refletância randômica média, vol.=volume, imm= isenta de matéria mineral

Chama a atenção a alta concentração de macerais do grupo da vitrinista em todos os carvões da camada Chipanga, especialmente a camada UCT. A concentração de vitrinita é um indicativo da qualidade de carvões para a produção de coque, uma vez que esses macerais são os principais responsáveis pelas propriedades termoplásticas dos carvões e, conseqüentemente, pela qualidade do coque. Carvões com alta concentração de vitrinitas, quando utilizados em misturas, oferecem como vantagem a flexibilização do uso de maior quantidade de carvões ou aditivos inertes.

Com relação aos testes de plastometria expressados na Tabela 3, os carvões coqueificáveis oriundos das camadas MLCU e UCB possuem fluidez máxima semelhante, com valores próximos a 100 ddpm. Ambos os carvões apresentaram intervalo plástico na faixa de 70°C (intervalo relativamente estreito para carvões coqueificáveis). O carvão proveniente da camada LC456 possui fluidez máxima (207 ddpm) e intervalo plástico de 82°C. Já o carvão UCT foi o carvão com maior plasticidade, apresentando cerca de 1150 ddpm de fluidez máxima e o mais largo intervalo plástico, considerado vantajoso do ponto de vista da coqueificação.

Em ambientes industriais, a produção de coque é feita a partir de misturas e não de carvões individuais. Coques de boa qualidade são produzidos a partir de misturas com máxima fluidez entre 200 a 1000 ddpm (MIYAZU et al, 1974). Assim, o carvão metalúrgico LC456 pode ser considerado ideal para a produção de coque, ou seja, individualmente capaz de produzir um coque

de boa qualidade. No entanto, carvões de mais alta fluidez como o UCT são essenciais em misturas, pois viabilizam o uso de carvões de menor fluidez como o UCB e o MLCU.

Tabela 3 – Resultados da plastometria Gieseler do carvão metalúrgico produzido em quatro subcamadas da Camada Chipanga.

Sub camadas	Tamol (°C)	Tmax (°C)	Tress (°C)	IP (°C)	MF (ddpm)
UCT	400	452	490	90	1808
UCB	416	455	483	67	99
MLCU	423	464	492	69	110
LC456	408	458	490	82	235

Tamol = temperatura de amolecimento, Tmax = temperatura de máxima fluidez, Tress = temperatura de ressolidificação, IP = intervalo plástico, MF = máxima fluidez.

A Tabela 4 corresponde aos testes de dilatométrica. O teste de dilatométrica classifica carvões quanto ao seu poder coqueificante, onde para carvões individuais, quanto mais eleva sua dilatação, maior seu poder coqueificante. Assim, o poder coqueificante pode ser classificado da seguinte maneira: UCB e MLCU (médio), LC456 (forte) e UCT (muito forte).

Tabela 4 – Resultados da dilatométrica Audibert-Arnu do carvão metalúrgico produzido em quatro subcamadas da Camada Chipanga.

Sub camadas	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	C (%)	D (%)
UCT	385	419	471	18,2	199,5
UCB	407	438	472	18,0	44,3
MLCU	397	434	470	18,5	43,8
LC456	397	428	468	19,7	90,2

T1 = temperatura de amolecimento, T2 = temperatura de máxima contração, T3 = temperatura de ressolidificação, C = máxima contração, D = máxima dilatação.

4 CONCLUSÕES

Os carvões das diferentes seções de trabalho da Camada Chipanga apresentam composição química e poder calorífico relativamente similares. No entanto, a composição petrográfica dos carvões

metalúrgicos varia de acordo com as subcamadas estudadas. Essa variação também é fortemente percebida nas propriedades termoplásticas dos carvões, revelando diferenças importantes quanto a qualidade dos carvões em relação à produção de coque.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores ao CNPq, à Capes e ao ITV pelas bolsas de estudo e recursos concedidos para o desenvolvimento do presente projeto.

6 REFERÊNCIAS

ASTM - American Society for Testing and Material. **ASTM D 2639**: Test Method for Plastic Properties of Coal by the Constant-Torque Gieseler Plastometer. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.

ASTM - American Society for Testing and Material. **ASTM D 3173**: Standard test method for moisture in the analysis sample of coal and coke. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.

ASTM - American Society for Testing and Material. **ASTM D 3174**: Standard test method for ash in the analysis sample of coal and coke from coal. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.

ASTM - American Society for Testing and Material. **ASTM D 3175**: Standard test method for volatile matter in the analysis sample of coal and coke. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.

ASTM - American Society for Testing and Material. **ASTM D 5515**: Method for determination of the swelling properties of bituminous coal using a dilatometer. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.

DIEZ, M.A.; ALVAREZ, R.; BARRIOCANAL, C. Coal for metallurgical coke production: predictions of coke quality and future requirements for cokemaking. **International Journal of Coal Geology**, v. 50, p. 389-412, 2002.

ISO 7403/3 - International Standard: **Methods for the petrographic analysis of bituminous coal and anthracite - Part 3: Method of determining maceral group composition**. 2009.

ISO 7405/5 - International Standard: **Methods for the petrographic analysis of bituminous coal and anthracite - Part 5: Method of determining microscopically the reflectance of vitrinite**. 2009.

LOISON, R.; FOCH, P.; BOYER, A. **Coke: Quality and Production**. Paris: Butterworths, 1989.

MIYAZU, T.; OKUYAMA, Y.; FUKUYAMA, T.; SUZUKI, N. The evaluations and design of blends using many kinds of coal for coke making. **International Iron and Steel Congress**, Dusseldorf, 1974.

NAKAMURA, N.; TOGINO, Y.; TATEOKA, M. Behaviour of coke in large blast furnace. Coal, Coke and Blast Furnace. **The Metals Society, London**, p.1-18, 1977.

PRICE, J. T.; ILIFFE, M. J.; KHAN, M. A.; GRANSDEN J. F. Minerals in coal and high temperature properties of coke. **Ironmaking Conference Proceedings**, v.53, p.79-87, 1994.

SCHAPIRO, N.; GRAY, R. J.; EUNSER, G. R. Recent developments in coal petrography. **Blast Furnace, Coke Oven and Raw Materials Proceedings**, New York, v. 20, p. 89-112, 1961

SCHAPIRO, N.; GRAY, R. J. The use of coal petrography in cokemaking. **Journal of the Institute of Fuel**, v. 37, p. 234-242, 1964.