

COMPARAÇÃO ENTRE O MODELO DE BOND (WI) E HARDGROVE (HGI) NA MOAGEM DO CARVÃO: UMA BREVE REVISÃO

CARVALHO, F. A. G.¹, SANTOS, M. J. B.¹

¹ Universidade Federal do Oeste do Pará (UFOPA); Campus Juruti. E-mail:
frankalanojur@gmail.com

¹ Universidade Federal do Oeste do Pará (UFOPA); Campus Juruti. E-mail. E-mail:
michael.santos@ufopa.edu.br

RESUMO

O carvão mineral é um minério friável que no Brasil se apresenta em espécies distintas, sua petrogênese de formação é a partir do soterramento de matéria orgânica de composição variável, para uso seu beneficiamento é indispensável. Busca-se entender, através da moagem, suas características físicas e seu comportamento geomecânicas perante a cominuição. Deste modo, este trabalho consiste na análise comparativa dos índices de moabilidade, entre o índice de Hardgrove (HGI), que é historicamente o parâmetro usado para o esmagamento do carvão, e o índice de trabalho de Bond (WI), que estima o gasto total de energia na redução de minério. O presente trabalho compara estes índices fazendo a correlação e demonstram como são complementares. A metodologia consistiu na análise bibliográfica de produções científicas voltada à moagem do carvão e estes índices, comparando-os no âmbito de desempenho e resistência do carvão à moagem. Em síntese, o índice de Bond apresentou melhor eficiência tendo em vista que houve modificação de ajustena equação do WI. Por outro lado, o índice de HGI deve ser levado em consideração principalmente como estimativa comercial para resultados de moagem do carvão mineral e, por isso, tem grande relevância para a indústria. Portanto, os índices apresentam correlação direta.

Palavras-Chaves: Moagem carvão. Eficiência. Hardgrove. Bond.

ABSTRACT

Coal is a friable ore that in Brazil is presented in distinct species, its petrogenesis formation is from the burial of organic matter of variable composition, for use its processing is essential. One seeks to understand, through grinding, its physical characteristics and its geomechanical behavior before comminution. Thus, this work consists of a comparative analysis of grindability indices, between the Hardgrove index (HGI), which is historically the parameter used for coal crushing, and the Bond work index (WI), which estimates the total energy expenditure in ore reduction. The present work compares these indices making the correlation and demonstrate how they are complementary. The methodology consisted of a bibliographic analysis of scientific productions related to coal grinding and these indexes, comparing them in terms of performance and resistance of coal to grinding. In summary, the Bond index showed better efficiency in view of the modification of the WI equation. On the other hand, the HGI index should be taken into consideration mainly as a commercial estimate for coal milling results and, therefore, has great relevance for the industry. Therefore, the indices present a direct correlation.

Keywords: Coal grindability. Efficiency. Hardgrove. Bond.

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBI/UFOPA

- C331c Carvalho, Frank Alano Gomes de
Comparação entre o modelo de bond (wi) e hardgrove (hgi) na moagem do
carvão: uma breve revisão / Frank Alano Gomes de Carvalho – Juruti, 2022.
07 p. : il.
Inclui bibliografias.
- Orientador: Michael José Batista Santos
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Oeste do
Pará, Campus Universitário de Juruti, Bacharelado em Engenharia de Minas.
1. Moagem do carvão. 2. Eficiência. 3. Hardgrove e bond. I. Santos, Michael José
Batista, *orient.* II. Título.

CDD: 23 ed. 549.7



UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO
PARÁ CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE JURUTI
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA
DE MINAS

ATA DA DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

No dia 16 de dezembro de 2022, na sala/auditório 03, do Campus Universitário de Juruti, da Universidade Federal do Oeste do Pará, às 17:30 horas, reuniu-se a Banca Avaliadora de TCC composta pelo Orientador Prof. Msc. Michael Jose Batisrta dos Santos, Prof. Msc. Regis Quesada Casquet, Profª. Dra. Ana Cláudia Franca Gomes. A reunião teve por objetivo avaliar o trabalho de conclusão de curso de Bacharelado em Engenharia de Minas do discente **FRANK ALANO GOMES DE CARVALHO**, Matrícula: **201701499**, sob o título: **COMPARAÇÃO ENTRE O MODELO DE BOND (WI) E HARDGROVE (HGI) NA MOAGEM DO CARVÃO UMA BREVE REVISÃO**. O trabalho foi aberto pelo orientador. Cada examinador arguiu o(s) estudante(s), com tempos iguais de perguntas e respostas. Terminadas as arguições, procedeu-se o julgamento do trabalho, concluindo a Banca Avaliadora que o discente está (X) **APROVADO** () **REPROVADO**, com nota 9.7. Nada mais havendo a tratar, foi a presente ata lavrada, e que vai assinada pelo discente avaliado e pelos membros da Banca Examinadora.

Juruti, 16 de dezembro 2022.

gov.br

Documento assinado digitalmente
MICHAEL JOSE BATISTA DOS SANTOS
Data: 14/01/2023 06:46:28-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Msc. Michael Jose Batisrta dos Santos
(Orientador)

gov.br

Documento assinado digitalmente
REGIS QUESADA CASQUET
Data: 21/01/2023 04:35:33-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Msc. Regis Quesada Casquet
(Avaliador 1)

gov.br

Documento assinado digitalmente
ANA CLAUDIA FRANCA GOMES
Data: 16/01/2023 09:33:05-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Profª. Dra. Ana Cláudia Franca Gomes
(Avaliador 2)

1. INTRODUÇÃO

O Carvão mineral é um minério friável não metálico de fácil quebra, e é fonte de energia, combustível fóssil. O carvão Brasileiro apresenta alto teor de enxofre ou com matéria inorgânica, característico dos carvões “Gondwana”, os mais difíceis de serem beneficiados, necessitando passar, no mínimo, pelo processo de cominuição para a redução granulométrico e posterior “lavagem” do minério (Rúbio, 1988). Este trabalho avalia a cominuição do carvão mineral segundo os índices Hardgrove (HGI) e o índice de trabalho de Bond (WI).

O circuito de cominuição é o processo de fragmentação de minério com objetivo de obter granulometria adequada do material para as etapas de concentração. Desenvolver o melhor circuito de moagem para um determinado minério não é uma tarefa simples e, em muitos casos, gera discussões intermináveis. O tratamento de um mineral friável, busca como implemento de circuito, auxiliar na melhor performance no resultado do produto granulométrico, ou seja, geração de finos com baixo gasto energético. O termo usado na mineração para determinar quando o mineral é friável, adentra ao termo de matriz rochosa e tenacidade, bem como a escala de Mohr, usada para comparar o quanto um mineral é resistente ao risco. A Palavra friável na geologia determina um mineral e fácil quebra, ou ainda, o que se fragmenta, desagrega com facilidade. As inúmeras mudanças no modo de tratar o minério nas últimas décadas, sobretudo, pela complexidade que ele é encontrado, tem buscado cada vez mais a implementação de pesquisa, para solucionar problemas inerente a cada espécie mineralógica encontrada, para o aprimoramento de novos métodos que sejam empregados na mineração de tratamento de minérios. Entender o processo de moagem e liberação de particulados, propicia o conhecimento do desempenho das operações de fragmentação de minérios, bem como, a diminuição dos tamanhos, analisando as variáveis que possam interferir nesse evento no sentido de melhorar as técnicas ou criar novas metodologias no desenvolvimento dessas operações para atenuar erros.

O índice de moabilidade de Hardgrove (HGI), é um índice que serve para avaliar o quanto o carvão resiste ao esmagamento por fragmentação, visando analisar o desempenho na moagem para o dimensionamento de moinhos com eficiência de força e rendimento.

Segundo Chaves e Peres (1999), “Comparado com outros minerais, o carvão tem um comportamento muito peculiar a cominuição”. Esse comportamento é causado por vários fatores listados a seguir. O carvão mineral é um tipo de material heterogêneo. Além disso às suas várias litofácies chamadas de macerais - cada uma tem um comportamento mecânico único com características de coque - contém minerais que podem ser separados de substâncias carbonosa que também podem estar relacionados ao mineral.

No primeiro caso, a matéria mineral vai ter o seu comportamento mecânico próprio; no segundo, ela vai alterar o comportamento do maceral ao qual estiver associada. O carvão mineral possui característica com traços porosos, trincas, interfaces e capilaridade. Cada propriedade destacada possui um ponto de fraqueza. A lei de Bond estabelece o princípio de que o ponto mais fraco de um minério é quem determina a sua resistência mecânica. O carvão é muito descontínuo, fator que governa as propriedades da capacidade de resistência do carvão a cominuição. Todas essas imperfeições do carvão são características intrínsecas, que influenciam o carvão a ser considerado um mineral pré-fraturado. Este minério possui outra singularidade, que é a umidade do mineral, teor de água contido nos poros e capilares, muitas vezes maior que o usual em outros minerais. A umidade interna desse mineral determina por

exemplo a plasticidade elástica do carvão, ou seja, a água presente nas trincas acarreta na reposição das superfícies das trincas mantendo juntas, mesmo com a tensão superficial.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia do presente trabalho se deu a partir de pesquisas de natureza bibliográfica das mais variadas produções científicas, artigos, teses e monografias, buscando compreender e comparar os índices de Hardgrove e índice de trabalho de Bond WI na moagem do carvão mineral.

O objetivo da pesquisa direcionou a escolha de trabalhos qualitativos, ajudando a caracterizar as comparações e na contextualização do tema, bem como, a abordagem dos fatores de influência do resultado. O presente estudo tem como objetivo a comparação da eficiência dos índices de moabilidade do carvão mineral, com os respectivos índice de Hardgrove e work index, visando entender os fatores que influencia na performance final, bem como a proposta de estimar o desempenho da moagem do minério, sendo, caracterizando o índice de trabalho e gasto de energia. O levantamento de trabalhos feitos, no sentido de catalogar e analisar pesquisas voltadas na área de tratamento mineral, obteve resultado relevante ao melhoramento do desempenho de moagem para a indústria. Por conseguinte, esse estudo apresenta quanto procedimento de revisão bibliográfica, o propósito de obter informações intrínsecas sobre os aspectos e características inerente ao índice de fragmentação do carvão mineral. Este método organiza como instrumento baseado na comparação teórica com a apresentação de infográficos acerca de resultados expostos em estudos previamente realizados com carvão de composições variáveis.

No que concerne a comparação entre os trabalhos, realizou-se a coleta dos dados referente a cada produção e método, considerando título, autores, ano, metodologia utilizada, resultado e conclusão, com a finalidade de extrair com rigor as propriedades identificadas nos resultados. Finalizando com a compreensão e interpretação, enumerando a discussão das informações obtidas nos respectivos trabalho.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para fazer a relação comparativa entre trabalhos realizados com o índice de HGI, e Bond, é preciso identificar alguns fatores resultante desse processo, a distribuição de granulométrica a composição do material. Segundo Garcia 2002, o teste para a determinação do índice de Hardgrove é realizado com a alimentação em moinhos, onde o percentual de finos é separado em peneira quadrada equivalente a 200 mesh Tyler de abertura, e o percentual em massa passante D80 é utilizado para calcular o índice HGI, que é estimado empiricamente através da expressão matemática na Equação 1, que representa o índice de HGI, com a determinação da massa passante em D (mesh). A Equação 1 calcula o Índice de Moabilidade do Material de Hardgrove (HGI) do material, segundo Garcia (2002):

$$\text{HGI} = 13 + 6,93. (\text{Massa passante em 200 mesh}) \quad (1)$$

A conversão do índice de HGI, para o índice de moabilidade de Bond, WI é dada pela equação de Smith, a qual foi apresentada por Hochdahl (1982) ilustrando a correlação WI-HGI, dada pela Equação 2:

$$WI = \frac{435}{HGI^{0,91}}, \text{ em kwh/t} \quad (2)$$

Essa correlação é somente indicativa e o seu uso não exclui a necessidade de realizar os testes em laboratório para determinar o W.I, que serve de importante parâmetro para dimensionar moinhos de bolas.

Deste modo, a análise do trabalho de desenvolvimento de metodologia de avaliação da moagem baseada na lei de Bond modificada na Samarco mineração, de ANDRADE, Alexandre; MENEZES, Renato; ATHAYDE, Maycon (2014). Obtiveram os resultados a partir da amostra de 2kg de carvão processada no moinho horizontal de bolas, a ser observados a seguir;

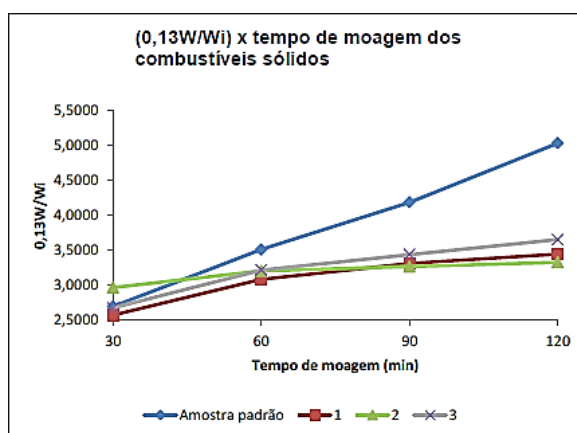


Figura 1 - Relação tempo de moagem padrão com em relação teste amostra 1, 2 e 3 ANDRADE et. al. (2014).

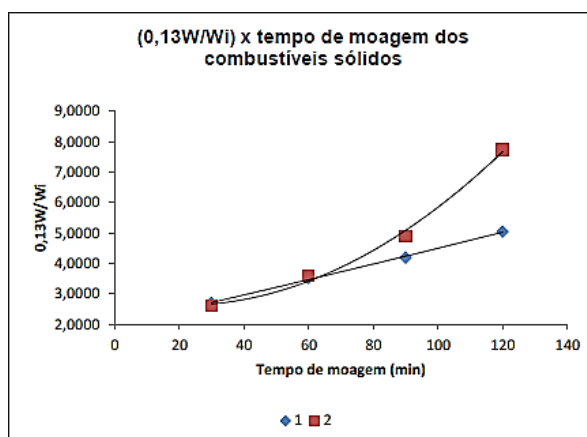


Figura 2- Curva granulométrica de duas amostras no mesmo teste. ANDRADE et. al. (2014).

O gráfico na Fig. 2 que mostra as 2 amostra na moagem, apresentaram um gasto de tempo maior no índice de HGI, já em relação ao padrão da Fig. 1, o gasto energético foi maior, ou seja, o carvão nessas conduções teve maior resistência a quebra.

Por conseguinte, o estudo da análise do processo de cominuição para combustão do carvão mineral de Candiota, de GRZECA, Mauricio (2018), que teve com um dos objetivos mensurar a eficiência no processo de moagem do carvão, seguiu a partir da coleta de 200 gramas do carvão pulverizado, quarteado em 4 amostras de 50 gramas cada, no qual, durante o processo de desenvolvimento dos teste, foram realizado ajuste nos classificadores.

Obteve a partir da análise do gráfico da Fig. 3, os valores médios de tamanho do carvão. Cada linha alerta representa uma configuração de ajuste, além da linha considerada como padrão. A linha padrão corresponde a uma distribuição granulométrica tal que 75% das partículas sejam passantes na peneira de 200 mesh Tyler. Como a peneira mais restritiva disponível corresponde a 170 mesh Tyler, esta foi aceita em substituição à peneira de 200 mesh Tyler.

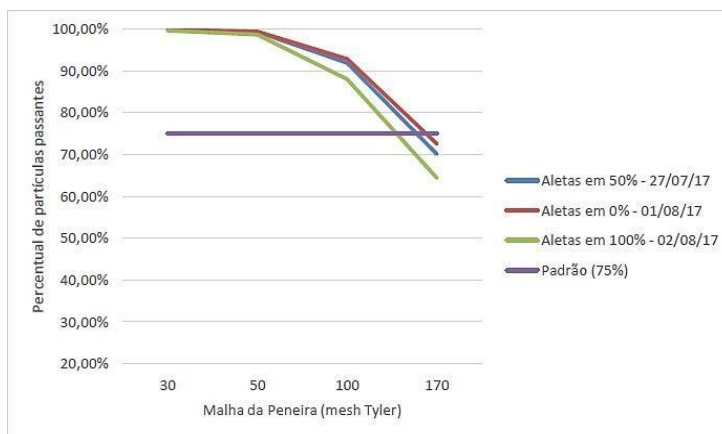


Figura 3- Gráfico de tamanho de partícula após ajuste de classificador. FONTE: GRZECA, Mauricio (2018).

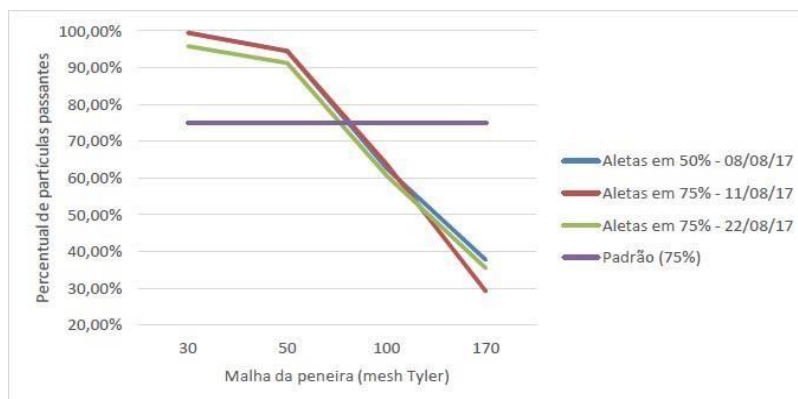


Figura 4- Gráfico variação granulométrica carvão. FONTE: GRZECA, Mauricio (2018).

Neste estudo, as curvas indicadas em alertas na Fig.4, o carvão de Candiota apresentou elevado teor de cinzas, resultando em um Índice de HGI equivalente a 103, um valor elevado se comparado a outros carvões, que apresenta valor médio de 56. Este índice significa que o carvão apresenta uma moabilidade melhor, apesar de ser caracterizado como de qualidade inferior ou muito inferior. Neste estudo, o carvão apresenta um *work index* (WI) entre 6,40 e 7,03 kWh/t, de acordo com cálculos baseados em estudos realizados por Bond, nestas condições a resistência a moagem teve bom desempenho, mas o gasto de energia foi elevado.

O índice de Bond WI, até tempo atrás não se aplicava aos carvões minerais, pois, a resultante dos testes e ensaios não correspondia as variáveis do minério é sobre tudo ao consumo específico de energia na moagem do carvão. Com tudo, desde 1935, pouco mais de duas décadas antes do índice de Bond, já havia um teste padronizado para o carvão, que de tão importante foi aceito como norma ASTM, e com a escalada da busca do melhor método resultando de moagem em 1951, a norma (ASTM D 409-51) se tornou melhor parâmetro para

a moabilidade de carvão, voltado para entender as condições físicas e mecânica da resistência a moagem. Bond em 1956, após obter dados de um ensaio do *Work Index* WI, correlacionou o resultado do teste ao índice de Moabilidade de Hardgrove HGI.

O índice de Hardgrove HGI, determina a proporção granulométrica de finos gerado nos testes padrão de moagem, feito no moinho pendular. Quando maior o índice mais fácil é a quebra do mineral sendo assim, mais friável, quanto menor o índice, mais duro é o carvão, maior resistência a quebra. No entanto, este índice apresenta uma variância quando ao rank, encontrado em alta na composição do carvão betuminoso, mas o índice vai caindo a partir do carvão antracito.

Para Chaves e Peres (1999), é possível fazer uma boa revisão dos equipamentos de cominuição de carvão com equiparados métodos. Destacando apenas pelos aspectos mais relevantes. Os britadores são especiais e tiram partido da fragilidade do carvão. O britador primário padrão é o britador Bradford, que é um britador autógeno. A britagem seguinte é usualmente feita em britadores de impacto, que têm relação de redução maior que os britadores de mandíbulas ou da família dos giratórios, e por isso, permitem o uso de apenas um estágio adicional. A moagem é feita em moinhos pendulares, muitas vezes com secagem dentro do próprio moinho. Isso potencializa a geração de finos no índice de Hardgrove, por isso ainda é usado na mineração do carvão.

O enfoque nos índices de moabilidade normalmente são caracterizados entendendo as propriedades e composição dos carvões isso facilita seu entendimento sobre a variação de resultado entre eles, seja para o uso em siderurgia, metalurgia ou em usina de tratamento.

4. CONCLUSÃO

Devido à ampla discussão para selecionar o melhor método de avaliação de performance da operação de moagem foi analisado os dois métodos mais conhecidos, Work Index de Bond e Índice de Hardgrove, sobre suas aplicações frente ao carvão mineral. Na chamada “Lei de Bond” o objetivo é estimar a energia necessária para fragmentar determinado minério, seus parâmetros principais são os tamanhos das partículas na alimentação, tempo processando da moagem e composição química do material que sofre a moagem.

Por sua vez, o índice de Hardgrove é essencial para estimar quanto é possível ganhar pela venda do carvão e, conseqüentemente, o preço de mercado do carvão mineral. Além de que este índice também ser aplicado pela indústria metalúrgica, por exemplo, para estimar a quantidade de carvão mineral que será utilizada como insumo, seus parâmetros de maior relevância para esta quantificação são os Índice de reatividade do coque (CRI) e de resistência do coque a reação (CSR).

Portanto, a moabilidade é avaliado por meio de óticas distintas ao comparar as metodologias desenvolvidas por Hardgrove e Bond. Enquanto o Índice de Hardgrove utiliza a moagem para avaliar a relação entre a curva granulométrica das partículas mediante um determinado gasto energético em função do tempo de moagem, O Work Index de Bond se preocupa em prever o percentual de partícula que ficou acima do D80 por vários dias, após ajuste do classificador, avaliando o custo energético e eficiência da operação de moagem e, por isto possui uma aplicabilidade maior que vai além do uso para carvão mineral, utilizado igualmente para minérios que possuem maior resistência geomecânica.

Comparando o carvão mineral sobre os índices HGI e WI, ambos avaliarem a moabilidade e, por isso, são muitas vezes colocados como substitutos, é verdade que os índices apresentam uma correlação de valores quando analisado os mesmos parâmetros de equipamento e composição do material. Contudo, os estudos de Hardgrove e Bond devem ser estudados de forma complementar. O índice de HGI é imprescindível e de suma relevância para obter um parâmetro ponderado da moagem do carvão mineral, o qual deve ser levado em consideração principalmente como parâmetro da avaliação comercial da moagem em carvão.

5. REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 11376. Moinho de bolas - Determinação do Índice de Trabalho. Rio de Janeiro, 1990.

Acarp - The Australian coal industry's research program. Hardgrove Grindability Index. 2008; 2-3.

ANDRADE, A.G; MENEZES, R.L.A; ATHAYDE, M. Desenvolvimento De Metodologia De Avaliação Da Moagem Baseada Na Lei De Bond Modificada Na Samarco Mineração. Belo Horizonte, MG, Brasil (2014).

ASTM D409 / D409M-16, Standard Test Method for Grindability of Coal by the Hardgrove-Machine Method, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.

BOND, F.C. Crushing and grinding calculations. British Chemical Engineering, Jan.1961.

BURSTLEIN, E. La preparation selective er petrographique des charbons en vue de leur cokegaction. Chaleur et industrie, n.353, p.351 (1954).

CHAVES, A.P. Britagem e Moagem de carvão. In: Curso da ABM; São Paulo,2002.

CHAVES, A.P.; PERES, E.C. Teoria e prática do tratamento de minérios. São Paulo,1999.

COSTA, S.L. Aplicações da petrografia de carvões. Centro de pesquisa USIMINAS. Ipatinga,1976.

FIGUEIRA, H. V. O.; Almeida, S. L. M. e Luz, A. B. Cominuição. In: Luz, A. B., Sampaio, J. A. e Almeida, S. L. M. (Ed.). Tratamento de Minérios. 4a ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004, p.113-182.

GARCIA, Roberto. Combustíveis e combustão industrial. Ed. Interciência. Rio de Janeiro, 2002.

GRZECA, Mauricio ANÁLISE DO PROCESSO DE COMINUIÇÃO PARA COMBUSTÃO DO CARVÃO MINERAL DE CANDIOTA / Mauricio Grzeca. 80 p. 2018.

HOCHDAHL, O. Process Engineering Criteria for Coal Preparation in the Cement Works. ZKG. 1982.

RÚBIO, J. Carvão Mineral: caracterização e beneficiamento. Vol. 1. Nova Linha artes gráficas. Porto Alegre, 1988.

SCHNEIDER, W.A, BRINCKMANN, A.F, CASTANHO, S.O. Carvão mineral do Rio Grande do Sul. VII simpósio Brasileiro de Mineração. 17p. 1977.

Ulhôa, M.B. Modelos de Previsão de Resistência do Coque. In: ULHÔA, Murilo B. Carvão Aplicado à Fabricação de Coque de Alto-Forno. São Paulo: ABM, 2003.