

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE MINAS GERAIS - CAMPUS OURO BRANCO
BACHARELADO EM ENGENHARIA METALÚRGICA

**AVALIAÇÃO DE LIGANTES PARA FORMULAÇÃO DE BRIQUETES DE FINOS
DE CARVÃO MINERAL**

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Liziero Ruggio da Silva

Aluno: José Geraldo de Souza

OURO BRANCO

2026

José Geraldo de Souza

AVALIAÇÃO DE LIGANTES PARA FORMULAÇÃO DE BRIQUETES DE FINOS DE CARVÃO MINERAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Bacharelado em Engenharia Metalúrgica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais - Campus Ouro Branco para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Liziero Ruggio da Silva

OURO BRANCO

2026

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por estar sempre comigo, me abençoando, protegendo a cada dia, me proporcionando grandes momentos e oportunidades, além de me dar forças para seguir sempre em frente.

Agradeço aos meus pais, Francisco Wenceslau de Souza e Maria Evangelista da Silva, que já falecidos e sem a devida oportunidade de estudar, sempre incentivaram a mim e meus irmãos a estudar. Obrigado por sempre acreditarem que seríamos capazes.

Agradeço muito à minha esposa, pelos ótimos anos de convivência, pela compreensão, paciência e apoio desenvolvimento deste trabalho e de tantos outros decorrentes desta graduação.

Aos meus amigos, por terem me apoiado durante esse trabalho e me darem o incentivo de cada dia, por ter me auxiliado com os ensaios para desenvolver este trabalho.

E ao meu orientador, Professor Guilherme Liziero, por ter acreditado em mim e ter me acompanhado nessa jornada, me auxiliando e compartilhando comigo os seus conhecimentos, juntamente aos outros professores e funcionários do IFMG Campus Ouro Branco, minha gratidão por tudo.

Resumo

Os estudos mais recentes para a recuperação de finos de carvão mineral para utilização na indústria mostram que alternativas são viáveis e mais baratas para processar os finos de carvão mineral e utilizá-los no Brasil. Em países como Estados Unidos, Japão, e a Comunidade Econômica Europeia, já utilizam a briquetagem de finos de carvão mineral há muito tempo, uma vez que esse carvão não é renovável e sua extração gera um grande percentual de finos. Assim os briquetes de carvões mais pobres, apesar de baixo poder calorífico, ao longo do tempo são usados como combustível em instalações industriais, empresas de pequeno porte e residências, proporcionando resultados satisfatórios. Dentre os processos de aglomeração de finos, a briquetagem e a pelotização são os mais utilizados para obtenção de um produto com melhores características de comercialização. Ligantes variados, para produção de briquetes de finos de carvão mineral, foram e ainda são testados na busca de um melhor custo benefício. Isso se deve ao fato que nem todo tipo de ligante possa ser utilizado para queima em residências ou pontos comerciais devido aos riscos de intoxicação ou contaminação durante sua queima juntamente com o fino de carvão. Os finos da mistura de carvões utilizada para coqueria da *Gerdau Ouro Branco* foram utilizados para testes de briquetes com alguns aglomerantes, entre eles: melaço de cana e silicato de sódio, ambos testados com teores de 5 e 7% respectivamente, e 5% de umidade em todas as misturas. Para obtenção um briquete com melhor composição, testada e adequada, com melhor qualidade quanto aos testes de compactação, resistência à queda e absorção de água, Os testes de briquetes de finos de carvão mineral tem o objetivo tornar-se alternativa de adensamento de finos para aumento de carga nos fornos de coqueificação.

ABSTRACT

Recent studies on the recovery of coal fines for industrial use show that viable and cheaper alternatives exist for processing and utilizing coal fines in Brazil. Countries like the United States, Japan, and the European Economic Community have long used briquetting of coal fines, as coal is non-renewable and its extraction generates a large percentage of fines. Thus, briquettes made from lower-grade coals, despite their low calorific value, are used over time as fuel in industrial facilities, small businesses, and homes, providing satisfactory results. Among the processes for agglomerating fines, briquetting and pelletizing are the most widely used to obtain a product with better marketability. Various binders for the production of coal fine briquettes have been and continue to be tested in the search for a better cost-benefit ratio. This is due to the fact that not all types of binder can be used for combustion in homes or commercial establishments because of the risks of poisoning or contamination during combustion along with fine coal. The fine coal mixture used for coking at Gerdau Ouro Branco was used to test briquettes with several binders, including: sugarcane molasses and sodium silicate, both tested with contents of 5% and 7% respectively, and 5% moisture in all mixtures. To obtain a briquette with a better composition, tested and suitable, with better quality in terms of compaction, drop resistance and water absorption tests, the tests of briquettes made from fine coal aim to become an alternative for densifying fines to increase the load in coking ovens.

Keywords: Coal, briquette, fuel

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Matriz Energética Mundial.....	09
Figura 2 – Matriz Energética Brasileira.....	10
Figura 3 – Panorama da Matriz Energética Mundial e Brasileira.....	11
Figura 4 – Carvão Mineral.....	15
Figura 5 – Origem e Processo de Formação do Carvão Mineral.....	17
Figura 6 – Carbonificação.....	18
Figura 7 – <i>Rank</i> do Carvão Mineral.....	19
Figura 8 – Cadeia produtiva do carvão mineral.....	20
Figura 9 – Maiores reservas, Produção e Consumo de Carvão.....	22
Figura 10 – Fábrica de Coque do <i>Sarre</i>	23
Figura 11 – Usina de Coque Central do <i>Sarre</i>	23
Figura 12 – Decomposição Química do Carvão Mineral.....	24
Figura 13 – Carvão Vegetal.....	25
Figura 14 – Briquete de Carvão Mineral.....	26
Figura 15 – Forma de Aglomeração do Carvão de partículas com aplicação de pressão.....	29
Figura 16 – Fluxograma da Utilização Parcial de Briquetes na Mistura de Carvão para a Produção de Coque.....	30
Figura 18 – Forma de Aglomeração do Carvão de partículas com aplicação de pressão.....	30
Figura 17 – Mercado Global de Briquetes de Carvão por Região.....	31
Figura 18 – Melaço em Pó e Líquido.....	35
Figura 19 – Melaço na Siderurgia.....	35
Figura 20 – Silicato de Sódio.....	36
Figura 21 – Fluxograma Etapas de Produção de Silicato de Sódio.....	37
Figura 22 – Fluxograma de Ensaio para Caracterização de Briquetes.....	39
Figura 23 – Relatório de Ensaio de Compressão.....	42
Figura 24 – Estufa.....	43
Figura 25 – Estação de Peneiramento.....	43

Figura 26 – Batedeira.....	44
Figura 27 – Molde para Corpo de Prova.....	44
Figura 28 – Pesagem de Amostra.....	45
Figura 29 – Preenchimento do Molde para Testes.....	45
Figura 30 – Molde Pronto para Prensagem.....	45
Figura 31 – Molde na Prensa Manual.....	45
Figura 32 – Pressão da Amostra.....	46
Figura 33 – Amostra Retirada do Molde.....	46
Figura 34 – Processo de Prensagem de amostras.....	46
Figura 35 – Máquina de Teste de Tração e Compressão.....	48
Figura 36 – Gráfico de Tensão de Ruptura Média.....	53
Figura 37 – Gráfico Anova de Tensão de Ruptura entre os Ligantes.....	54
Figura 38 – Teste de absorção de Água 30 minutos - Silicato.....	56
Figura 39 – Teste Após Secagem a 100°C.....	56
Figura 40 – Teste de absorção de Água 30 minutos - Melaço.....	57
Figura 41 – Teste de Queda.....	58
Figura 42 – Composição Granulométrica Após Teste de Queda	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição Química dos Combustíveis Fósseis Sólidos	19
Tabela 2 - Produção de Carvão Mineral até 2020.....	21
Tabela 3 - Estratificação do Custo de Produção do Ferro Gusa da ArcelorMittal Tubarão.....	25
Tabela 4 - Propriedades dos Materiais para Briquetes.....	32
Tabela 5 - Mercado de Briquetes de Carvão.....	34
Tabela 6 - Especificações Técnicas do Melaço.....	38
Tabela 7 - Composição Granulométrica do agregado miúdo.....	44
Tabela 8 - Força(N), Tensão de Ruptura(Mpa) 5% Umidade 5% de Silicato de Sódio de 3 dias.....	49
Tabela 9 - Força(N), Tensão de Ruptura(Mpa) 5% Umidade 5% de Silicato de Sódio de 20 dias.....	49
Tabela 10 - Força(N), Tensão de Ruptura(Mpa) 5% Umidade 7% de Silicato de Sódio de 3 dias.....	50
Tabela 11 - Força(N), Tensão de Ruptura(Mpa) 5% Umidade 7% de Silicato de Sódio de 20 dias.....	50
Tabela 12 - Força(N), Tensão de Ruptura(Mpa) 5% Umidade 5% de Melaço de Cana de 3 dias.....	51
Tabela 13 - Força(N), Tensão de Ruptura(Mpa) 5% Umidade 5% de Melaço de cana de 20 dias.....	51
Tabela 14 - Força(N), Tensão de Ruptura(Mpa) 5% Umidade 7% de Melaço de cana de 3 dias.....	52
Tabela 15 - Força(N), Tensão de Ruptura(Mpa) 5% Umidade 7% de Melaço de cana de 20 dias.....	53

SUMÁRIO

1.0	INTRODUÇÃO.....	09
2.0	OBJETIVOS.....	14
2.1	Objetivo Geral	14
2.2	Objetivos Específicos	14
3.0	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
3.1	Carvão.....	15
3.1.1	Carvão Mineral: Origem e Formação.....	15
3.1.2	Coqueria.....	22
3.1.3	Carvão Vegetal.....	25
3.2	Briquete.....	28
3.2.1	Briquete Composto.....	28
3.2.2	Briquete de Carvão	28
3.3	Ligantes ou Aglutinantes.....	33
3.3.1	Melaço	35
3.3.2	Silicato de Sódio.....	36
4.0	MATERIAIS E MÉTODOS.....	39
	Fluxograma de Testes.....	39
4.1	Materiais.....	40
4.2	Métodos.....	40
4.2.1	Elaboração da Base de Dados.....	40
4.2.2	Caracterização dos Ligantes.....	41
4.2.3	Elaboração das Misturas para Briquetes.....	41
5.0	Resultados da discussão.....	42
5.1	Caracterização dos Briquetes para a Coqueria.....	43
5.2	Teste de Resistência à Compressão.....	43
5.2.1	Tabelas de Força (N) e Tensão de Ruptura de Briquetes(Mpa).....	49
5.3	Teste de Absorção de Água.....	55
5.4	Teste de Queda de Briquetes.....	57
6.0	CONCLUSÕES.....	60
7.0	Sugestões de Trabalhos Futuros.....	61
	REFERÊNCIAS.....	61

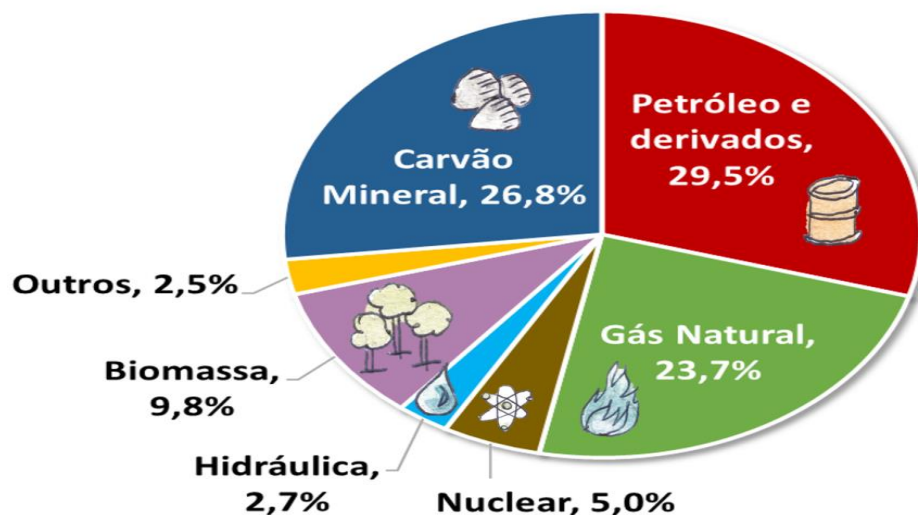
1. INTRODUÇÃO

A preocupação ambiental mundial, resultado de ações dos governos após as conferências ambientais, tornando a legislação mais rígida, faz cada vez mais as empresas se preocuparem com o aproveitamento de forma econômica de resíduos gerados em seus processos de beneficiamento ou produtivo.

Uma vez que a matriz energética mundial mostra que muitos recursos não são renováveis e sua exploração, mesmo com novas tecnologias, torna-se cada vez mais onerosa, faz-se então o desenvolvimento de técnicas que promovam o reaproveitamento de seus resíduos, a fim de minimizar o descarte na natureza, com menor passivo ambiental.

A Figura 1, de acordo com o relatório da Empresa de Pesquisa Energética(EPE), mostra a matriz energética mundial que é composta, principalmente, por fontes não renováveis, como o carvão mineral, petróleo e gás natural.

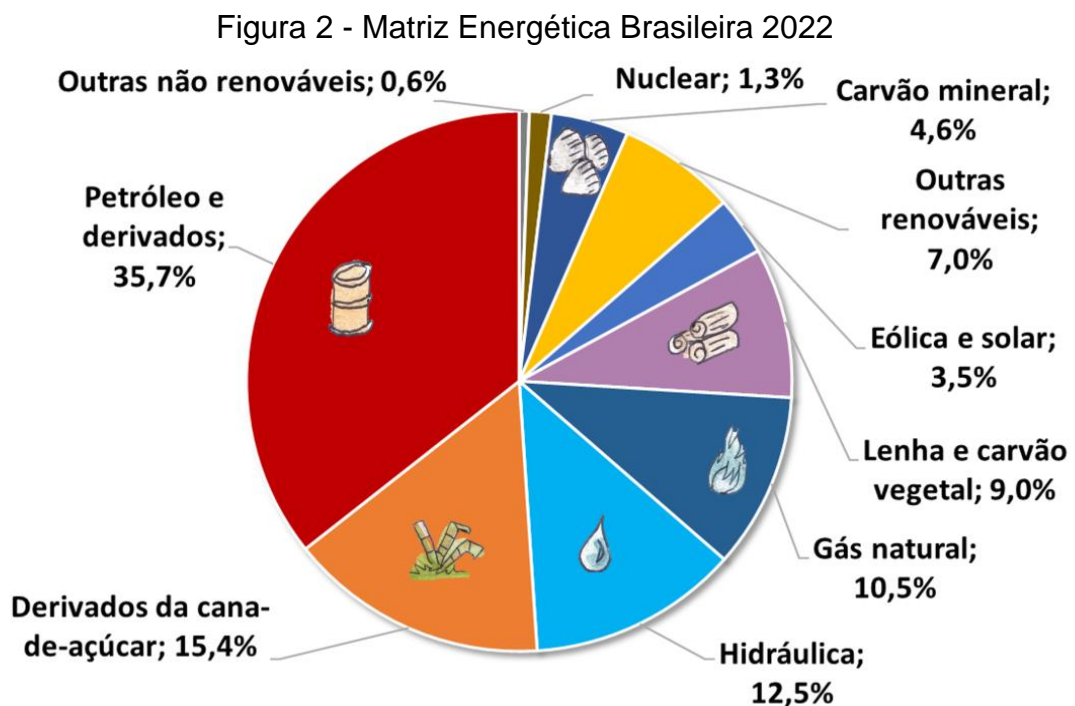
Figura 1- Matriz Energética Mundial 2020



Fonte: (IEA, 2022;)

As energias renováveis como solar, eólica e geotérmica, por exemplo, juntas correspondem a apenas 2,5% da matriz energética mundial, assinaladas como “Outros” no gráfico. Somando à participação da energia hidráulica e da biomassa, as renováveis totalizam aproximadamente 15%.

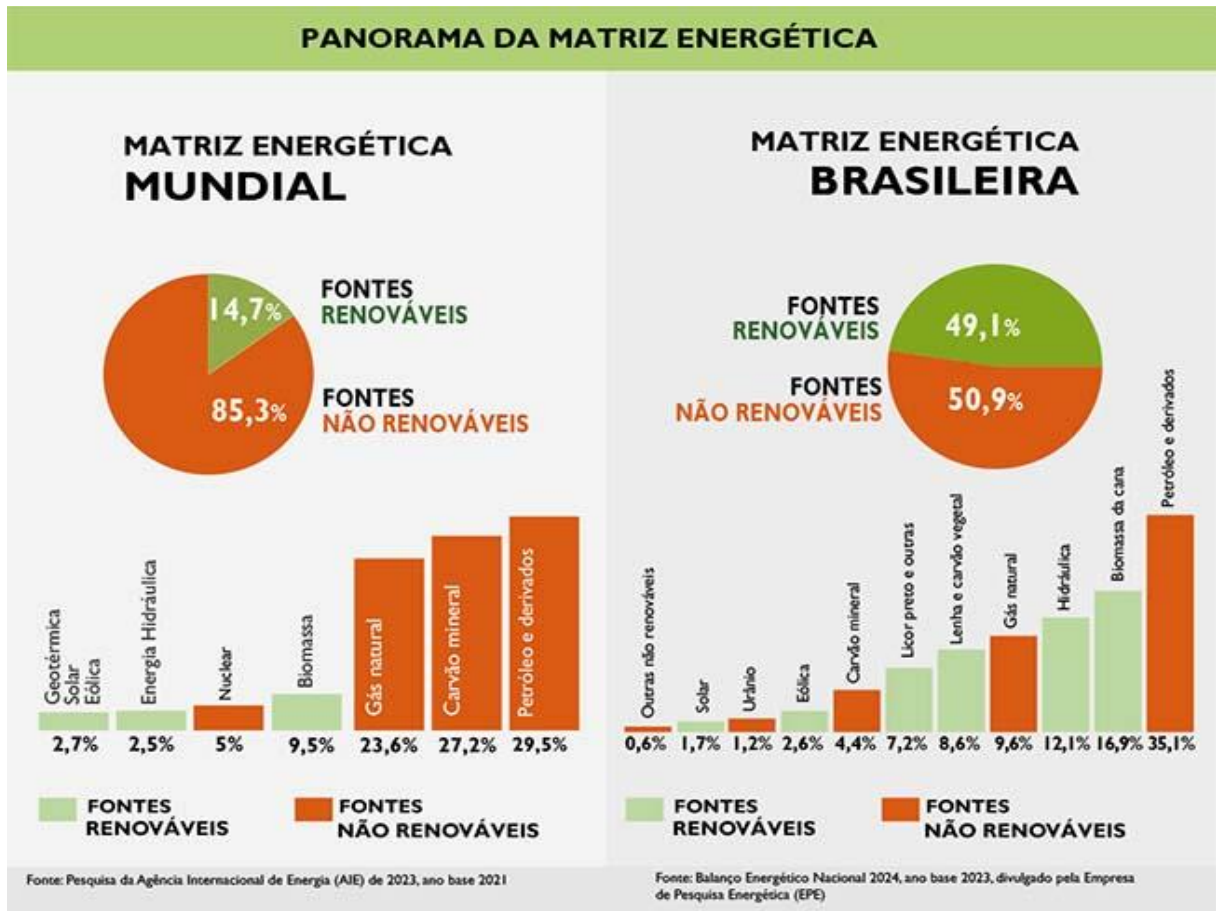
O Brasil, como nos mostra a Figura 2, possui matriz energética muito diferente da mundial, com energias renováveis, somando lenha e carvão vegetal, hidráulica, derivados de cana, energias eólica e juntamente com outras energias renováveis, que totalizam 47,4%, quase metade da matriz energética Brasileira.



Fonte:(BEN, 2023)

O comparativo do consumo de energia de fontes renováveis e não renováveis da matriz energética brasileira permite constatar uma grande diferença com o restante do mundo, conforme a Figura 3. O Panorama comparativo das Matrizes Energéticas Mundial e Brasileira torna-se muito importante, pois fontes não renováveis de energia são responsáveis por grande parte da emissão dos gases de efeito estufa (GEE), de acordo com as fontes da Agência Internacional de Energia (AIE) e do Balanço Energético Nacional 2024(EPE).

Figura 3 - Panorama da Matriz Energética



O Brasil utiliza mais energia de fontes renováveis que outros países e quando divide a emissão de gases de efeito estufa pelo número de habitantes, emite menos GEE por habitante que a maioria dos outros países.

A discussão sobre formas alternativas de energia é de grande importância para o cenário energético atual. O Brasil e o mundo estão em processo acelerado de urbanização, o que ocasiona maior demanda e uso de energia.

Para otimização dos processos de produção, devido a competitividade do mercado, as empresas estão a aproveitar partículas finas, o que anteriormente era considerado resíduo. Mesmo com a necessidade de investimento em pesquisa e equipamentos de tecnologia para aproveitamento de materiais de granulometria fina, o retorno financeiro e ambiental torna a atividade sustentável e com boa rentabilidade.

Quanto a produção de briquetes, as vantagens e desvantagens são:

- Vantagens: A utilização de energia renovável está intimamente relacionada ao bem-estar ambiental, econômico e social, quanto maior for a adesão a utilização de energias renováveis, maior será a preservação de recursos naturais, com a redução dos impactos ambientais, e redução de custos a longo prazo.
- Desvantagens: O Brasil ainda depende de combustíveis fósseis para a geração de energia, para automóveis e outros setores industriais, requerendo grande investimento tecnológico para adequação de transportes, por exemplo, as fontes de energias renováveis apresentarem limitações.

Uma etapa a ser observada é o aproveitamento de partículas finas para a tecnologia de aglomeração. Elas são oriundas de processo de beneficiamento ou mesmo resíduos gerados pelo transporte de matérias-primas (CARVALHO e BRINCK, 2004)

De acordo com os estudos realizados pelos engenheiros Eduardo Augusto de Carvalho e Valter Brinck, do Centro de Tecnologia Mineral do Ministério da Ciência e Tecnologia e Inovações, elaborados para o Livro “Tratamento de Minérios” de 2004, a aglomeração mineral se fez presente a partir de que o homem percebeu que, se conseguisse concentrar finos de minérios para aglomerar, teria grande capacidade de recuperar materiais e minérios antes descartados por ter processos caros de separação de concentração. Empregada em operações com materiais de fina granulometria, transformando em corpos coesos por mecanismos físicos ou químicos e conferindo a estes tamanhos e formas para uso posterior.

A briquetagem no Brasil de acordo com informações do livro “Tratamento de Minérios” do CETEM de 2004, iniciou na década de 1960, com destaque para a Companhia Siderúrgica Belgo Mineira, em João Monlevade - MG, que instalou um equipamento alemão para briquetagem de finos de carvão vegetal utilizando prensa da empresa alemã *Humboldt*. Em 1965, a Companhia Brasileira de Briquetes, em Mateus Leme - MG, passou a prestar serviços de briquetagem, utilizando tecnologia japonesa voltada ao uso doméstico e siderúrgico.

Já em 1974, a Carvel Produtos Siderúrgicos, em Contagem - MG, ampliou o setor ao fabricar equipamentos e processar diferentes materiais, como o carbonato de sódio empregado na dessulfuração do gusa. Em 1994, a Companhia Siderúrgica

de Tubarão, atualmente ArcelorMittal Tubarão, iniciou projetos experimentais para reaproveitamento de resíduos siderúrgicos, como lama de aciaria, alcançando atualmente capacidade de produção de 20 mil toneladas mensais de briquetes.

A briquetagem tornou-se estratégica para o setor siderúrgico ao possibilitar redução de custos e reaproveitamento de resíduos, especialmente diante do alto impacto do carvão mineral, que representa entre 30% e 40% do custo do aço. Nesse contexto, o desenvolvimento de matérias-primas alternativas e o aprimoramento das misturas de carvão são fundamentais para a produção de coque de qualidade a custos competitivos.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Identificar os ligantes mais adequados para utilizar em briquetes de finos de carvão mineral para a coqueria na indústria siderúrgica.

2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar física e metalurgicamente ligantes para testes de briquetes produzidos a partir de finos de carvão mineral.
- Avaliar de dois tipos de ligantes e verificar o desempenho das propriedades físico-metalúrgicas para produção de briquetes.
- Determinar quantitativamente as composições ideais para briquetes.
- Avaliar a qualidade tecnológica de briquetes de finos de carvão com testes de resistência, com diferentes tipos de ligantes em sua composição.

3.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Carvão

3.1.1 Carvão Mineral: Origem e Formação

O carvão mineral (Fig. 4), definido como combustível fóssil sólido é uma rocha sedimentar, formada durante milhões de anos pela decomposição de matérias orgânicas em bacias sedimentares, que por ação de pressão e temperatura em ambiente sem contato com o ar, em decorrência de soterramento e atividade orogênica, os restos vegetais ao longo do tempo geológico se solidificam, perdem oxigênio e hidrogênio e se enriquecem em carbono, em um processo denominado carbonificação, pode ser extraído pelo processo de mineração.

O processo de carbonificação passa por diferentes estágios, como o soterramento de matéria orgânica por camadas de argila e areia, provocando o aumento da pressão e da temperatura, contribuindo para a perda de hidrogênio e oxigênio provocando uma maior concentração de carbono.

Figura 4 - Carvão Mineral



Fonte: Companhia Riograndense de Mineração - crm.rs.gov.br

No Brasil, devido ao alto teor cinza e enxofre os carvões minerais nacionais são menos utilizados. Essa matéria prima é então importada de diversos países, tornando a produção do coque de alto custo. Assim o carvão mineral é responsável

por uma parcela altamente significativa dos custos de produção do aço, cerca de 30 a 40% do total, refletindo na competitividade do aço nacional (SILVA, 2016).

O tipo de carvão é determinado a partir das variações dos constituintes da matéria orgânica (raízes, caules, folhas, entre outros) que determinam o tipo de carvão, devido a suas concentrações que foram expostos a carbonificação. O carvão, de acordo com sua formação, como a Figura 5, pode ser classificado de acordo com sua concentração de carbono. Quanto maior o teor de carbono, maior seu nível de pureza e potencial energético.

O carvão mineral é uma mistura de hidrocarbonetos formada pela decomposição de matéria orgânica durante milhões de anos, sob determinadas condições de temperatura e pressão. De acordo com o Atlas da Energia Elétrica do Brasil (ANEEL, 2005), esse combustível fóssil é classificado, de acordo a sua qualidade, em: turfa, linhito, carvão betuminoso ou hulha e antracito.

O carbono é o principal composto do carvão mineral, apresentando, segundo a Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais(2001), o teor de aproximadamente 55% a 95% do elemento, fazendo portanto, com que haja tipos de carvão mineral mais ou menos ricos em carbono. O teor de carbono é o que define a maturidade geológica do mineral, conhecido como rank. São encontrados também, nesse combustível fóssil, de acordo com o DNPM, enxofre, nitrogênio, oxigênio e hidrogênio.

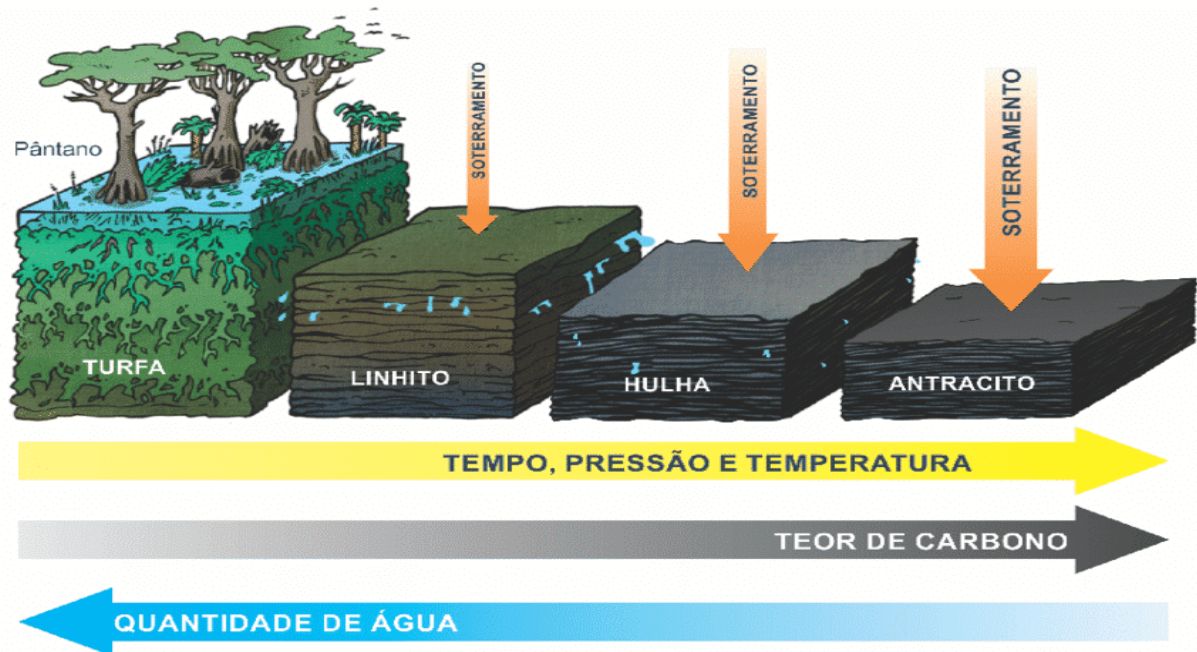
Tipos de carvão mineral

A formação do carvão mineral, Figura 5, corresponde a estágios de produção, especificada, especialmente, pela presença de carbono. Da menor para a maior concentração da substância temos os quatro tipos principais de carvão mineral:

- Turfa: material vegetal que possui teor de carbono entre 55% e 60% e permite a identificação dos restos vegetais. Seu poder calorífico é inferior a 4.000 kcal.
- Linhito: rocha sedimentar formada a partir da compressão da turfa. Possui teor de carbono entre 67% e 78%. Seu poder calorífico é inferior a 4.000 kcal.

- Carvão betuminoso ou hulha: rocha sedimentar composta por betume (mistura líquida de cor escura e alta viscosidade). Possui teor de carbono entre 80% a 90%. Seu poder calorífico é entre 7.000 a 8.650 kcal.
- Antracito: tipo de carvão compacto e sólido. Possui teor de carbono de 96% e corresponde à forma mais pura do carvão mineral contendo pouco ou nenhum betume."

Figura 5 - Origem e Processo de Formação do Carvão Mineral



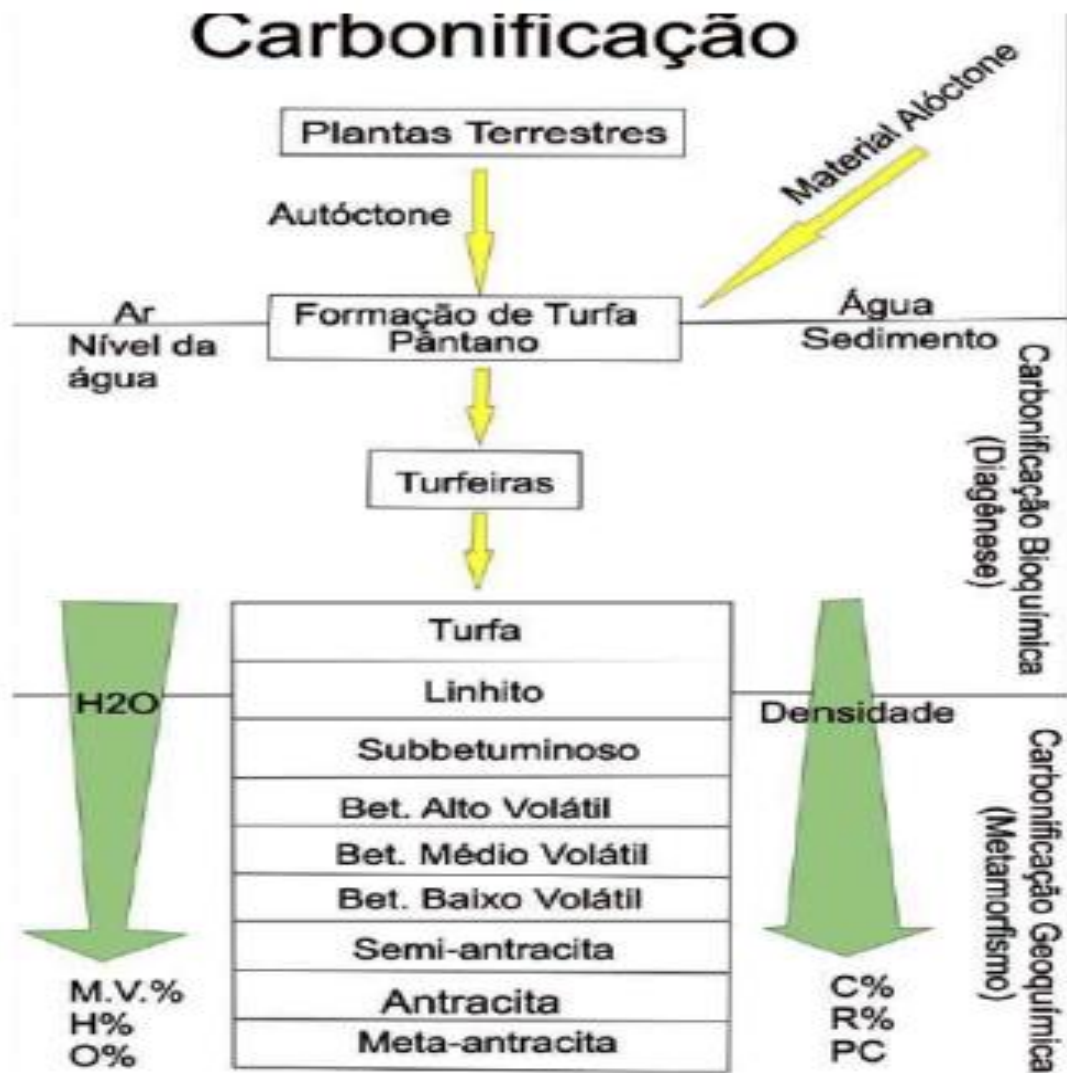
Fonte: Conhecimento científico.r7.com/carvão mineral/

O carvão mineral pode ser classificado de acordo com o teor de matéria volátil, como carvões baixo voláteis (BV), que apresentam matéria volátil entre 14 a 22%, médio voláteis (MV) entre 22 a 31% e alto voláteis (AV) 31 a 40%. De acordo com a ASTM D388-99, estes aspectos são considerados para proceder a classificação, em função do grau evolutivo (RIZZO, 2009; SILVA, 2018).

O carvão, por ser uma rocha orgânica combustível, produto da decomposição, sedimentação, compactação, endurecimento e alteração química de plantas pré-históricas por processos geológicos naturais, que são: O estado bioquímico que determina o tipo de carvão, e o estado geoquímico ou metamorfo

que determina o grau de carbonificação (*Rank*) como na Figura 6.

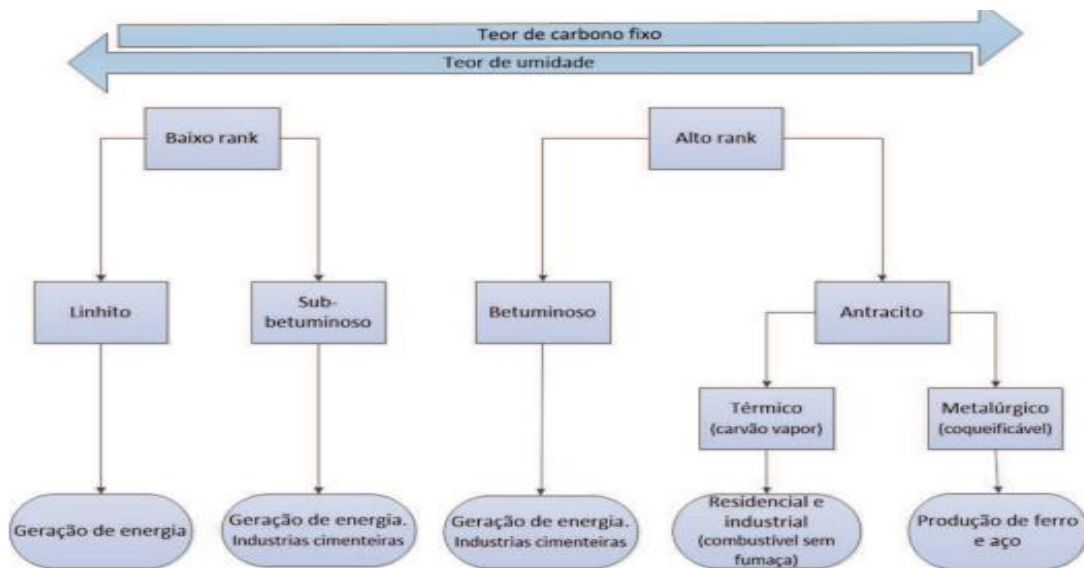
Figura 6 - Esquema ilustrando a formação do carvão, com mudanças nos parâmetros principais usados na determinação do Rank; M.V> - matéria volátil, R refletância da vitrinista e PC – poder calorífico (Levandowski, 2009)



Fonte : Levandowski, 2009

Outro método de classificação do carvão pelo *Rank* é o utilizado na Figura 7, pois quanto mais intensa a pressão e a temperatura, quanto mais tempo durar o processo de formação, mais alto será o grau de carbonização atingido e melhor a qualidade do carvão (BORBA et al.; 2001; VIANA FILHO; 2007). Quanto mais próximo do antracito estiver o carvão, maior será o seu *Rank* (OSÓRIO, 1997).

Figura 7 - Rank do Carvão Mineral
Método de classificação do carvão pelo Rank



Fonte: The Coal Resource: A Comprehensive Overview of Coal (2009)

Associado ao desenvolvimento industrial o carvão foi a fonte de energia mais importante do século XIX e da primeira metade do século XX. É o combustível fóssil mais importante, com reservas estimadas da ordem um trilhão de toneladas, suficiente para atender a demanda por mais duzentos anos. (BORBA, 2001)

O carvão, na categoria de combustíveis fósseis é o que possui maiores reservas no mundo e seus maiores produtores são a China e os Estados Unidos. Esse último também possui 30% das maiores reservas, mas ainda abaixo da Rússia que possui 50% das reserva no mundo.

Tabela 1 - Composição química dos combustíveis Fósseis Sólidos (ULHÔA, 2003).

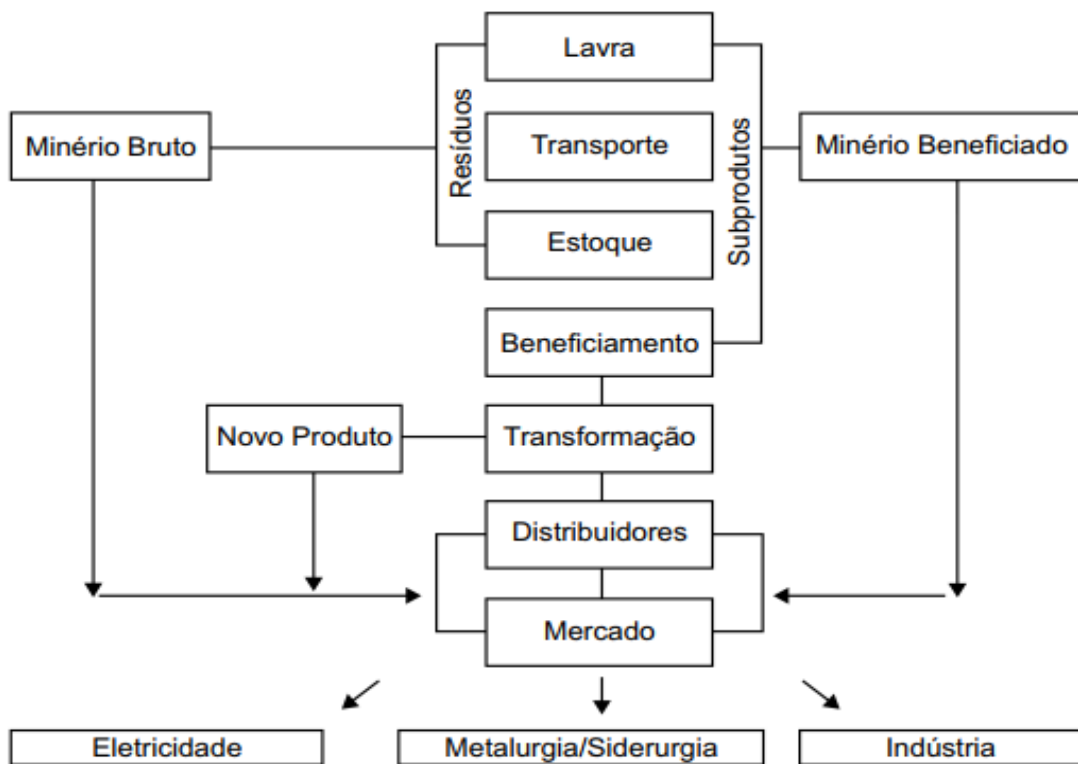
Combustíveis Fósseis				
Composição	Turfa	Linhito	Hulha	Antracito
Carbono(%)	50 - 68	55 - 75	74 - 96	90- 96
Oxigênio(%)	35 - 28	26 - 19	20 - 3	3 - 0
Hidrogênio(%)	7- 5	6 - 9	5 - 1	3 - 1

Para as minas a céu aberto, a produtividade é superior àquelas subterrâneas. Porém, segundo o *World Coal Institute* (WCI) – Instituto Mundial de Carvão – 60% da oferta mundial de carvão é extraída por mineração subterrânea.

Países como Austrália e Estados Unidos apresentam mineração a céu aberto (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008).

A extração do carvão pode ocorrer de duas formas, por minas subterrâneas ou a céu aberto, e a cadeia produtiva ocorre conforme a Figura 8 abaixo. Para determinar o tipo de extração que será realizada, leva-se em consideração, basicamente, a profundidade e o tipo de solo sob o qual o carvão se encontra (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008).

Figura 8 - Cadeia Produtiva do Carvão Mineral



Fonte: DNPM

Os doze maiores produtores de carvão mineral até 2020, de acordo com a Revista Estatística Mundial, estão listados abaixo na Tabela 2.

Tabela 2 - Produção de carvão mineral até 2020

Produção de Carvão (milhões de toneladas)									
País	2020	2019	2018	2017	2016	2015	2014	2013	2007
China	3,902.0	3846.3	3,697.7	3,523.2	3,411.0	3,747.0	3,874.0	3,974.3	2,536.7
Índia	756.5	753.9	760.4	716.0	692.4	677.5	648.1	608.5	478.2
Indonésia	562.5	616.2	557.8	461.0	434.0	392.0	458.0	474.6	174.8
Estados Unidos	584.7	640.8	686.0	702.3	660.6	812.8	906.9	993.4	1,039.2
Austrália	476.7	504.1	502.0	481.3	492.8	484.5	503.2	472.8	393.9
Rússia	399.8	440.9	441.6	411.2	385.4	373.3	357.6	355.2	314.2
África do Sul	248.3	258.4	250.0	252.3	251.2	252.1	260.5	256.3	269.4
Cazaquistão	113.2	115.0	118.5	111.1	102.4	106.5	108.7	119.6	94.4
Alemanha	107.7	131.3	168.8	175.1	176.1	183.3	185.8	190.6	201.9
Polônia	100.7	112.4	122.4	127.1	131.1	135.5	137.1	142.9	145.8
Turquia	70.8	87.1	83.9	99.8	70.6	58.4	65.2	60.4	76.6
Colômbia	50.6	84.3	84.3	89.4	90.5	85.6	88.6	85.5	71.7

Fonte: Revista Estatística Mundial

Os Brasil, como podem ver na Figura 9, é o 13° em reservas de carvão mineral com 0,7%, é o 23° em produção com apenas 0,1% e o 22° país em consumo de carvão com 0,4% das reservas conhecidas no mundo, sendo essa fonte de energia responsável por 5% da matriz energética e 1,3% da matriz elétrica do país. As vantagens do carvão mineral são a eficiência por produzir mais calor e o custo por ser mais vantajoso que outras fontes de energia, devido a sua abundância no planeta. Como combustível fóssil o carvão mineral degrada mais o ambiente, pois não é renovável como o carvão vegetal e ainda com risco de explosões por ser altamente inflamável.

Figura 9 - Maiores Reservas, Produção e Consumo de Carvões Mundiais

Reservas		Produção		Consumo	
1 EUA	26,6%	1 China	46,9%	1 China	50,6%
2 Rússia	17,6%	2 EUA	12,9%	2 EUA	11,7%
3 China	12,8%	3 Indonésia	7,2%	3 Índia	9,3%
4 Austrália	8,6%	4 Austrália	7,1%	4 Japão	3,3%
5 Índia	6,8%	5 Índia	6,2%	5 África do Sul	2,3%
6 Alemanha	4,5%	6 Rússia	4,3%	6 Rússia	2,2%
7 Ucrânia	3,8%	7 África do Sul	3,8%	7 Coreia do Sul	2,2%
8 Cazaquistão	3,8%	8 Colômbia	1,5%	8 Alemanha	2,0%
9 África do Sul	3,4%	9 Cazaquistão	1,4%	9 Indonésia	1,6%
10 Indonésia	3,1%	10 Polônia	1,4%	10 Polônia	1,4%
11 Turquia	1,0%	11 Alemanha	1,1%	11 Austrália	1,1%
12 Colômbia	0,8%	12 Canadá	0,9%	12 Taiwan	1,1%
13 Brasil	0,7%	13 Ucrânia	0,8%	13 Turquia	0,9%
14 Canadá	0,7%	14 Vietnã	0,6%	14 Rússia	0,9%
15 Polônia	0,6%	15 Turquia	0,5%	15 Ucrânia	0,9%
16 Grécia	0,3%	16 República Tcheca	0,4%	16 Reino Unido	0,8%
17 Bulgária	0,3%	17 Reino Unido	0,2%	17 Canadá	0,5%
18 Paquistão	0,2%	18 México	0,2%	18 Vietnã	0,5%
19 Usbequistão	0,2%	19 Grécia	0,2%	19 Tailândia	0,5%
20 Hungria	0,2%	20 Bulgária	0,1%	20 República Tcheca	0,4%
21 Tailândia	0,1%	21 Tailândia	0,1%	21 Malásia	0,4%
22 México	0,1%	22 Romênia	0,1%	22 Brasil	0,4%
23 Oriente Médio	0,1%	23 Brasil	0,1%	23 México	0,4%
24 República Tcheca	0,1%	24 Zimbábue	0,1%	24 Itália	0,3%
25 Coreia do Norte	0,1%	25 Nova Zelândia	0,1%	25 Espanha	0,3%

Fonte: Source publication

3.1.2 Coqueria

A coqueria (Fig. 10) é um processo fundamental para a fabricação de aço, que consiste na produção de coque a partir do beneficiamento do carvão mineral ou de um *blend* de carvão. O coque mantém a forma das cargas dentro do alto forno, garantindo permeabilidade dos gases e que o fluxo de materiais seja constante e uniforme, é utilizado como combustível no alto-forno, que pela reação de *Bourduard*, reduz o minério de ferro e produz o ferro-gusa e escória.

O ferro-gusa é matéria-prima para a fabricação de aço na siderurgia e a eficiência e a inovação nos processos de produção, impacta significativamente na competitividade da indústria siderúrgica.

Figura 10 - Fábrica de Coque Central do Sarre



Fonte: Saarstall

O coque Figura 11 é um combustível mais eficiente e limpo do que o carvão mineral bruto devido a maior poder calorífico e menor teor de cinzas e enxofre, tornando seu uso mais vantajoso para a fabricação de aço. Além disso, é mais resistente à compressão e abrasão, sendo mais adequado para o alto-forno, onde é submetido a altas temperaturas e pressões. O aumento na qualidade do coque reduz o seu consumo por tonelada de gusa produzido(*coke rate*), e aumenta a produtividade dos altos-fornos e promovendo a redução de custo (FLINT,1962; LIMA, 2016).

Figura 11 - Usina de Coque Central do Sarre

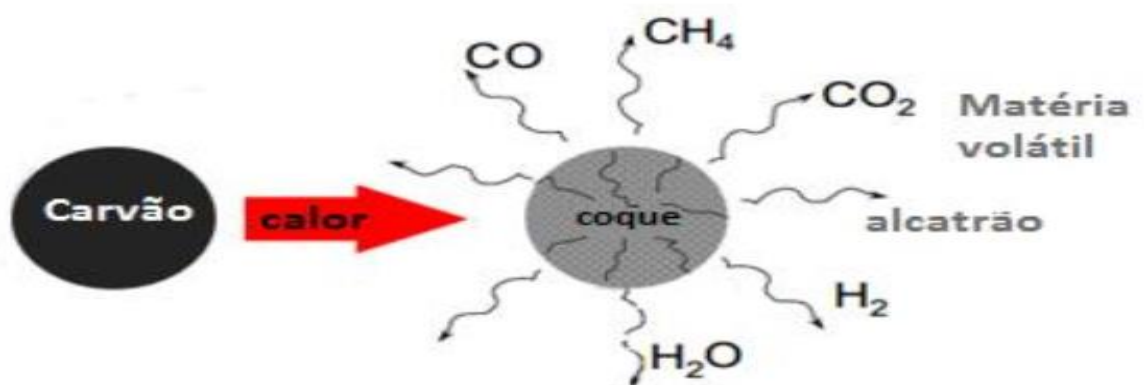
Coque após retirada do forno de coqueria



Fonte: Saarstall

O processo de extração do material volátil do carvão, ou destilação se realiza para que estes materiais voláteis não interfiram no processo siderúrgico, fazendo com que se tenha uma matéria-prima de maior qualidade. O resultado da destilação do carvão mineral é denominado de coque. O processo de destilação Figura 12, é realizado em temperaturas de, aproximadamente, 1100°C na ausência de oxigênio, para que ocorra a eliminação dos gases voláteis e a concentração do carbono. Esse processo de transformação do carvão em coque é realizado em fornos especiais, chamados de fornos de coque, que podem ser coquerias de coprodutos (*byproduct cokemaking*) e de recuperação de calor (*heat recovery cokemaking*).

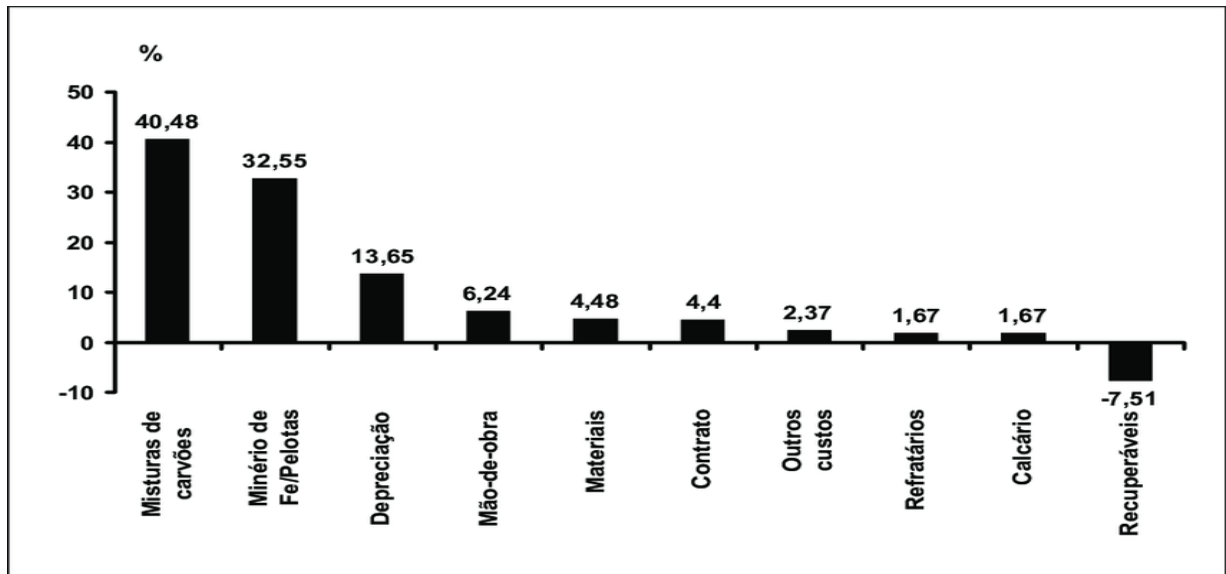
Figura 12 - Decomposição química do carvão mineral pelo seu aquecimento em ausência de ar



Fonte: ISLER, 2016

A eficiência da coqueria é fundamental para a competitividade da indústria siderúrgica, pois a produção de coque representa um dos maiores custos na produção de aço, conforme Tabela 3. Por isso, torna-se fundamental utilizar tecnologias e processos inovadores para aumentar a eficiência da coqueria e reduzir os custos.

Tabela 03 - Estratificação do custo de produção do ferro gusa da ArcelorMittal Tubarão



Fonte: (Coelho, Silva, Alves, Andrade, & Assis, 2004)

3.1.3 Carvão Vegetal

A produção de carvão vegetal, conforme a Figura 13, é impulsionada pela indústria siderúrgica brasileira, por ser uma grande demandante desta matéria prima. Ao utilizá-lo como fonte de energia e agente redutor de minério de ferro em substituição ao coque de carvão mineral é proporcionada redução da poluição do meio ambiente, por ser renovável.

Figura 13 - Carvão Vegetal



Fonte: APERAM

Por não possuir enxofre em sua composição química, o carvão vegetal oferece uma qualidade melhor ao ferro-gusa e ao aço produzidos, valorizando os produtos no mercado. Por isso, alguns analistas apontam que o carvão vegetal dificilmente será retirado do processo siderúrgico brasileiro, além de ser considerado ambientalmente sustentável, dependendo das formas de obtenção da matéria-prima e do seu processo produtivo.

O carvão vegetal é obtido a partir carbonização de biomassa, que promove a retirada de sua umidade e a concentração do carbono, esse processo resulta em uma substância negra.

Outro fator importante é o ambiental, pois grande parte do carvão produzido no Brasil é de origem de vegetação nativa, um percentual considerável de carvão já é cultivado com madeiras de reflorestamento ou madeira cultivada para esse fim, sendo menos poluente e renovável.

3.2 Briquete

O briquete ilustrado pela Figura (Fig.14) é utilizado para o aumento da densidade de carga, possibilitando maior utilização de carvões *soft* e não-coqueificáveis, reduzindo assim, o custo de fabricação do coque mantendo a qualidade igual ou superior ao produzido de forma convencional. A briquetagem parcial de carvões pode aumentar em até 15% a densidade da mistura, enquanto que outros processos como o *stamp charging* chegam a aumentar em 50%. Porém, a briquetagem possui o menor investimento dentre todos os processos de aumento de densidade de carga (NASCIMENTO, 2016).

Figura 14 - Briquete de Carvão Mineral



Fonte: Hard Coke And Coal Briquettes

A briquetagem segundo Dutra (2015), é um método de aglomeração de partículas finas por meio da compressão, com auxílio ou não de um aglomerante, promovendo a densificação dessas partículas e permitindo a obtenção de um produto compactado e resistente, denominado briquete. Fundamenta-se na movimentação forçada da mistura entre as partículas finas e o aglomerante, que pode ser prensada a frio ou a quente, através de um molde ou matriz de tamanho e forma apropriados.

Depois de fabricados, os briquetes devem apresentar características necessárias para sua aplicação como: resistência à compressão, ao impacto, à abrasão, à penetração de água e ao empilhamento, de forma a garantir condições de transporte, manuseio e utilização em reatores metalúrgicos.

Os briquetes proporcionam melhores resultados na busca incansável pela redução do custo de produção oriunda da mistura de carvões minerais, já que os mesmos representam cerca de 25% do custo de uma usina siderúrgica integrada (SILVA, 2017).

A briquetagem pode ser definida como sendo a formação de aglomerados sólidos de tamanho e forma variados, a partir do balanceamento geométrico do carvão mineral, seguido da compactação de partículas finas menores que 6 mm, por meio da pressão exercida sobre esse material. Com isso, permite a obtenção de um produto compacto e resistente após a compactação e secagem do material, melhorando, assim, a qualidade do coque através do aumento da densidade e possibilitando a utilização de carvões fracamente coqueificáveis, com isso reduzindo o custo da mistura de carvões (LUZ et al., 2010a).

A briquetagem de carvão é uma das aplicações mais antigas do processo de aglomeração, países que são grandes produtores de carvão (China e na Índia) em países em desenvolvimento (Turquia) e utilizadas para a produção de coque (Japão, Sul da África, Índia e China) para aproveitamento de carvões não-coqueificáveis (DEHONT, 2006).

Briquetes são fabricados em diferentes formatos e tamanhos, como retangular, cilíndricos, elipsoides que também são conhecidos como travesseiro, entre outros. O formato dos briquetes influencia diretamente em suas propriedades físicas. (RAHMAN et al., 1989).

3.2.1 Briquete Composto

São aqueles que utilizam em sua composição mais de um tipo de resíduo. O processo de fabricação deste briquete é semelhante ao processo de briquetagem comum, exceto que este possui uma fase a mais, que é a mistura das matérias primas. Os briquetes compostos permitem que sejam feitos teste com as misturas dos resíduos, de modo que é possível controlar a qualidade dos briquetes, comparar os custos de fabricação de uma mistura para outra e ter um direcionamento das características de cada briquete de acordo com seu uso final.

3.2.2 Briquete de Carvão

A briquetagem de carvão é uma das aplicações mais antigas do processo de aglomeração. Esse processo consiste na aglomeração de partículas finas em prensas utilizando uma pressão externa elevada (DEHONT, 2006). Os processos de briquetagem mais aplicados são por extrusão contínua em máquinas do tipo maromba, em prensas hidráulicas e em prensa de rolos, sendo o último o mais utilizado (LUZ et al., 2010). A primeira planta de briquetagem de finos de carvão mineral foi desenvolvida nos Estados Unidos na segunda metade do século XIX. O material fino de granulometria abaixo de 6mm era misturado com 6% de material ligante, o piche. A mistura era conduzida a uma máquina de rolo duplo, onde era alimentada sobre pressão, produzindo o briquete (LUZ et al., 2010).

O processo de briquetagem consiste na aglomeração de materiais com granulometria fina, o objetivo é obter um produto com maiores dimensões através do uso de ligantes, podendo estes ser de origem mineral ou orgânica. Através deste processo é possível obter briquetes de carvão com alta qualidade e ter um bom aproveitamento das pequenas frações de carvão que geralmente são descartadas. A técnica de briquetagem de carvão envolve o balanceamento granulométrico, a mistura de aglomerante, compactação e secagem.

As vantagens do processo são:

- alto valor agregado,
- alto poder calorífico,
- maior temperatura de chama,

- regularidade térmica,
- fácil manuseio, transporte e armazenagem
- menor índice de poluição.

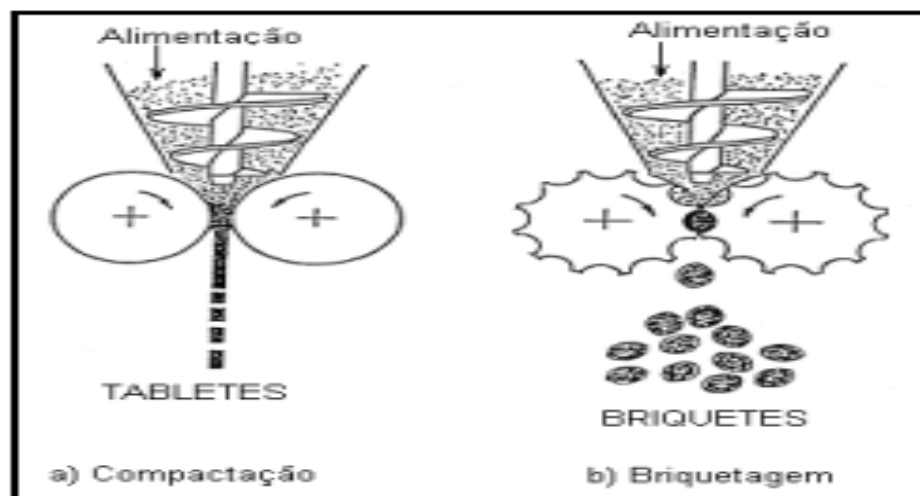
Os desafios na fabricação de briquetes de carvão são:

- a densificação durante a produção de briquetes demanda energia adicional, o que complica o processo,
- o alto custo inicial para os briquetes,
- falta de infraestrutura para a produção de briquetes.

Segundo *Borowski e Hycnar (2013)*, a técnica de briquetagem de carvão mineral em prensas de rolos envolve o balanceamento granulométrico, mistura proporcional de aglomerante, briquetagem ou compactação e secagem. A Figura 15 mostra o diagrama de linha usado para a briquetagem.

A compressão do material se dá na cavidade existente entre dois rolos, que montados um diante do outro, giram com velocidade de rotação igual e em sentidos opostos. A pressão exercida sobre o material cresce progressivamente ao longo do segmento do rolo, a partir do ponto no qual se inicia a força de compressão sobre o material, atingindo seu valor máximo no ponto de menor distância entre os rolos, vindo a cair rapidamente até a liberação do briquete.

Figura 15 - Forma de aglomeração de partículas com aplicação de pressão



No processo de compactação (Figura 15 a), a vazão dos tabletes gerados (M) pode ser obtida pela relação:

$$M = B \times S \times V_p d_a$$

Onde:

B – largura do rolo; V_p – velocidade periférica do rolo

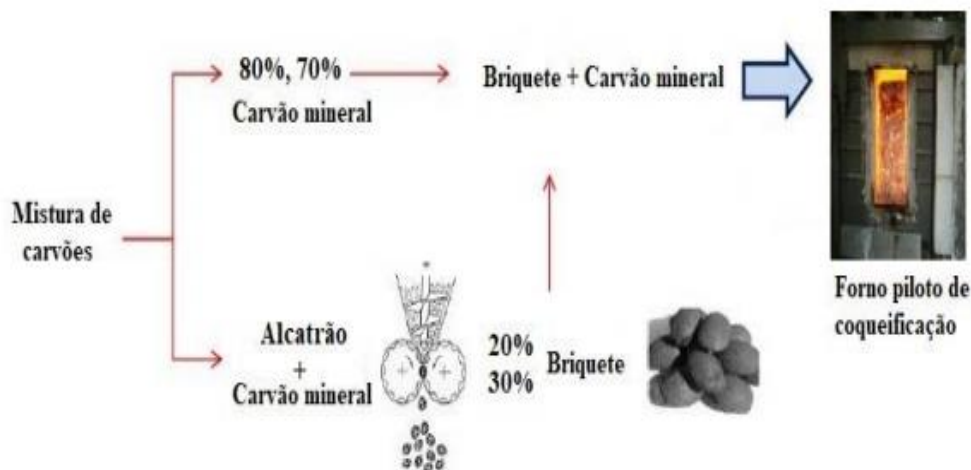
S – espessura do tablete; d_a – densidade do aglomerado

Já no segundo processo de briquetagem (Figura 15 b), a vazão de briquetes (M) é calculada em função do volume de um briquete (V_b), do número de moldes em uma coluna (z) na circunferência do rolo, do número de colunas ao longo da largura do rolo (R), da velocidade dos rolos (n, em rpm) e da densidade do briquete (d_b).

$$M = V_b \times Z \times R \times N \times d_b$$

A idéia de produção de briquetes com finos de carvão, densificando a carga não vem de agora, pois trabalhos anteriores com alcatrão utilizado como ligante já foi testada, a Figura 16 mostra um fluxograma utilizado para esse teste. O risco do uso do alcatrão é o dano causado ao meio ambiente e à saúde humana e como a legislação exige uma série de medidas preventivas para seu manuseio, deixamos apenas a Figura de referência do estudo realizado.

Figura 16 - Fluxograma da Utilização parcial de briquetes na mistura de carvão para a produção de coque



O aumento da demanda na indústria metalúrgica mostra que aproximadamente 90% de todo metal produzido anualmente nos Estados Unidos é composto de ferro e aço. Países asiáticos e africanos têm investido cada vez mais em produção briquetes de carvão devido à alta demanda por energia renovável. A previsão até 2030 é de que a Ásia poderá responder por mais de 80% da demanda mundial de carvão.

De acordo com o Mercado Global de Briquetes de Carvão por Região (Fig. 17), é esperado que o faturamento ultrapasse 4 bilhões de dólares até o final de 2035, com uma taxa de previsão de crescendo de 5% durante o período de previsão.

Figura 17 - Mercado Global de Briquetes de Carvão por Região



Fonte: *Research Nester*

São fatores que favorecem o crescimento do mercado de briquetes: o crescimento da demanda da indústria de transformação, o aumento do poder calorífico dos briquetes de carvão e menor emissão de poluentes em comparação com outros combustíveis.

As propriedades dos materiais, do processo e dos equipamentos responsáveis pela qualidade de um briquete são listadas no quadro abaixo.

Tabela 4 - Propriedades de Materiais para Briquetes

Propriedades Geométricas das Partículas	Tamanho da partícula	Estrutura
	Distribuição granulométrica	Densidade
	Forma da partícula	
Propriedades mecânicas das partículas	Ângulo de repouso	Tensão cisalhante
	Ângulo de atrito interno	Tensão axial
Propriedades Químicas das Partículas	Contaminação superficial	Fenômeno eletrostático
	Natureza da fase gasosa	Energia superficial
	Fenômeno de superfície	
	Coessão entre as partículas e adesão à superfície externa	
Propriedades Estruturais dos Sólidos	Deslocamentos	Geometria molecular
	Estrutura cristalina	Densidade
Propriedades Mecânicas dos Sólidos	Tensão cisalhante	Limite de Escoamento
	Tensão axial	Módulo de elasticidade
	Resistência à compressão	Dureza
Propriedades Químicas dos Sólidos	Atrito	Tipo de ligação Química
	Composição	Método de preparação
	Impurezas	
Condições de Processo:	Pressão	
	Taxa de Deformação	Teor de Umidade
	Velocidade dos rolos	Aglutinantes
	Temperatura	Lubrificantes
Características do Equipamento:	Rolos	Diâmetro
		Tamanho e forma dos briquetes
		Composição dos rolos
	Alimentador	Efeitos da pressão
		Pré compressão dos materiais no alimentador
	Sistema hidráulico	Rigidez dos rolos
	Mancais	Orientação dos rolos
Estrutura	Localização	

3.3 Ligantes ou Aglutinantes

Ligante ou aglutinantes funcionam como adesivo e contribuem para fazer a interligação e coessão entre partículas. Quando é utilizado na produção de briquetes, o aglutinante deve contribuir com características como, elevada resistência mecânica, coessão na queima, resistência à água, baixo impacto no poder calorífico, propriedades lubrificantes para o molde, baixo custo e disponibilidade, específicas para o produto.

A relação entre o carvão e o aglutinante é puramente física, sendo assim, as propriedades do aglutinante não são totalmente modificadas através da solubilidade mútua(**TAYLOR; HENNAH, 1991**), uma vez que após adicionado ao carvão o aglutinante não modifica suas propriedades.

A utilização de aglutinantes no processo de briquetagem se justifica quando o material a ser aglomerado não possui características intrínsecas de aglutinação ou, após a compactação, apresente características físicas comprometidas, como a resistência à compressão e ao impacto (Dias et al., 2012; De Oliveira, 2013).

Portanto, é possível dizer que a propriedade do briquete nada mais é do que a propriedade do carvão somada à propriedade do aglutinante, e a combinação dos dois materiais, anteriormente citados, formando o briquete, não faz com que haja uma mudança em suas respectivas características (RUBIO; IZQUIERDO; SEGURA, 1999)

A porcentagem de ligante também irá variar de acordo com a quantidade de espaços vazios presentes no material. Assim é necessário o controle da granulometria do carvão, que por sua vez, através dos finos presentes, terão o papel de preencher espaços vazios que conseqüentemente irá reduzir o consumo de aglomerante (MILLS, 1908).

O ligante se torna o ponto chave para o processo ter baixo custo e alto desempenho, exercendo a função auxiliar na fabricação de briquetes por permitir que o trabalho seja executado com menor pressão e maior qualidade. A escolha adequada é um fator muito importante, garantindo a utilização da grande quantidade de pó de carvão gerado todos os anos.

Para os aglutinantes do tipo filme, responsáveis por atuar como uma espécie de cola adesiva, os mesmos dependem da evaporação da água ou de algum solvente para conferir resistência mecânica ao material (CARVALHO: BRINK, 2004).

Para um ligante estar de acordo com o local onde serão produzidos os briquetes ele deve ser:

- Obtido em local próximo
- Ter baixo custo
- Ser de processo simples
- Proporcionar boa qualidade de acabamento

Os principais ligantes são classificados em ligantes orgânicos, inorgânicos e compostos, conforme características a seguir:

- Orgânicos: são bons em propriedades de ligação, proporcionam alta resistência mecânica, porém a resistência térmica e sua estabilidade térmica são ruins, outros ainda têm baixa resistência a umidade, devendo sua produção ser estocada em local coberto. Briquetes produzidos com aglutinante orgânico tem melhor resistência a frio, mas seu material volátil é alto, a resistência a quente é pobre, o processo de fabricação e os produtos de combustão são complexos (ZHANG et al., 2001; LUMADUE et al., 2012; MASSARO et al., 2014)
- Inorgânicos: tem ampla fonte e menor custo, o briquete tem boa resistência térmica e boa estabilidade térmica, mas aumentará seu teor de cinzas, reduzindo seu poder calorífico. Possui excelente capacidade térmica, mas o teor de carbono fixo e a eficiência de combustão é inferior, o conteúdo de cinzas é adicionado (ZHANG, 2012).
- Composto: com propriedades complementares, materiais misturados por adesivos compostos são a direção mais indicada para ligantes. Os aglutinantes compostos são compostos por dois ou mais ligantes, que combinam todas as vantagens de diferentes tipos de ligantes (ZHAO, 2013)

A adição de ligante ao pó de carvão para dar resistência ao briquete deverá ser a menor possível, para a redução do custo da planta, e para melhorar sua competitividade.

3.3.1 Melaço

O melaço de cana em pó, representado pela Figura 18, é um subproduto da fabricação do melaço de cana, é utilizado na produção ração de bovinos, aves, suínos, ovinos, peixes e caprinos e conforme a Tabela 6 e o seu principal uso é para complemento nutricional.

Figura 18 – Melaço em Pó e Líquido



Fonte: Melaços Brasileiros

No Brasil, são realizados testes, utilizando como aglutinante para briquetes ou em areia de moldagem (Figura 19), o melaço de cana em pó, dissolvido em água e aquecido a 70°C. Segundo ANTUNES (1982), esses briquetes substituíram parcialmente (até 20%) o carvão vegetal com resultados satisfatórios no forno elétrico de redução e no alto-forno. Conforme já descrito anteriormente, no Capítulo Introdução, a ArcelorMittal Tubarão, desenvolveu o briquete de lama de aciaria utilizando melaço de cana como um dos ligantes, com ótimos resultados.

Figura 19 - Uso do Melaço na Siderurgia



Fonte: Melaços Brasileiros

Tabela 6 - Especificações Técnicas do Melaço

Características	Unidade	Resultado
ART (açúcares redutores totais) glicose, frutose	%	55
Cálcio (máx)	%	7
Energia Bruta (valor médio determinado)	Kcal/Kg	3100
Enxofre	%	0,2
Ferro (máx)	%	0,1
Fósforo	%	0,1
Magnésio	%	2,5
Matéria Mineral (máx)	%	20
Matéria seca (min)	%	95
Outros carboidratos (máx)	%	15
Potássio (Na) (máx)	%	4
Proteína Bruta (min)	%	3
Sódio (máx)	%	1
Umidade	%	5
Contém micro elementos - Co - Cu - Mn - Zn - I		

Fonte: melacos.com.br/especificações-técnicas

3.3.2 Silicato de Sódio (Na_2SiO_3)

O Silicato de sódio Figura 20, é um composto químico que se apresenta em solução aquosa, como um líquido viscoso e incolor, ou ainda como um sólido branco ou cristalino, produzido pela fusão de areia de sílica (SiO_2) com o carbonato de sódio (Na_2CO_3) a altas temperaturas. Ele forma um vidro solúvel que pode ser dissolvido em água para produção de variedades de concentrações de silicato de sódio líquido.

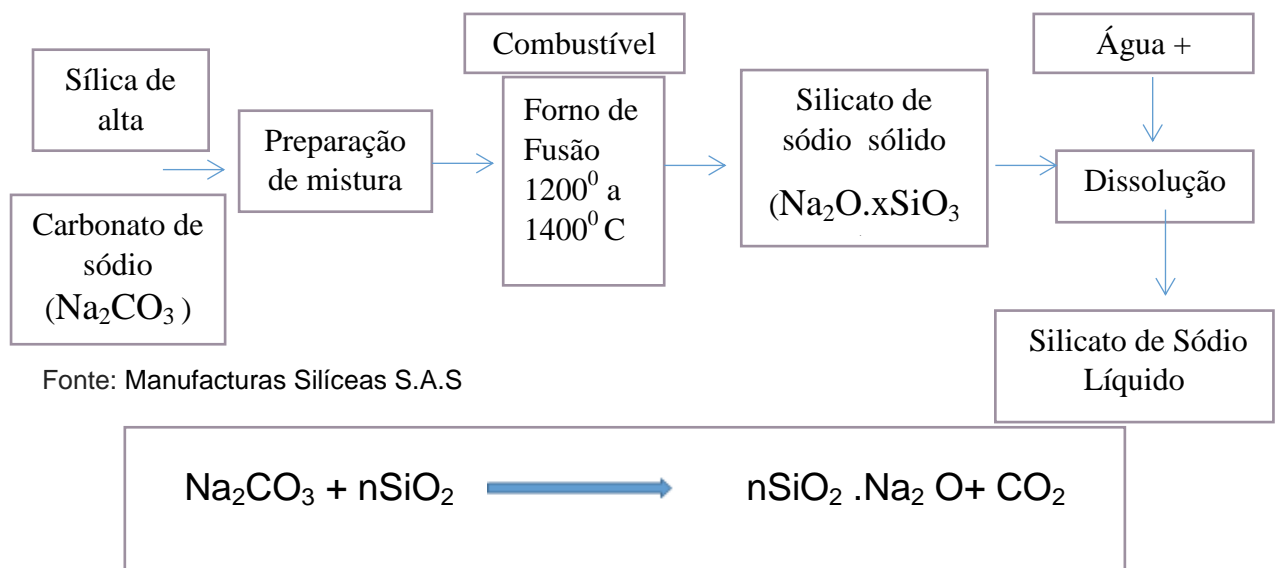
Figura 20 - Silicato de Sódio



Fonte: www.mqbchemical.com.br/produto/23/silicatos-de-sodio.

Por sua natureza alcalina, exibe propriedades adesivas e aglutinantes, possui uma excelente resistência ao calor e à maioria dos produtos químicos, tornando-o material muito útil em várias aplicações industriais. É classificado como reagente modificador, amplamente utilizado, desempenha funções diferentes nos processos como: depressor, dispersante, regulador de pH e entre suas propriedades ainda estão: estabilidade química, viscosidade, capacidade de polimerização, modificador de cargas superficiais, etc.(PG Química)

Figura 21 - Fluxograma de etapas do processo de produção de silicato de sódio



São aplicações comuns para o silicato de sódio alcalino:

- Indústrias cerâmicas: ele é usado neste segmento como agente redutor de viscosidade.
- Fundição: no processo de fundição a sua utilização é realizada como agente de ligação para a areia. Ele é muito importante na produção do molde.
- Domissanitários: na indústria de sabão ele serve como agente emulsificante, redutor de tensão superficial, regulador de viscosidade e outras finalidades. Vale destacar que no detergente o silicato de sódio alcalino é aplicado para aumentar a eficiência do tensoativo.
- Setor têxtil: é aplicado nas indústrias têxtil para manter o pH em um intervalo apropriado e para estabilização do banho.

- Setor de papel e celulose: usado para o branqueamento de fibras de papel e na estabilização do peróxido de hidrogênio.
- Soluções de silicato de sódio alcalino: estas também são usadas em outras funções, como tratamento de água, tintas especiais, eletrodos e fluxos, precipitados de sílica e géis, fabricação de metassilicato de sódio, entre outros.
- Produção de cimentos refratários: neste setor é usado como agente ligante.
- Setor de adesivos.
- Fabricação de portas corta-fogo.
- Usado como inibidor de corrosão de metais.

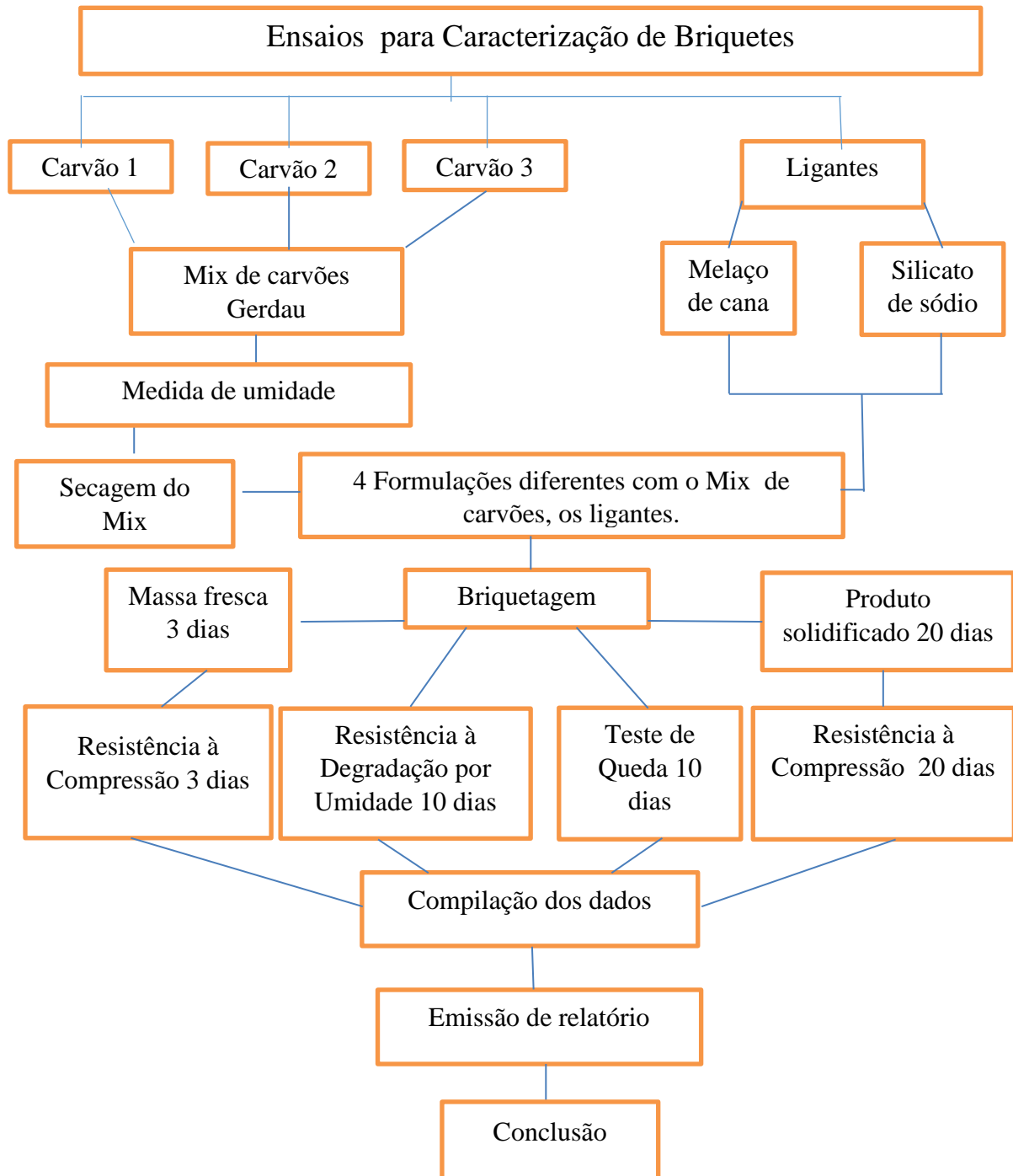
São principais aplicações do silicato de sódio puro:

- Construção civil: ele é usado em cimentos e argamassas
- Tratamento de água.
- Fundições: aqui ele também é utilizado como agente de ligação.

4.0 MATERIAIS E MÉTODOS

As principais atividades realizadas durante este trabalho em termos de etapas, análises e amostras, tanto para a caracterização dos materiais quanto para a caracterização dos briquetes, estão resumidas no fluxograma da Figura 22.

Figura 22 - Fluxograma de Ensaios para Caracterização de Briquetes



Fonte: Própria

4.1 Materiais

Para esse estudo, foram utilizados dados fornecidos por uma siderúrgica nacional, sobre *blend* dos principais carvões minerais utilizados na empresa, ligantes adquiridos para as misturas de briquetes serem testadas e confeccionado um molde para testes em laboratório do IFMG de Ouro Branco. A amostra do *blend* de finos de carvão foi coletada na estação de peneiramento para carregamento dos silos de carvão da coqueria.

4.2 Métodos

Para que os métodos fossem validados, foram verificados procedimentos para a condução das análises, padrões e tempos para secagem de materiais, diluição de reagentes e das proporções de misturas. A metodologia utilizada para o cálculo da taxa percentual de cada componente presente na mistura devido à disponibilidade de equipamentos para os testes de resistência dos briquetes.

4.2.1 Elaboração da Base Dados

A amostra de carvão fornecida necessária para o cálculo da taxa de composição e análise das misturas foi elaborada a partir dos resultados dos testes, representados nos certificados de embarque para a siderúrgica. Esses documentos foram enviados aos responsáveis técnicos e compilados em *softwares* internos da empresa, para aprovação e então embarque. Geralmente esses testes prévios ao embarque foram acompanhados por um especialista técnico contratado pela siderúrgica compradora.

Para fins de auditoria, periodicamente são realizadas visitas nos portos de embarque e laboratórios de análises das empresas fornecedoras, pelos responsáveis técnicos da compradora, com intuito de acompanhar a realização dos testes. O material fornecido foi certificado, embarcado em navios e recebido no Brasil. Esse período foi determinado em conjunto com o setor técnico da empresa, assegurando maior assertividade nos resultados do *blend* de carvões para ser enfiado na coqueria.

4.2.2 Caracterização dos ligantes

A caracterização das propriedades individuais de cada ligante possibilitou a análise quais deles promoveram melhores resultados de compactação de acordo com os percentuais adicionados em suas proporções das misturas, por uma maior resistência a queda por exemplo. Ainda foi possível também notar pontos de atenção em alguns deles, como um maior ou menor teor de umidade, contribuindo para que seu armazenamento fosse adequado. Para isso a análise da base de dados foi elaborada, e foi possível realizar tal caracterização, baseado na literatura deste trabalho.

4.2.3 Elaboração das Misturas para Briquetes

A elaboração de propostas de misturas foi baseada em históricos de combinações utilizadas anteriormente pela siderúrgica apoiadora, além de literaturas internas da mesma, como padrões operacionais e relatórios de consultoria de processo. Foi considerada a variação de 10 a 20 por cento para cada combustível, considerando 3 diferentes tipos, sendo eles: os carvões minerais 1, 2, 3, que formam o *blend* de carvões com densidade de 700Kg/m^3 . A variação destes combustíveis foi determinada em função das características e propriedades individuais de cada carvão.

Após o resfriamento, foi realizada a análise granulométrica do material Figura 25, permitindo a verificação das frações do material amostrado, que foi testado conforme a tabela 7 de determinação da composição granulométrica do material.

Figura 24 - Estufa



Figura 25 - Estação de Peneiramento



Fonte: Própria

A análise granulométrica do material permitiu verificar as principais frações da amostra de finos de *blend* fornecidos, com os maiores valores se concentrando em peneiras específicas como a Tabela 7 abaixo. Tais concentrações permitem que o material seja briquetado com diferentes tamanhos de partículas ficando agregadas após a adição de ligantes e a ação da prensa.

Tabela 7 - Composição Granulométrica do material agregado Miúdo

Determinação da Composição Granulométrica Agregado Miúdo					
Abertura das peneiras		Peso (g)	Porcentagem Retida(%)		Porcentagem M passante (%)
ASTM	mm		RETIDO	ACUMULADA	
5/16"	8	6,5	0,43	0,43	99,57
5	4	63,54	4,24	4,67	95,33
12	2	175,38	11,69	16,36	83,64
18	2	344,54	22,97	39,33	60,67
40	5	335,59	22,37	61,70	38,3
120	0,125	391,53	26,10	87,81	12,19
170	0,088	105,43	7,03	94,83	5,17
Fundo		77,49	5,17	100	
Total		1500		100	

Fonte: Própria

Para os testes foi definido que toda a amostra de carvão seria passada por estufa e armazenada após resfriamento em recipientes fechados para não absorver umidade novamente. Amostras para os testes foram de 1500g de *blend* de carvão, com 5% de umidade, pois após verificada a umidade da amostra e resistência, permitiu diminuir o teor de umidade no teste, pois os ligantes utilizados eram líquidos.

O silicato de sódio foi adicionado normalmente nas misturas com os percentuais de 5 e 7% para a confecção das amostras, mas o melaço de cana líquido, devido a sua viscosidade, precisou de diluição em água, que já seria adicionada como teor de umidade na amostra, com os mesmos percentuais do silicato sódio para de 1500g de mix de carvões. As quatro formulações foram misturados em batedeira, Figura 26, do Laboratório Metalúrgico do IFMG e colocados em molde próprio para testes de compactação Figura 27.

Para comparação, do tempo de cura dos briquetes de 3 dias e após de 20 dias, foram feitos os testes de compressão, absorção de água, quanto ao teste de queda, foi feito após 10 dias, com queda de 1,00m de altura como descrito no item 4.3.3.

O que determinamos com nossos testes, foram quais as melhores misturas, com maiores percentuais de carbono, além de melhor rendimento para trabalho, comparando a ação dos ligantes com o mix de carvões, para obtenção de um melhor resultado.

Figura 26 - Batedeira



Fonte: Própria

Figura 27 - Molde para Corpos de Prova



Após a adição de ligante, nas proporções de 5 e 7% para cada ligante em bateladas de testes, percentual de água mantendo a proporção de 5% de umidade e mistura durante 15 minutos, a mistura é testada e apertada à mão primeiramente, para verificação de condição favorável de mistura do ligante. Após verificada essa condição, foram feitos os testes de compactação, essa base foi pesada, colocada no molde, e compactada em prensa manual no molde de 43 mm de diâmetro e área de contato de $1452,3 \text{ mm}^2$ conforme Figuras 28, 29,30 e 31.

A mistura foi alimentada no molde, onde foi prensada e adensada de acordo com capacidade de ajuste da prensa.

Figura 28 - Pesagem de Amostra



Fonte: Própria

Figura 29 - Preenchimento do Molde



Figura 30 - Molde Pronto para Prensagem Figura 31 - Molde na Prensa



Fonte: Própria

Figura 32 - Pressão da Amostra



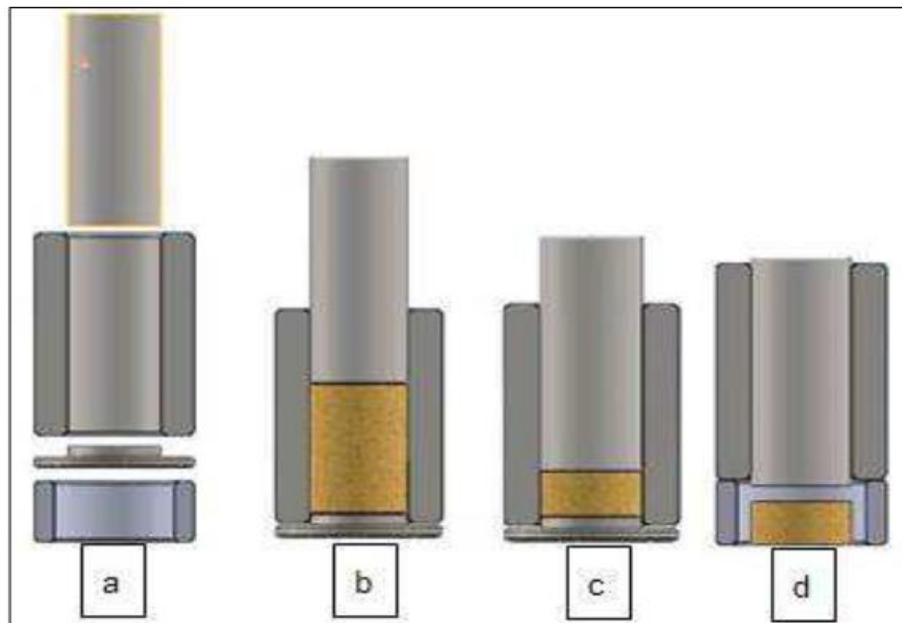
Fonte: Própria

Figura 33 - Amostra após Retirada do Molde



O material prensado com 6 toneladas de pressão em $1452,3 \text{ mm}^2$, com pressão convertida de 40,5 Mpa, para o corpo de prova da imagem acima, com o peso de 43,24g, já descontado o valor da tara do recipiente. A Figura 34 mostra de forma resumida o processo de compactação para obtenção da amostra a ser testada.

Figura 34 - Processo de Prensagem de Amostras



Fonte: <https://repositorio.ufscar.br/server/api/core/bitstreams/58d46544-fe53-41fb-a52a-0c22862c71ee/content>

5.2.0 Teste de Resistência à Compressão

Ensaio utilizado para determinar a resistência do briquete aos esforços compressivos, durante a sua estocagem, este ensaio de compressão consiste na aplicação de uma carga de compressão uniaxial crescente em corpos de prova padronizados. É essencial para avaliar a qualidade dos briquetes e garantir que eles sejam adequados para os fins a que se destinam, como combustíveis ou matéria-prima industrial. O briquete é submetido à pressão contínua e progressiva até que o mesmo frature.

A resistência à compressão é um parâmetro bastante significativo na avaliação da resistência do briquete ao manuseio, empilhamento, condições de trabalho, entre outros. Uma resistência de 3,57 kg/cm² é considerada como um valor ideal (THOMS, SNAPE e TAYLOR, 1999).

Figura 35 - Máquina de Ensaio de Tração e Compressão

Campus IFMG Ouro Branco



Fonte: Própria

Execução do Teste

- Os briquetes foram colocados em uma máquina de ensaio de compressão, que aplicou uma carga crescente e contínua sobre eles.
- A máquina de ensaio aplicou pressão aos briquetes até eles fraturarem significativamente, e a força que suportaram foi medida e registrada.
- O valor da tensão máxima é comparado com os padrões específicos para determinar a resistência à compressão dos briquetes.

A importância do teste impacta diretamente a qualidade, a segurança e eficiência dos briquetes, pois a resistência à compressão é um indicador da capacidade de suportar as condições de uso, transporte, armazenamento e queima. A baixa resistência à compressão pode apresentar riscos de quebra e esmagamento, tornando-se perigoso durante o manuseio e afeta sua durabilidade e eficiência como combustível ou matéria prima.

4.2.1 Tabelas de Rompimento de Briquetes

As tabelas de rompimento de briquetes foram criadas para comparação da tensão de ruptura após os testes de rompimento no laboratório do IFMG, foi tomado o para o cálculo o corpo de prova submetido a tensão uniaxial compressiva da máquina de testes onde:

<p>Tensão convencional compressiva:</p> $\sigma = \sigma_c = \frac{F}{A_0}$
<p>L_0: comprimento inicial da região útil; A_0: área inicial da região útil; $L_t - L$: comprimento da região útil durante</p>

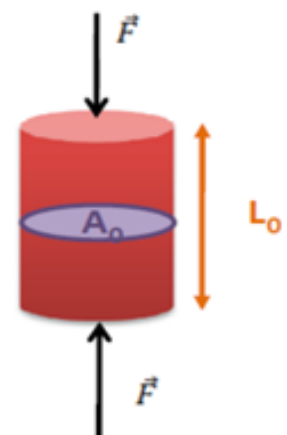


Tabela 8 - Força (N) Tensão de Ruptura(Mpa)
5% umidade 5% silicato de sódio 3 dias

Medidas dos Corpos de Provas		
Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Área da Seção (mm²)
43	27,6	1452,3
CP	Força de Ruptura (N)	Tensão de Ruptura (MPa)
1	1857,3	1,28
2	2567,2	1,77
3	2761,7	1,90
4	2956,2	2,04
5	2285,5	1,57
6	2226,9	1,53
7	1818,4	1,25
8	2654,7	1,83
9	2431,1	1,67
10	2119,9	1,46
Tensão de Ruptura Média (MPa)		1,63
Desvio Padrão		0,26

Fonte: Própria

Tabela 9 - Força (N) Tensão de Ruptura(Mpa)
5% umidade 5% silicato de sódio - 20 dias

Medidas dos Corpos de Provas		
Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Área da Seção (mm²)
43	28,4	1452,3
CP	Força de Ruptura (N)	Tensão de Ruptura (MPa)
1	3179,8	2,19
2	3928,6	2,71
3	4162	2,87
4	3996,7	2,75
5	3802,2	2,62
6	3928,6	2,71
7	3549,4	2,44
8	4453,7	3,07
9	3354,9	2,31
10	3685,5	2,54
Tensão de Ruptura Média (MPa)		2,62
Desvio Padrão		0,26

Fonte: Própria

Verificamos que os valores de rompimento dos briquetes de silicato de sódio com 5% de umidade e 5% de ligante, aumentaram significativamente com o processo de cura, permitindo que o briquete passasse de intervalo de rompimento entre como valores 1818,4N mínimo e 2956,2N máximo, para valores entre 3179N

e 4453N em 20 dias de cura. Isso nos mostrou valores de resistência de 16,52kg/cm² iniciais em média, para 26,72Kg/cm² após 20 dias de cura.

Tabela 10 - Força (N) Tensão de Ruptura (Mpa)

5% umidade 7% silicato de sódio – 3 dias

Medidas dos Corpos de Provas		
Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Área da Seção (mm ²)
43	27,6	1452,3
CP	Força de Ruptura (N)	Tensão de Ruptura (MPa)
1	2042,1	1,41
2	1915,7	1,32
3	2353,3	1,62
4	2217,4	1,53
5	1808,7	1,25
6	2012,4	1,39
7	2460,2	1,69
8	2304,7	1,59
9	2567,2	1,77
10	2635,3	1,81
	Tensão de Ruptura Média (MPa)	1,54
	Desvio Padrão	0,19

Fonte: Própria

Tabela 11 - Força (N) Tensão de Ruptura (Mpa)

5% umidade 7% silicato de sódio – 20 dias

Medidas dos Corpos de Provas		
Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Área da Seção (mm ²)
43	27,6	1452,3
CP	Força de Ruptura (N)	Tensão de Ruptura (MPa)
1	4162	2,87
2	3627,2	2,50
3	3317,4	2,28
4	3704,9	2,55
5	4055	2,79
6	3131,2	2,16
7	3802,2	2,62
8	3063,1	2,11
9	3432,7	2,36
10	4093,9	2,82
	Tensão de Ruptura Média (MPa)	2,51
	Desvio Padrão	0,27

Fonte: Própria

Os valores de rompimento dos briquetes de silicato de sódio com 5% de umidade e 7% de ligante, aumentaram significativamente com o processo de cura de 20 dias, permitindo que o rompimento que foi em média entre 1808 N a 2635N

como valores mínimos, aumentasse para valores entre 3063N e 4162N em 20 dias após produção.

Tabela 12 - Força (N) Tensão de Ruptura (Mpa)
5% de umidade e 5% de melaço-3 dias

Medidas dos Corpos de Provas		
Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Área da Seção (mm²)
43	27,6	1452,3
CP	Força de Ruptura (N)	Tensão de Ruptura (MPa)
1	2032,4	1,40
2	2353,3	1,62
3	3170,4	2,18
4	2460,2	1,69
5	2557,5	1,76
6	1721,2	1,19
7	2168,5	1,49
8	2333,8	1,61
9	2110,2	1,45
10	1769,8	1,22
	Tensão de Ruptura Média (MPa)	1,56
	Desvio Padrão	0,29

Fonte: Própria

Tabela 13 - Força (N) Tensão de Ruptura (Mpa)
5% de umidade e 5% de melaço - 20 dias.

Medidas dos Corpos de Provas		
Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Área da Seção (mm²)
43	27,6	1452,3
CP	Força de Ruptura (N)	Tensão de Ruptura (MPa)
1	2032,4	1,40
2	2061,5	1,42
3	3139,3	2,16
4	2858,9	1,97
5	2226,9	1,53
6	2119,9	1,46
7	2431,1	1,67
8	2382,4	1,64
9	3082,6	2,12
10	2353,3	1,62
	Tensão de Ruptura Média (MPa)	1,70
	Desvio Padrão	0,28

Fonte: Própria

Os pontos de rompimento dos briquetes de melaço de cana com 5% de umidade e 5% de ligante, diminuíram sua dispersão quanto a valores de rompimento após o processo de cura, permitindo que o briquete de intervalo de rompimento em média entre 1721 N a 3170N como valores, para valores entre 2119N e 3139N em 20 dias após produção. Por comparação, apesar de percebermos sua tensão de ruptura média variando quatorze pontos com variação de 156 para 170 Mpa não tivemos uma variação muito significativa quanto ao briquete de melaço de acordo com os vinte dias de cura.

Tabela 14 - Força (N) Tensão de Ruptura (Mpa)
5% de umidade 7 de melaço - 3 dias

Medidas dos Corpos de Provas		
Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Área da Seção (mm²)
43	27,6	1452,3
CP	Força de Ruptura (N)	Tensão de Ruptura (MPa)
1	2071,3	1,43
2	2363	1,63
3	2606,1	1,79
4	2489,4	1,71
5	2071,3	1,43
6	2051,8	1,41
7	2372,7	1,63
8	2003,2	1,38
9	2800,6	1,93
10	2460,2	1,69
	Tensão de Ruptura Média (MPa)	1,60
	Desvio Padrão	0,19

Fonte: Própria

Tabela 15 - Força (N) Tensão de Ruptura (Mpa)5% de umidade 7% de melaço - 20 dias

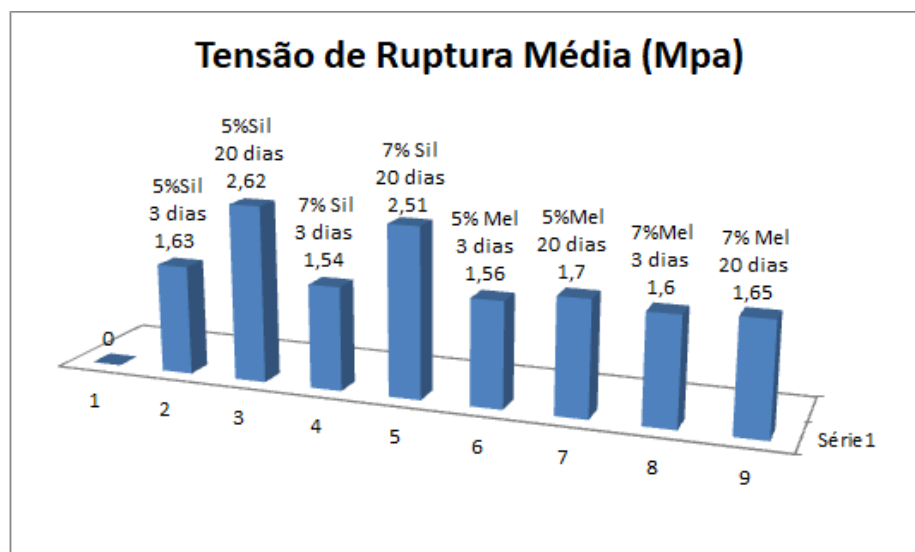
Medidas dos Corpos de Provas		
Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Área da Seção (mm ²)
43	27,6	1452,3
CP	Força de Ruptura (N)	Tensão de Ruptura (MPa)
1	2197,7	1,51
2	2226,9	1,53
3	2645	1,82
4	2576,9	1,77
5	2664,4	1,83
6	2615,8	1,80
7	2285,2	1,57
8	2168,5	1,49
9	2518,6	1,73
10	1993,5	1,37
Tensão de Ruptura Média (MPa)		1,65
Desvio Padrão		0,17

Fonte: Própria

Os pontos de rompimento dos briquetes de melaço de cana com 5% de umidade e 7% de ligante, além de se concentrarem com rompimentos próximos, aumentaram pouco com o processo de cura, com intervalos de rompimento em média entre 2050 N a 2700N como valores mínimos, para valores entre 2200N e 2600N em 20 dias após produção.

Para melhor comparação dos valores médios de ruptura por ligante, a Figura 36 apresenta claramente quais ligantes conseguiram atingir um nível de resistência para atender demandas e resistir aos impactos que seu transporte exige.

Figura 36 - Tensão Ruptura Média



Fonte: Própria

Em outra comparação, para melhor analisar a resistência das amostras das tabelas de ruptura, utilizamos em Minitab, os valores máximos de ruptura de silicato de sódio e melação com os teores descritos na informação para cálculo do gráfico representado na Figura 37:

One-way ANOVA: Tensão Ruptura (N) versus TIPO

Method

Null hypothesis All means are equal
 Alternative hypothesis At least one mean is different
 Significance level $\alpha = 0,05$

Equal variances were assumed for the analysis.

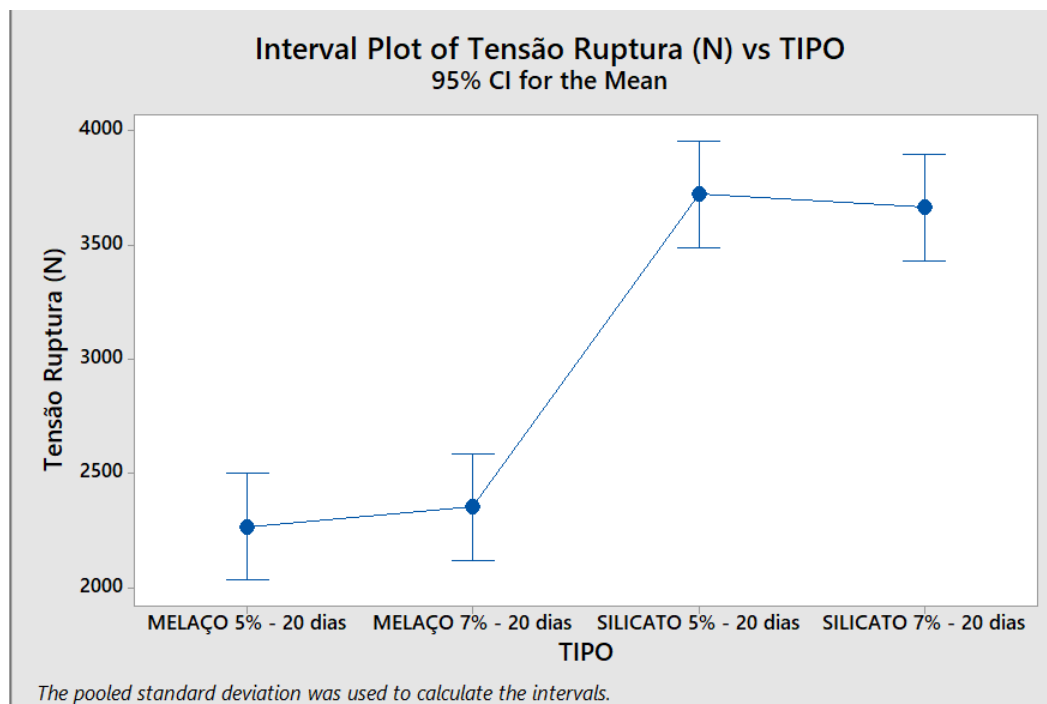
Factor Information

Factor	Levels	Values
TIPO	4	MELAÇO 5% - 20 dias; MELAÇO 7% - 20 dias; SILICATO 5% - 20 dias; SILICATO 7% - 20 dias

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
TIPO	3	19175267	6391756	48,23	0,000
Error	36	4771330	132537		
Total	39	23946596			

Figura 37 - Gráfico Anova Comparativo de Tensão de Ruptura entre os Ligantes



Fonte: Própria

Os resultados com silicato de sódio foram muito superiores em média, proporcionando visualmente a superioridade do ligante quanto a resistência ao

esmagamento, considerando ainda que no enformamento o briquete de material fino adensado entra juntamente com a carga, melhorando seu desempenho.

5.3.0 Teste de Absorção de Água

Para o briquete de carvão mineral é um procedimento de controle de qualidade que avalia a estabilidade e durabilidade em condições de umidade e está diretamente relacionado à sua porosidade e o tipo de ligante utilizado.

Embora não exista uma norma ABNT/ASTM específica e única para briquetes de carvão mineral, a metodologia segue parâmetros e princípios adaptados de normas para materiais porosos ou cerâmicos (ABNT NBR 15270/2005) ou plásticos (ASTM DD570).

Execução do Teste

- Os briquetes foram secos em estufa para atingir massa constante em temperatura específica.
- Após foram imersos em água em temperatura ambiente por 30 minutos.
- Passado o tempo estipulado, foi removido a água superficial e a massa do briquete saturado foi registrada.
- O percentual de absorção de água (%AA) foi calculado utilizando a fórmula:

$$\%AA = \left((M_{\text{saturada}} - M_{\text{seca}}) / M_{\text{seca}} \right) \times 100$$

Para interpretar os resultados foram utilizados os critérios:

- Baixa absorção: Indica um briquete mais denso com menor porosidade, com melhor comportamento durante a armazenagem e transporte, gerando menos finos e menos risco de desintegração.
- Alta absorção: Indica material mais poroso e ligante menos eficiente quanto a desintegração em contato com umidade.

Figura 38 - Briquetes de carvão e silicato de sódio, com 5 e 7% de ligante, após absorção de água de 30 minutos.



Fonte: Própria

Figura 39 - Pesagem após secagem em estufa a 100°C



Amostra de 5% de silicato de sódio absorção de 10,03% de água.

Amostra de 7% de silicato de sódio absorção de 9,01% de água.

Fonte: Própria

Verificamos que a diferença no percentual de ligante, conseqüentemente diminuiu a absorção de água pelo corpo de prova, isso nos faz crer que 8 ou 9% de ligante, provoca uma queda ainda maior na absorção de água, porém o pensamento é diminuir custos de produção sem comprometer a qualidade do produto.

Figura 40 - Briquetes de carvão e melaço com 5 e 7% de ligante, após absorção de água durante 30 minutos.



Fonte: Própria

Após 30 minutos de teste, foi constatada a desintegração dos briquetes.

As amostras de briquetes de melaço de 5% de umidade e 5 e 7% de ligantes não resistiram e se desintegraram após 30 minutos imersas em água. O melaço, por sua facilidade em combinar com a água, permite que a amostra perca a resistência. Porém, caso a produção seja mantida em local seco, a mesma pode ser utilizada.

5.4.0 Teste de Queda dos Briquetes

Avalia a resistência mecânica e à abrasão do briquete, simulando impactos no transporte, e envolve derrubá-los de alturas controladas sobre uma placa de aço, contando as quedas até a quebra ou perda de material, indicando a qualidade e durabilidade do briquete. Perda de peso em peneiras ou após impacto ou atrito são parâmetros que são avaliados.

Execução do Teste:

- A queda foi definida de altura padronizada de 100 cm à aplicação, em uma superfície de impacto como anteparo.

- Foram utilizadas duas quedas consecutivas do mesmo briquete para verificação de sua integridade.

- Após as quedas o material foi peneirado para medir a quantidade de finos gerados para verificação de partículas que indicassem degradação física.

O teste de queda determina a resistência do briquete a choques e atritos durante o manuseio, transporte e armazenamento, mantém sua integridade sem gerar excesso de finos, isso permite obter novas formulações para aumentar a resistência e identificar melhores condições de produção.

Figura 41 - Teste de Queda



Fonte: Própria

Após o teste de queda dos briquetes, os materiais foram submetidos a novos peneiramentos, para determinação das frações retidas para medir a eficiência das misturas, e dos resultados foram geradas as tabelas de análises da Figura 50.

As amostras de silicato de sódio tiveram maior eficiência, pois a fração que qualifica o material agregado nos testes é de 92,42%, acima da peneira de 8 mm. Após duas quedas do material com 10 dias de cura, o resultado indicou que para maiores períodos de cura, o material particulado fino diminui, por apresentar menor índice de quebra e pode ser comprovado pelo valor do fundo da série de peneiras, conforme mostra a Figura 42.

Por outro lado, quando comparamos o mesmo teste para briquetes utilizando melaço como ligante, o percentual de particulado acima de 8 mm é de 77,54%, o que o torna menos favorável para uso em termos de comparação quanto ao silicato de sódio.

Figura 42 - Composição Granulométrica dos Testes de Queda

Composição Granulométrica Após Teste de Queda 10 dias de cura Silicato				Composição Granulométrica Após Teste de Queda 10 dias de cura Melaço			
Abertura das Peneiras	Peso (g)	Porcentagem Retida(%)		Abertura das Peneiras	Peso (g)	Porcentagem Retida (%)	
		INDIVIDUAL	ACUMULADA			INDIVIDUAL	ACUMULADA
mm	RETIDO			mm	RETIDO		
8	95,37	92,42	92,42	8	79,53	77,54	77,54
4	2,27	2,20	94,62	4	5,38	5,25	82,79
2	1,73	1,68	96,30	2	3,55	3,46	86,25
1	2,33	2,26	98,56	1	4,48	4,37	90,62
0,5	1,12	1,09	99,64	0,5	2,37	2,31	92,93
0,125	0,25	0,24	99,88	0,125	3,28	3,20	96,13
0,088	0,12	0,12	100,00	0,088	2,27	2,21	98,34
Fundo			100	Fundo	1,7	1,66	99,9999
Total	103,19		100	Total	102,56		100

Fonte: Própria

6.0 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo desenvolver e estudar ligantes para briquetes de finos de carvão mineral com melhor efeito sem reduzir a qualidade física dos briquetes e com os resultados obtidos possibilitar o adensamento de finos para utilização em fornos para coqueificação.

As análises dos gráficos de curvas de rompimento indicam uma melhora significativa na qualidade e resistência dos briquetes como um todo, mas particularmente, uma concentração com valores próximos e intervalos menores nas curvas de rompimento, indicam comportamento semelhante obtidos com o processo de cura. Outra abordagem também permite avaliação quanto a um ganho em resistência, permitindo maior carga para o rompimento, o que melhora a avaliação quanto à possibilidade de resistência para cargas em fornos, sem que haja esmagamento dos briquetes, uma vez que sua função é de adensar finos para aproveitamento na coqueria.

Os briquetes de silicato de sódio lideram essa nova fase quanto a resistência, com testes resultando acima de 3000N, porém os briquetes de melaço, mesmo aparecendo com uma dispersão quanto a valores de rompimento maiores com cura de 3 dias, mostram uma concentração em valores mais próximos para rompimento após cura de 20 dias diminuindo sua dispersão.

O destaque é o comparativo feito pelo Minitab, quanto à cura dos briquetes após 20 dias, essa comparação por sua vez mostra nitidamente a superioridade quanto à resistência ao esmagamento do briquete de silicato de sódio, que possui uma resistência média de 3963,77 N, enquanto o briquete de melaço de 20 dias obteve em média 2310,97 N.

Os testes de absorção de umidade revelaram um problema para os briquetes de melaço, pois após 30 minutos se desintegraram, provando que para serem utilizados, sua produção deverá ser estocada em galpões para cura. Caso a produção seja enfiada logo após, a cura será prejudicada.

Os testes de silicato de sódio mostraram um panorama bem diferente, quando absorveram 9 e 10% de umidade, porém não perderam em qualidade após

secos novamente, mantendo o padrão de curva de rompimento, sem que a cura fosse prejudicada.

Os testes de queda apresentaram percentual de finos em ambos os ligantes, mas o percentual de material retido na peneira de 8 mm (92,42%), prova que o briquete de silicato de sódio, em detrimento do briquete de melação (77,54%), possui maior qualidade, quanto à resistência mecânica, percentual de finos e absorção de umidade.

Então entramos nos critérios de qualificação dos ligantes que é acessibilidade e melhor custo benefício para utilização, pois o preço do ligante pode ser crucial para sua utilização, mesmo percebendo que o briquete de carvão e silicato de sódio é muito superior em resistência. Devemos observar é que o melação é fonte de carbono, e o silicato não é, e pode reagir com as paredes do refratário do forno, pois não temos estudos quanto a esse enfoque.

7.0 Sugestões para Trabalho Futuros

Para trabalhos futuros a sugestão é que seja realizado um estudo utilizando finos dos processos siderúrgicos para confecção de briquetes autorredutores, utilizando finos de coque, de minério de ferro, de fundentes e alguns ligantes que proporcionem alto poder calorífico para uso nos altos fornos.

REFERÊNCIAS

- LUZ, Adão Benvindo da; SAMPAIO, João Alves; FRANÇA, Sílvia Cristina Alves. **Tratamento de Minérios**. Centro de Tecnologia Mineral - CETEM/MCT, 2010, 5ª Ed., 932p. Rio de Janeiro, 2010 Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/476> Acesso em 02/10/2023.
- CARVALHO, Eduardo Augusto de; BRINCK, Valter de Carvalho; CAMPOS, Antônio Rodrigues de. **Aglomerção: Briquetagem. Capítulo 15.1**, 26p. Disponível em: <https://www.cetem.gov.br/antigo/images/capitulos/2018/capitulo15-1.pdf>. Acesso em 02/10/2023.
- SILVA, Prof. Dr. André Carlos. **Aglomerção Mineral**. Disponível em: https://files.cercomp.ufg.br/webby/up/596/o/aglomeracao_2.pdf. Acesso: 03/05/2022.
- CARVALHO, Eduardo Augusto de; BRINCK, Valter de Carvalho. **Aglomerção: Briquetagem e Pelotização Parte II**, 2010, 71p. Centro de Tecnologia Mineral - Ministério de Ciência e Tecnologia – Coordenação de Processos Minerais CETEM-COPM. Disponível em: <https://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/762/1/CCL00380010.pdf> . Acesso em 02/10/2023.
- Empresa de Pesquisa Energética - EPE. **Matriz Energética e Elétrica**. Ministério de Minas e Energia Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 02/10/2023.
- Sustentavel.com.br. Carvão mineral: segunda fonte de energia mais utilizada no mundo. Disponível em: <https://sustentavel.com.br/carvaomineral/>. Acesso em: 18/11/2023.
- Sistema Maxwell. **Procedimento Experimental**. PUC-Rio. Disponível em: https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/3667/3667_6.PDF. Acesso em: 07/09/2023.
- BARROS, João Lúcio de. **Caracterização de Blendas e Briquetes de Carvões Vegetal e Mineral**. Dissertação (Mestrado Ciência dos Materiais), 2014, 125p. Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/server/api/core/bitstreams/58d46544-fe53-41fb-a52a-0c22862c71ee/content>. Acesso em: 05/09/2023.
- BRAGA, Rafael. **Carvão mineral – Origem, Tipos de Carvão, Vantagens e Desvantagens**. Disponível em: <https://conhecimentocientifico.r7.com/carvaomineral/> . Acesso em: 10/11/2023.
- PINTEREST. **Processo de Formação de Carvão Mineral**. Disponível em: <https://pinterest.com/pin/650418371166586798/>. Acesso: 10/10/2023
- KURAUCHI, Martim Hideki Nakayama. **Uma Abordagem de Ensaio de Resistência Mecânica de Carvão Vegetal**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais). Universidade de São Paulo. São Paulo, 2014. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-28042015-110831/en.php>. Acesso em: 20/10/2023.
- PEREIRA, Flávia Alves. **Efeito da Granulometria e de Aglutinantes nas Propriedades de Briquetes de Finos de Carvão Vegetal**. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal). 2009, 66 p. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2009. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/3027/1/texto%20completo.pdf>. Acesso em: 03/10/2023.
- BOROWYCZ, Marie; ROCHA, Saulo H. Freitas da; STEINMETZGER, Tina; BRUNS, Daniel. **Análise da Resistência Mecânica de Briquetes de Resíduos de Biomassa para Utilização em processos Metalúrgicos**. Conference: 6º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minérios. Novembro/2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/329262987>. Acesso em: 03/06/2025.
- ALVES, Felipe Inácio Cunha. **Produção de Coque Metalúrgico a partir de Carvão Densificado por Vibrocompactação em Forno de Soleira Aquecida**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais da REDEMAT), 2017, 77p. Universidade Federal de Ouro Preto-UFOP, Ouro Preto, 2017. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/server/api/core/bitstreams/260fb0de-91a8-48bc-9da3-3cebc4b889b7/content>. Acesso em 05/09/2023.

BARROS, João Lúcio de. **Blendas de Carvão Vegetal e Carvão Mineral para a Produção de Briquetes**. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais), 2014, 125p. Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2014. Disponível em: <<https://repositorio.ufscar.br/items/7876fee3-9ac1-4ef7-ae37-ec877817d056>>. Acesso em: 05/09/2023.

CASTELÕES, R.C.M.; CORREIA, J.C.G. **Briquetagem de Finos de Carvão Mineral da Mina de São Roque da Carbonífera Criciúma-SC**. Centro de Tecnologia Mineral, CETEM, 1995,87p. Disponível em: <<https://publicacoes.entmme.org/filebase/1995/CASTEL%C3%95ES,%20R.C.M.%20CORREIA,%20J.C.G.%20-%20BRIQUETAGEM%20DE%20FINOS%20DE%20CARV%C3%83O%20MINERAL%20DA%20MINA%20DE%20S%C3%83O%20ROQUE%20DA%20CARBON%C3%8DIFERA%20CRICI%C3%9AMA%20-%20SC.PDF>>. Acesso em 24/09/2023.

DONATO, Danilo Barros; SILVA, Carlos Miguel Simões da; MAGALHÃES, Mateus Alves de; JÚNIOR, Carlos Alberto Araújo; CARNEIRO, Angélica Cássia de Oliveira; VITAL, Benedito Rocha. **Propriedades de Briquetes Obtidos de Finos de Carvão Vegetal**. Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science) 6(2): 2015, pg 107-111, 2015 DOI: 10.12953/2177-6830/rcm.v6n2p107. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/282464247_Propriedades_de_Briquetes_Obtidos_de_Finos_de_Carvao_Vegetal>. Acesso em: 01/10/2023.

LOPES, Fernanda Brum. **Recursos Energéticos**. SlideShare. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/slideshow/fontes-de-energia-79460169/79460169>>. Acesso em 03/09/2023.

CARIAS, Marina do Carmo. **Viabilidade Técnica dos Processos de Briquetagem e de Controle de Umidade de Carvão para a Produção do Coque Metalúrgico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais da REDEMAT), 2018, 128p. Universidade Federal de Ouro Preto-UFOP, Ouro Preto, 2018. Disponível em: <<https://www.repositorio.ufop.br/server/api/core/bitstreams/4031c695-659d-49d3-81da-ad60ddd8a2e3/content>>. Acesso: 07/10/2023.

SAMPAIO, João Alves; COSTA, Lauro Santos Norbert; ANDRADE, Marcelo Corrêa de. **Ensaio Contínuos de Briquetagem em Bancada e Piloto**. Centro de Tecnologia Mineral –CETEM. Ministério da Ciência e Tecnologia. Disponível em: <<https://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/1067>> Acesso: 01/10/2023.

Depositphotos Mercado Global para fotografias. Disponível em <<https://depositphotos.com/br/similar-videos/48976829.html>>. Acesso em: 05/10/2023.

FREITAS, Eduardo de. **Carvão Vegetal. Brasil Escola**. Disponível em: <<https://brasilescola.uol.com.br/geografia/carvao-vegetal.htm>>. Acesso em: 09/10/2023.

CRM. **Carvão Mineral**. Companhia RioGrandense de Mineração. Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura-RS. Disponível em: <<https://www.crm.rs.gov.br/carvao>>. Acesso em: 05/07/2023.

VILLAÇA, Luiz Alberto. **O que é Coqueria e Sua Importância na Siderurgia**. Coordenador de Projetos – CAPEX-GERDAU, 2023. Disponível em: <<https://pt.linkedin.com/pulse/o-que-%C3%A9-coqueria-e-sua-import%C3%A2ncia-na-siderurgia-villa%C3%A7a->>. LinkedIn. Acesso em:11/11/2023.

Usina Central Sarre. Foto da Coqueria. Disponível em: <www.saarstahl.de/sag/de/konzern/sag/tochtergesellschaften/produktion/zks/index.shtml>. Acesso em: 11/09/2023.

CARVALHO, Carlos; LIZIERO, Alfredo Carlos; DORNELAS, Paulo; PORTILHO, Tamires. **Adição de Coque de Petróleo às Misturas de Carvão Mineral para a Produção de Coque Metalúrgico**. Seminário de Iniciação Científica do Instituto Federal de Minas Gerais – IFMG Campus Ouro Branco, 2014. Disponível em: <<https://www.ifmg.edu.br/sic/edicoes-anteriores/resumos-2017/adicao-de-coque-de-petroleo-as-misturas-de-carvao-mineral-para-a-producao-de-coque.pdf>>. Acesso em: 11/09/2023.

COELHO, Robson Jacinto; SILVA, Odilon José da; ALVES, Marcelo Tardin; ANDRADE, Luiz Afonso de; ASSIS, Paulo Santos. **Modelos de Previsão da Qualidade Metalúrgica do Coque a partir da Qualidade dos Carvões Individuais e do Coque Obtido no Forno-Piloto de Coqueificação**. Artigo, 2004, 6p. Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto-UFOP, Ouro Preto, 2004. Disponível em: <<https://www.repositorio.ufop.br/items/4b75e05b-52c1-4b2f-bd46-6a3952eb5b5a>> Acesso em: 12/09/2023

FOGAÇA, Profa. Jennifer Rocha Vargas. **Benzopireno**. Química Orgânica. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/quimica/benzopireno.htm>>. Brasil Escola. Acesso em 09/09/2023.

WIKIPEDIA Enciclopédia Livre. **Briquete**. Portal da Engenharia. Disponível em: <<https://pt.wikipedia.org/wiki/Briquete>>. Acesso em: 02/10/2023.

PEREIRA, Flávia Alves; CARNEIRO, Angélica de Cássia Oliveira; VITAL, Benedito Rocha; DELLA LÚCIA, Ricardo Marius; JÚNIOR, Wagner Patrício; BIANCHE, Juliana Jerásio. **Propriedades Físico-Químicas de Briquetes Aglutinados com Adesivo de Silicato de Sódio**. Icmago Institutions Rankings, 2008. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/floram/a/n44X7qpFqKFz8nBxbns7zKG/?lang=pt>>. Acesso em: 22/10/2023.

Research Nester: Connect, Lead, Accomplish. **Tamanho, Previsão e Principais Tendências do Mercado Global entre 2025-2037**. ID Relatório: 3977, 2024. Disponível em: <<https://www.researchnester.com/reports/coal-briquettes-market/3977#market-size>>. Acesso em: 10/09/2023.

FLEK, Cristiano Martins. **Aglomerção de Finos de Manganês**. Trabalho de Conclusão de Curso-TCC (Graduação, Engenharia de Minas), 2023, 68p. Faculdade de Engenharia-FENG, Universidade Federal do Catalão – UNICAT, Catalão, 2023. Disponível em: <https://prod.ufcat.edu.br:1337/uploads/CRISTIANO_MARTINS_FLEK_0fb8f967b3.pdf>. Acesso em: 02/10/2023.

ANTUNES, R.C. **Briquetagem de carvão vegetal. Produção e Utilização de Carvão Vegetal**. Belo Horizonte. CETEC Outubro, 1982. Acesso em: 11/09/2023

MELAÇOS BRASILEIROS. **Melaços Brasileiros, Melaço o Ano Inteiro: Especificações Técnicas e Aplicações**. Disponível em: <<https://www.melacos.com.br/>>. Acesso em: 11/09/2023.

Silicato de Sódio. Disponível em: <<https://material-properties.org/pt-br/silicato-de-sodio/>> Acesso em: 10/09/2023.

PG QUÍMICA. **O que é Silicato de Sódio: Para Que Serve e Qual a Aplicação**. Disponível em: <<https://pgquimica.com.br/blog/o-que-e-silicato-de-sodio/>>. Acesso em: 11/09/2023.

ÁLVARO, Julie. **Silicato de sódio: aplicações industriais**. 2023. Disponível em: <<https://www.quimica.com.br/silicato-de-sodio-aplicacoes-industriais/>> Acesso em: 11/09/2023.

RIBEIRO, Mariana Alves. **Avaliação das Características Físicas e Metalúrgicas de um Briquete de Pó de Aciaria e o Impacto Ambiental de seu Uso Como Refrigerante no Convertedor LD**. Dissertação (Mestrado, Engenharia Metalúrgica), 2023, 147p. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2023. Disponível em: <<https://repositorio.ufmg.br/server/api/core/bitstreams/66b1c075-0029-4c37-a85b-ac4b5782e4fa/content>>. Acesso em 03/10/2023.

D.L. Botha; N.T. Leokaoko; J. R. Bunt; H.W.J.P. Neomagus. **Avaliação de ligantes poliméricos na briquetagem de finos de carvão para aplicações de combustão**. Centre of Excellence In Carbon-based Fuels, School of Chemical and Minerals Engineering, North-West University, Potchefstroom, South Africa. Disponível em: <https://scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2225-62532021000300005> Acesso em 10/10/2025.