



# REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP – UEMG



**Dissertação de Mestrado**

**“Produção de Coque Metalúrgico Através da  
Utilização Parcial de Briquetes de Carvão Mineral”**



**Autor: Ricardo dos Santos Oliveira**

**Orientador: Prof. Dr. Paulo Santos Assis**

**Agosto de 2017**



# REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP – UEMG

Ricardo dos Santos Oliveira

## Produção de Coque Metalúrgico Através da Utilização Parcial de Briquetes de Carvão Mineral

Dissertação de mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Paulo Santos Assis

Ouro Preto, agosto de 2017

O482p Oliveira, Ricardo dos Santos.  
Produção de coque metalúrgico através da utilização parcial de briquetes de carvão mineral [manuscrito] / Ricardo dos Santos Oliveira. - 2017.  
102f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Santos Assis.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação. REDEMAT. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais.

Área de Concentração: Processos de Fabricação.

1. Hulha. 2. Briquetes. 3. Coque metalúrgico. 4. Produtividade. I. Assis, Paulo Santos. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 62-5

Catálogo: [www.sisbin.ufop.br](http://www.sisbin.ufop.br)



**REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS**  
**UFOP - UEMG**  
Pós-Graduação em Engenharia de Materiais



## **"Produção de Coque Metalúrgico Através da Utilização Parcial de Briquetes de Carvão Mineral"**

**Autor: Ricardo dos Santos Oliveira**

Dissertação defendida e aprovada, em 26 de agosto de 2017, pela banca examinadora constituída pelos professores:

Prof. Paulo Santos Assis (Dr. Ing) - Orientador  
Universidade Federal de Ouro Preto

Prof. Guilherme Liziero Ruggio da Silva (Doutor)  
Instituto Federal de Minas Gerais  
Campus Ouro Branco

Prof. Jorge Luiz Brescia Murta (Doutor)  
Universidade Federal de Ouro Preto

## **DEDICATÓRIA**

Dedico todo o meu esforço e trabalho aos meus pais, Walter e Maria de Lourdes, pelo amor incondicional, confiança e apoio.

À Deus por me dar força e saúde para conquistar meus objetivos.



## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer a Deus que me proporcionou saúde, sabedoria e perseverança para conquistar. Quero agradecer os meus pais, Walter Correa Oliveira e Maria de Lourdes dos Santos Oliveira por compreender os meus objetivos e por me apoiarem em todas as minhas decisões. Agradeço também os meus irmãos, Rafael e Gabriel, e também aos meus familiares, tios, primos e avó que torceram por mim nesta conquista. A Tatiane por ter estado presente durante grande parte da minha vida acadêmica em Ouro Preto. Os meus amigos Rafael Baptista, Tiago Lagoeiro e Amanda Abreu pelo incentivo e amizade, e todos os outros de Sete Lagoas e Ouro Preto que de alguma forma estiveram presente nesta conquista. A gloriosa República Katapulta que foi e continuará sempre sendo minha segunda casa. Os meus amigos da Engenharia Metalúrgica que também estiveram presente comigo no mestrado.

Agradeço também ao meu ilustre professor orientador Dr. Paulo Santos Assis pela orientação e ensinamentos. Ao professor Dr. Cláudio Vieira Batista que foi o meu orientador no estágio docência, pelas dicas e apoio. Ao professor Dr. Carlos Frederico Campos de Assis pelo companheirismo em vários trabalhos e colaborações técnicas. À Gerdau Ouro Branco, em especial o engenheiro Dr. Guilherme Liziero Ruggio da Silva, pela co-orientação. Aos professores da REDEMAT. E aos alunos, técnicos e professores dos laboratórios do DEMET.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma me ajudaram nesta conquista.

Muito obrigado.

*“Não há expediente para aqueles que não evitam o trabalho do pensamento.” (Thomas Edison)*

## RESUMO

Briquetagem de carvão mineral é o mesmo nome dado a uma aglomeração de partículas finas de carvão mineral juntamente com algum material de ligação orgânica ou inorgânica. Esta pesquisa foi desenvolvida com o objetivo de aumentar a produtividade e a qualidade física e química do coque metalúrgico produzido nas coquearias. Inicialmente uma prensa em escala industrial foi utilizada para a fabricação dos briquetes de carvão mineral. As propriedades físicas e químicas do carvão mineral foram analisadas em relação aos variados parâmetros de briquetagem tais como umidade do carvão, granulometria e porcentagem de material ligante. Através do processo de briquetagem do carvão mineral utilizando baixas quantidades de alcatrão, consegue-se obter um combustível de maior densidade, maior resistência mecânica, granulometria uniforme e baixa geração de particulados. O sucesso alcançado neste trabalho utilizando briquetes com 5% em peso de alcatrão como material ligante, bem como a fabricação posterior de coque através da introdução em massa de 20 e 30% de briquetes na carga dos fornos de coquearia, representa aumento em produtividade e na resistência mecânica a frio e a quente do coque. A produção de coque metalúrgico, granulometria acima de 25mm, chegou a aumentar em 4,96% e os resultados da qualidade física e química do coque foram superiores aos resultados sem a utilização de briquetes na composição da carga.

**Palavras chave:** carvão mineral de baixo poder coqueificante, briquetagem, alcatrão, coque metalúrgico, competitividade, produtividade, DI, CSR, CRI.



## ABSTRACT

Coal briquetting is the same name given to agglomeration of fine particles of coal with some organic or inorganic binding material. This research was conducted with the aim of increasing the productivity and the physical and chemical quality of the metallurgical coke produced in the coking plants. Initially, a press on an industrial scale was used to manufacture coal briquettes. The physical and chemical properties of coal were analyzed in relation to various parameters such as moisture briquetting of coal, grain size and percentage of binder material. Through the process of briquetting of coal using lower amounts of tar, it is possible to obtain a fuel with a higher density, higher mechanical strength, uniform particle size and low generation of particulates. The success achieved in this work using briquettes with 5% by weight of tar as binder material, as well as the subsequent manufacture of coke through introduction of 20 and 30% of briquettes in the charge of the coke oven, represents an increase in productivity and cold and hot mechanical resistance of coke. The production of metallurgical coke, particle size above 25mm, increased by 4.96% and the results of the physical and chemical quality of the coke were higher than the results without the use of briquettes in the burden composition.

**Keywords:** low power coking coal, briquetting, tar, metallurgical coke, competitiveness, productivity, DI, CSR, CRI.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.1:</b> Fluxograma da utilização parcial de briquetes na mistura da carga de carvão para produção de coque. ....	20
<b>Figura 3.1:</b> Tipos de carvão e usos .....	23
<b>Figura 3.2:</b> Variação do preço internacional do carvão mineral no período de 2000 a 2014 .....	25
<b>Figura 3.3:</b> Alcatrão.....	27
<b>Figura 3.4:</b> Comportamento da carga de carvão mineral no processo de coqueificação ...	28
<b>Figura 3.5:</b> Desenho esquemático de um forno convencional do tipo <i>by-product</i> .....	30
<b>Figura 3.6:</b> Desenho esquemático de um forno <i>heat recovery</i> .....	31
<b>Figura 3.7:</b> Esquema do avanço da frente de queima no processo de coqueificação.....	31
<b>Figura 3.8:</b> Perfil de temperatura da carga de carvão enfiada no interior do forno .....	32
<b>Figura 3.9:</b> Demonstração do avanço das frentes de queima no processo de coqueificação .....	32
<b>Figura 3.10:</b> Tabela de Flint para correlação dos parâmetros de resistência física e da reatividade do coque com o <i>coke rate</i> .....	35
<b>Figura 3.11:</b> Esquema do processo DAPS .....	37
<b>Figura 3.12:</b> Esboço do processo de <i>stamp charging</i> vertical.....	38
<b>Figura 3.13:</b> Vibrador de imersão .....	38
<b>Figura 3.14:</b> Fluxograma do processo de briquetagem .....	39
<b>Figura 3.15:</b> Esquemático de uma prensa de rolo duplo .....	41
<b>Figura 3.16:</b> Efeito da pressão de compactação sobre a porosidade e o raio médio do poro no briquete .....	46
<b>Figura 3.17:</b> Resistência à compressão de acordo com a porosidade do briquete .....	47
<b>Figura 3.18:</b> Formas diferentes de aglomeração de partículas finas .....	48
<b>Figura 3.19:</b> Briquetes de carvão mineral no formato ovoide.....	48
<b>Figura 3.20:</b> Diferentes sentidos no teste de resistência à compressão para briquetes cilíndricos .....	49
<b>Figura 3.21:</b> Diferentes sentidos no teste de resistência à compressão para briquetes em formato travesseiro .....	51
<b>Figura 3.22:</b> Representação esquemática da seção de um briquete. A, interstício; B, fratura .....	54
<b>Figura 3.23:</b> Efeito da temperatura de briquetagem na resistência à tração do briquete....	55

<b>Figura 3.24:</b> Efeito da temperatura de briquetagem no volume do briquete feito de alcatrão e carvão mineral.....	55
<b>Figura 3.25:</b> Fluxograma do processo de briquetagem de bio-briquetes .....	57
<b>Figura 4.1:</b> Fluxograma das etapas de análise do material.....	59
<b>Figura 4.2:</b> Peneiras para análise da granulometria.....	60
<b>Figura 4.3:</b> Forno TGA/DSC do Laboratório de Hidrometalurgia da Universidade Federal de Ouro Preto.....	61
<b>Figura 4.4:</b> Mistura base de carvão mineral abaixo de 4mm. ....	62
<b>Figura 4.5:</b> Misturador. ....	64
<b>Figura 4.6:</b> Rolo com cavidades em formato travesseiro. ....	64
<b>Figura 4.7:</b> Briquetes de carvão mineral. ....	65
<b>Figura 4.8:</b> Multiplicnômetro do Núcleo de Valorização de Materiais Minerais do Departamento de Engenharia Metalúrgica da UFOP. ....	65
<b>Figura 4.9:</b> Microtomógrafo de raios X SkyScan 1272 do laboratório NANOLAB do Departamento de Engenharia Metalúrgica da UFOP. ....	67
<b>Figura 4.10:</b> Microscópio Eletrônico de Varredura do laboratório NANOLAB do Departamento de Engenharia Metalúrgica da UFOP. ....	67
<b>Figura 4.11:</b> Máquina Amsler Frères do Laboratório de Ensaios Mecânicos do Departamento de Engenharia Metalúrgica da UFOP. ....	68
<b>Figura 4.12:</b> Ensaio de compressão axial nas três diferentes dimensões do briquete. ....	68
<b>Figura 4.13:</b> Ensaio de impacto realizado na Gerdau Ouro Branco.....	69
<b>Figura 4.14:</b> Forno piloto da coqueria da Gerdau Ouro Branco.....	71
<b>Figura 4.15:</b> Desenho esquemático do tambor .....	72
<b>Figura 4.16:</b> Tambor tipo “I” da Gerdau Ouro Branco .....	73
<b>Figura 5.1:</b> Resultado da microscopia eletrônica de varredura da amostra B400.....	81
<b>Figura 5.2:</b> Resultado da microscopia eletrônica de varredura da amostra B500.....	81
<b>Figura 5.3:</b> Resultado da microscopia eletrônica de varredura da amostra B600.....	82
<b>Figura 5.4:</b> Resultado da microscopia eletrônica de varredura da amostra B700.....	82
<b>Figura 5.5:</b> Três diferentes posições dos briquetes no ensaio de compressão.....	83
<b>Figura 5.6:</b> Resultado do ensaio de impacto (queda) dos briquetes. ....	84
<b>Figura 5.7:</b> Resultado da análise termogravimétrica das amostras de briquete. ....	86
<b>Figura 5.8:</b> Resultado da análise de resistência mecânica à frio do coque metalúrgico. ...	87
<b>Figura 5.9:</b> Resultado da análise do índice de reatividade do coque.....	89
<b>Figura 5.10:</b> Resultado da análise da resistência mecânica à quente do coque.....	91

<b>Figura 5.11:</b> Quantidade de coque fabricado com e sem utilização de briquetes na mistura base. ....	92
<b>Figura 5.12:</b> Pressão de coqueificação em função da % de briquete na mistura da carga.	94
<b>Figura 5.13:</b> Contração da amostra em função da % de briquete na mistura da carga. ....	94

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Composição química dos combustíveis fósseis sólidos .....	24
Tabela 3.2: Propriedades químicas de alguns carvões internacionais .....	25
Tabela 3.3: Características químicas de um piche usado como material ligante .....	27
Tabela 3.4: Resistência à compressão de briquetes cilíndricos .....	50
Tabela 3.5: Resistência à compressão de briquetes elipsoides ou em formato de travesseiro .....	51
Tabela 3.6: Alguns aglomerantes utilizados na briquetagem de diversos materiais .....	52
Tabela 4.1: Briquetes produzidos com diferentes porcentagens de alcatrão na mistura. ....	63
Tabela 4.2: Experimentos realizados em duplicata de acordo com porcentagens de briquetes na mistura.....	70
Tabela 5.1: Análise granulométrica da mistura base de carvões.....	77
Tabela 5.2: Análise do ensaio de fluidez Gieseler.....	78
Tabela 5.3: Resultado do enxofre, cinza e matéria volátil dos carvões minerais.....	78
Tabela 5.4: Resultado da análise química imediata e elementar da mistura base de carvões minerais. ....	79
Tabela 5.5: Resultado da análise petrográfica da mistura base dos carvões. ....	80
Tabela 5.6: Resultado das análises de densidade e porosidade dos briquetes.....	81
Tabela 5.7: Força de compressão dos briquetes em função do tempo de cura.....	83
Tabela 5.8: Resultado do teste de penetração à água dos briquetes. ....	85
Tabela 5.9: Valores de DI das amostras de coque em relação à porcentagem de briquete na mistura. ....	88
Tabela 5.10: Variação do <i>coke rate</i> em relação à variação do DI.....	89
Tabela 5.11: Valores de CRI das amostras de coque em relação à porcentagem de briquete na mistura. ....	90
Tabela 5.12: Variação do <i>coke rate</i> em relação à variação do CRI.....	90
Tabela 5.13: Valores de CSR das amostras de coque em relação à porcentagem de briquete na mistura. ....	91
Tabela 5.14: Variação do <i>coke rate</i> em relação à variação do CSR.....	92

## LISTA DE SÍMBOLOS

mm - milímetro

°C - grau Celsius

MPa - megapascal

kg - quilograma

cm - centímetro

g - grama

psig - libras por polegada quadrada manométrica

kJ - quilojoule

m - metro

kcal - quilocaloria

mg - miligrama

rpm - rotações por minuto

kN - quilonewton

kgf - quilograma-força

cm<sup>2</sup> - centímetro quadrado

cm<sup>3</sup> - centímetro cúbico

m<sup>3</sup> - metro cúbico

m - metro

h - hora

l - litros

nm - nanometro

min - minutos

psi – libra por polegada quadrada

## LISTA DE SIGLAS

NEDO - New Energy and Industrial Technology Development Organization

JCOAL - Japan Coal Energy Center

WCI - World Coal Institute

DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral

TGA - Análise termogravimétrica

DSC - Calorimetria Exploratória Diferencial

UFOP - Universidade Federal de Ouro Preto

CTAN - Comprehensive Tex Archive Network

MEV - Microscópio Eletrônico de Varredura

CRI - *Coke Reactivity Index*

CSR - *Coke Strength after Reaction with CO<sub>2</sub>*

DI - *Drum Index (150-15mm)*

CMC - *Coal Moisture Control*

DAPS - *Dry-Cleaned and Agglomerated Precompaction System*



## SUMÁRIO

RESUMO .....	viii
ABSTRACT .....	ix
LISTA DE FIGURAS .....	x
LISTA DE TABELAS .....	xiii
LISTA DE SÍMBOLOS .....	xiv
LISTA DE SIGLAS .....	xv
1 INTRODUÇÃO.....	19
2 OBJETIVOS.....	22
2.1 Objetivo Geral.....	22
2.2 Objetivos Específicos .....	22
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	23
3.1 Carvão Mineral .....	23
3.2 Alcatrão.....	26
3.3 Coqueificação .....	28
3.4 Parâmetros que Influenciam nas Propriedades do Coque Metalúrgico .....	30
3.4.1 Largura e tipo dos fornos da coqueria.....	30
3.4.2 Velocidade de coqueificação.....	33
3.4.3 Granulometria dos carvões minerais .....	33
3.5 Funções do Coque Metalúrgico no Alto-Forno .....	34
3.5.1 Indicadores de Qualidade do Coque Metalúrgico para Uso em Alto-Forno.....	35
3.6 Tecnologias para Aumento de Densidade de Carga nos Fornos da Coqueria.....	36
3.7 Briquetagem.....	39
3.7.1 Etapas da briquetagem .....	40
3.7.2 Objetivo e vantagens .....	42
3.7.3 Conceitos e princípios .....	43
3.8 Parâmetros que Influenciam nas Propriedades dos Briquetes .....	44

3.8.1 Granulometria da matéria-prima .....	44
3.8.2 Porosidade .....	45
3.8.3 Tamanho e forma .....	47
3.8.4 Tipo e quantidade de materiais ligantes .....	51
3.8.5 Temperatura .....	53
3.9 Briquetagem sem Material Ligante.....	55
3.10 Briquetagem e Meio Ambiente.....	56
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	58
4.1 Preparação das Matérias-Primas .....	59
4.1.1 Caracterização granulométrica do carvão mineral .....	60
4.1.2 Caracterização química do carvão mineral e briquetes.....	60
4.1.3 Caracterização petrográfica do carvão mineral.....	62
4.1.4 Caracterização química do alcatrão.....	62
4.2 Processo de Briquetagem.....	63
4.2.1 Mistura .....	63
4.2.2 Compactação .....	64
4.3 Análise do Briquete .....	65
4.3.1 Análise de densidade.....	65
4.3.2 Análise de porosidade .....	66
4.3.3 Análise microscópica .....	67
4.3.4 Análise de resistência à compressão .....	68
4.3.5 Análise de resistência ao impacto .....	69
4.3.6 Análise de resistência à penetração de água.....	69
4.4 Fabricação do Coque Metalúrgico .....	70
4.4.1 Forno piloto .....	70
4.5 Análise do Coque Metalúrgico .....	71
4.5.1 Análise de resistência à frio .....	71

4.5.2	Análise de resistência a quente e reatividade .....	72
4.5.3	Análise de expansão e contração.....	74
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	77
5.1	Resultado da Caracterização das Matérias-Primas .....	77
5.1.1	Análise física do carvão mineral .....	77
5.1.2	Análise química do carvão mineral e alcatrão .....	78
5.1.3	Análise petrográfica do carvão mineral .....	79
5.2	Resultado da Análise dos Briquetes.....	80
5.2.1	Análise de porosidade e microscópica dos briquetes .....	80
5.2.2	Análise de resistência mecânica dos briquetes.....	82
5.2.3	Análise termogravimétrica dos briquetes .....	86
5.3	Resultado da Análise do Coque Metalúrgico .....	87
5.3.1	Análise de DI ( <i>Drum Index</i> ).....	87
5.3.2	Análise de CRI ( <i>Coke Reactivity Index</i> ) .....	89
5.3.3	Análise de CSR ( <i>Coke Strength after Reaction</i> ).....	90
5.3.4	Quantidade de coque metalúrgico produzido.....	92
5.3.5	Pressão exercida pela mistura de carvões com briquetes sobre as paredes do forno de soleira aquecida.....	93
6	CONCLUSÕES .....	95
7	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....	96
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	97

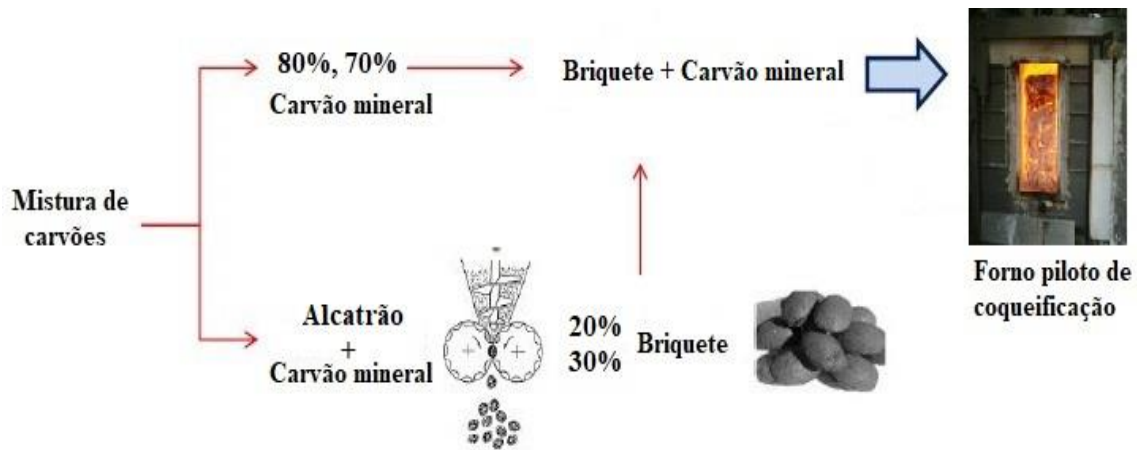
## 1 INTRODUÇÃO

O coque é o combustível sólido, derivado do carvão betuminoso que é um combustível fóssil não renovável, mais importante na siderurgia, sendo originado pelo aquecimento do carvão metalúrgico em câmaras hermeticamente fechadas, fora do contato com ar, ou seja, na ausência de oxigênio, sem combustão, fato este que provoca o desprendimento dos materiais voláteis, sendo composto pelo carbono fixo e pelas matérias inorgânicas do carvão. A qualidade do coque depende muito do carvão metalúrgico do qual se origina e para poder ser alimentado nos fornos siderúrgicos o coque precisa atender aos requisitos químicos, bem como possuir alta resistência ao desgaste e compressão (SILVA et al., 2011b). O aumento na qualidade do coque reduz o *coke rate*, com isso aumentando a produtividade dos altos-fornos e promovendo a redução de custo (FLINT, 1962; LIMA, 2016).

As novas tecnologias de produção do coque possuem o objetivo de aumentar a resistência mecânica do coque utilizando maior participação de carvões de baixo poder de coqueificação, com o intuito de reduzir o custo de fabricação e aumentar a qualidade físico-química do coque mesmo utilizando materiais baratos e de baixa qualidade. Isso se torna um desafio para a indústria que visa fabricar coque com boas características metalúrgicas utilizando baixas quantidades de matérias-primas de boa qualidade (SILVA et al., 2016; LIMA, 2016).

Com o intuito de aumentar a competitividade no setor siderúrgico, através da redução do custo da mistura de carvões e aumento na qualidade do coque e na produtividade dos fornos de coqueria, vários processos de adensamento de carga como a briquetagem, CMC, DAPS e *stamp charging* tem sido utilizada em grandes empresas principalmente na China, Índia e no Japão (JON e IDA, 1960; MONTIANO et al., 2014; LIMA, 2016; KATO et al., 2007; KUYUMCU e ABEL, 2011; MADIAS e CORDOVA, 2014). Além de outros processos como a vibro compactação, porém desenvolvido apenas em escala piloto (NASCIMENTO, 2016; ALVES, 2017).

A Figura 1.1 mostra o fluxograma da produção do coque metalúrgico através da inserção de briquetes como parte da carga do forno de coqueificação utilizado neste trabalho. Esta tecnologia de adensamento de carga utilizando briquetes de carvão mineral já é muito bem consolidada desde 1980 por grandes empresas como a Baosteel, na China, e JFE Steel, no Japão (SILVA et al., 2016).



**Figura 1.1:** Fluxograma da utilização parcial de briquetes na mistura da carga de carvão para produção de coque.

O aumento da densidade de carga proporciona o aumento da utilização de carvões *soft* e não-coqueificáveis, objetivando reduzir o custo de fabricação do coque e manter a qualidade igual ou superior ao coque produzido de forma convencional. A briquetagem parcial de carvões pode aumentar em até 15% na 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).

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 6mm, por meio da pressão exercida sobre esse material, fazendo uso ou não da mistura de aglomerante. 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 e é muito conhecida, com inúmeras indústrias operando, principalmente nos EUA e Europa (MUKHERJEE, 1940). As novas unidades de briquetagem de carvão estão localizadas nos 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).

A tecnologia de briquetagem de carvão por meio da prensa de rolo duplo foi principalmente desenvolvida para a utilização de finos de carvão provenientes dos processos. Este tipo de prensa oferece maior capacidade de produção em condições econômicas aceitáveis (DEHONT, 2006).

Briquetes são fabricados em diferentes formatos e tamanhos, essas variáveis influenciam diretamente em suas propriedades físicas. Os formatos podem ser do tipo retangular, cilíndricos, elipsoides que também são conhecidos como travesseiro, entre outros (RAHMAN et al., 1989).

Para o estudo deste trabalho, foi utilizado o formato em travesseiro devido ao menor desgaste que o briquete formado sofreria com o transporte e manuseio. E, também, de acordo com Rahman e outros (1989) briquetes no formato travesseiro possuem resistência mecânica semelhante em todas as diferentes dimensões do briquete.

Diversos tipos de ligantes podem ser utilizados como aglomerantes no processo de briquetagem, tais como amido de milho, silicato de sódio, cimento Portland, melão, água (KAMINSKI e PERUCH, 2011), alcatrão, betume, petróleo, piche, entre outros. A quantidade de aglomerante bem como a granulometria do carvão mineral deve ser rigorosamente estudada, pois influenciará diretamente na qualidade física e química do briquete produzido (JON e IDA, 1960; RUBIO et al., 1999 MONTIANO et al., 2014).

Um limite máximo de 30% de briquetes na carga de carvão mineral no forno de coqueria é considerado como ponto ótimo devido a redução na qualidade do coque fabricado e, também, ao aumento na pressão de expansão durante a carbonização, na qual poderia ocasionar em degradação da parede do forno de coqueria (JON e IDA, 1960; MONTIANO et al., 2014; LIMA, 2016).

Este trabalho possui uma resenha bibliográfica sobre o tema, apresentação da metodologia abordada, resultados, a sua discussão, conclusões e sugestões de trabalhos futuros. E, ainda, procurou mostrar a viabilidade química e física da utilização parcial de briquetes de carvão mineral de baixo poder coqueificante como parte da carga nos fornos, sobre o impacto na qualidade do coque e produtividade na coqueria. Proporcionando 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).

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Analisar a adição de briquetes na carga de carvão mineral sobre os parâmetros físico-químico-metalúrgicos para fabricação de coque metalúrgico, a fim de aumentar a participação de carvão mineral de baixo poder coqueificante.

### **2.2 Objetivos Específicos**

Analisar os impactos da quantidade da adição de alcatrão como material aglomerante na qualidade físico-química final do briquete produzido.

Avaliar o impacto do tempo de cura do briquete na resistência mecânica do mesmo.

Analisar a introdução de briquetes de carvão mineral com diferentes quantidades de alcatrão na carga de carvão para produção de coque.

Avaliar a resistência física e química dos diferentes coques produzidos.



### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta revisão mostra a prática de aglomeração de finos de carvão mineral através da briquetagem e seus benefícios.

#### 3.1 Carvão Mineral

O carvão mineral é um material rochoso não metálico, de cor que varia do preto ao marrom, com granulometria que varia entre 0 a 75mm e possui uma mistura complexa de substâncias orgânicas contendo carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, enxofre e outros elementos minoritários contendo uma densidade entre 850kg/m<sup>3</sup> e 1000kg/m<sup>3</sup> (FREITAS, 2015).

É altamente empregado pelas indústrias siderúrgicas, químicas e termoelétricas por liberar uma elevada quantidade de energia ao ser queimado, ou seja, possui elevado poder calorífico, que está intimamente relacionado ao teor de carbono fixo e de impurezas, o que determina a subdivisão do minério nas categorias de baixa qualidade (linhito e sub-betuminoso), composto por carvão com baixo teor de carbono fixo e elevado teor de impurezas, e de alta qualidade (hulha), composto por carvão com alto teor de carbono fixo e baixo teor de impurezas (FREITAS, 2015).

De acordo com o WCI 47% das reservas mundiais de carvão mineral são compostas por carvão de baixa qualidade e 53% por carvão de alta qualidade, como mostrado na Figura 3.1, sendo que a produção e a comercialização mundial concentram-se nas categorias intermediárias.

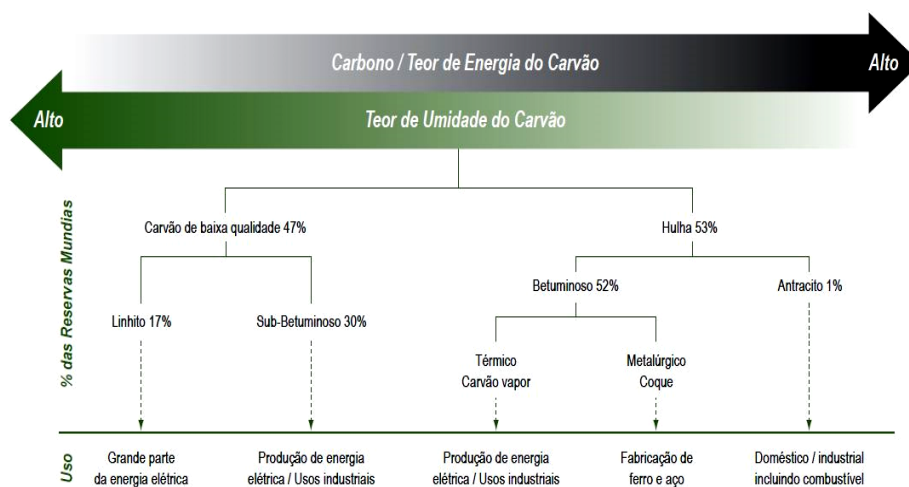


Figura 3.1: Tipos de carvão e usos (WCI, 2006).

O carvão mineral é considerado um combustível fóssil não renovável e de grande importância no mundo, sendo utilizado como fonte de energia, a sua geração tendo iniciado no Período Carbonífero com uma duração de 250 milhões de anos sob a pressão da terra sobre restos vegetais, em ambiente sem a presença de ar, podendo ser classificado em turfa, linhito, hulha e antracito conforme é mostrado na Tabela 3.1 (ULHÔA, 2003).

**Tabela 3.1:** Composição química dos combustíveis fósseis sólidos (ULHÔA, 2003).

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

A composição química elementar de cada tipo de combustível fóssil, na qual existe um aumento da concentração do carbono em função da diminuição dos teores de hidrogênio e oxigênio, processo esse denominado de carbonificação, devido a condições ambientais e da época de formação. Para que isso pudesse ocorrer, foram necessárias algumas condições geológicas como temperatura, pressão e tempo associados à deposição de sedimentos e fósseis orgânicos como raízes, troncos, folhas e galhos de árvores (ULHÔA, 2003).

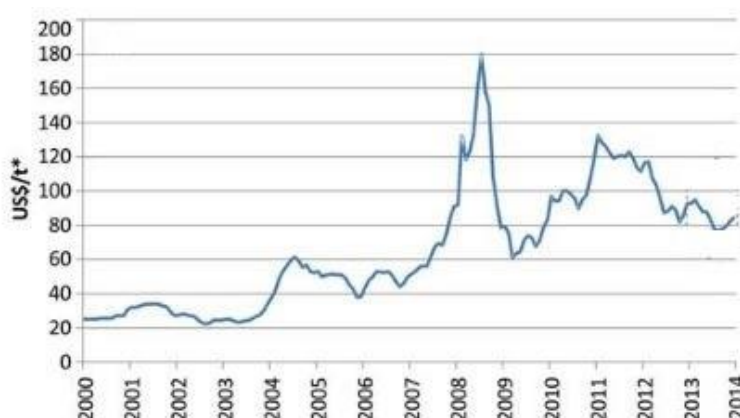
A principal base para a industrialização do mundo foi o carvão mineral, onde teve seu uso difundido como fonte de energia a partir do século XVIII, sendo uma das primeiras fontes de energia utilizada em larga escala pelo homem. As suas reservas podem ser encontradas em todos os continentes e em mais de 70 países (ARAÚJO, 2009), onde as maiores reservas de carvão mineral recuperáveis no mundo, totalizando em mais de 80%, se encontram na China, EUA, Austrália, Índia e Rússia (BARBOSA, 2015). As propriedades de alguns carvões internacionais são mostradas na Tabela 3.2.

**Tabela 3.2:** Propriedades químicas de alguns carvões internacionais (JUNIOR e ZANCAN, 2006).

Propriedades	Países			
	Austrália	África do Sul	Colômbia	EUA
<b>Poder Calorífico Superior (kcal/mol)</b>	5370	6760	7500	7053
<b>Umidade (%)</b>	6,9	4,3	4,5	5,0
<b>Voláteis (%)</b>	24,8	35,3	36,5	38,1
<b>Carbono (%)</b>	44,3	50,3	77,0	74,0
<b>Cinzas (%)</b>	24,0	10,1	3,0	13,0
<b>Enxofre (%)</b>	0,4	0,7	0,5	1,7

O Brasil está na 14<sup>o</sup> posição de maior reserva de carvão no mundo, sendo composta pelo carvão do tipo linhito e sub-betuminoso que são carvões de baixa qualidade (BARBOSA, 2015), contendo cerca de 3,2 bilhões de toneladas e com uma produção de 7 milhões de toneladas de carvão mineral por ano, segundo o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM, 2014). A região Sul do país detém mais de 90% das reservas nacionais (ARAÚJO, 2009).

O Brasil consome mais de 28 milhões de toneladas de carvão mineral por ano, cerca de quatro vezes mais que a quantidade produzida, isso se deve à quantidade de siderúrgicas no país que consomem cerca de 20 milhões de toneladas por ano e, também, devido a baixa qualidade do carvão mineral nacional, a qual é insuficiente para servir como matéria-prima para a produção de coque metalúrgico (DNPM, 2014). A variação do preço internacional do carvão mineral *premium* (australiano) é mostrada na Figura 3.2.



**Figura 3.2:** Variação do preço internacional do carvão mineral no período de 2000 a 2014 (DNPM, 2014).

O carvão mineral é uma rocha sedimentar originada de restos de plantas composta de macerais, minerais e água (ARAÚJO, 2009). Van Kreveln (1961) considera que os macerais são classificados em três grupos: Exinita, Vitrinita e Inertinita. Cada grupo pode ser agrupado devido à origem similar ou pelo modo de conservação de algas, esporos de plantas e resinas, sendo quimicamente ricos em hidrogênio (*apud* CASTRO et al., 2006).

No processo de carbonização do carvão mineral a Exinita desaparece com o aquecimento como matéria volátil e possui baixa moabilidade. Os macerais do grupo da Inertinita provém do tecido lenhoso das plantas, possuem alto teor de carbono fixo e baixo teor de matéria volátil e hidrogênio, não possuem poder coqueificante, são originados de material oxidado e não se modificam oticamente após a carbonização. A Vitrinita, também provém do tecido lenhoso das plantas, possui fusibilidade e alto poder coqueificante (SILVA, 2008).

### **3.2 Alcatrão**

O alcatrão é uma substância betuminosa, líquida, viscosa, de cor escura que varia do castanho escuro ao preto com reflexos esverdeados, espessa e de forte odor, considerado como resíduo, sendo composto por 4000 substâncias químicas, algumas dezenas delas carcinogênicas podendo causar obstrução dos pulmões e perturbações respiratórias, como os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, aminas aromáticas e compostos inorgânicos. O alcatrão de hulha, mostrado na Figura 3.3, é o mais conhecido e comercializado pelas indústrias que fabricam o coque, é obtido através da destilação seca do carvão mineral a altas temperaturas nas coquerias e ao passar por um processo de destilação fracionada dá origem a cinco frações que são o óleo leve, óleo médio, óleo pesado, óleo de antraceno e piche (FOGAÇA, 2015).



**Figura 3.3:** Alcatrão (FOGAÇA, 2015).

O alcatrão de hulha é obtido pelo processo de coqueificação nas coquearias onde neste processo o carvão enfiado é separado da matéria volátil durante a pirólise da hulha sem a presença de oxigênio. A matéria volátil é então condensada, se transformando em alcatrão e licor amoniacal (BIOMANIA, 2015).

O alcatrão possui cerca de 5% de umidade e 1% de sólidos em suspensão, chegando a ter uma densidade de  $1,18\text{g/cm}^3$ . De uma tonelada de hulha pode se obter cerca de 50kg de alcatrão (FOGAÇA, 2015).

Os derivados do alcatrão possuem amplo campo de aplicação em diversas áreas como na medicina, petroquímicas, indústrias farmacêuticas e cosméticas, chegando a um preço de R\$90,00 o litro (FOGAÇA, 2015). O seu principal derivado é o piche que serve tanto para a indústria civil na pavimentação de rodovias quanto para as indústrias de fabricação de eletrodo de alumínio (SCHWEITZER, 2006). O piche, assim como o alcatrão, funciona como ótimo ligante para briquetagem de carvão tendo como suas características químicas mostradas na Tabela 3.3.

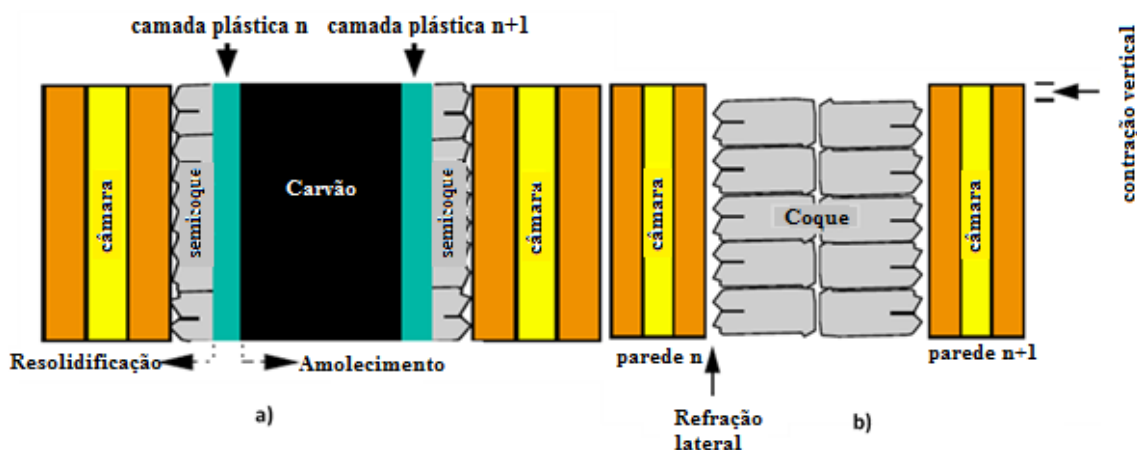
**Tabela 3.3:** Características químicas de um piche usado como material ligante (RUBIO et al., 1999).

<b>Temperatura de Amolecimento (°C)</b>	70,7
<b>Quinolina insolúvel (% em peso)</b>	8,0
<b>Tolueno insolúvel (% em peso)</b>	17,0
<b>Carbono Fixo (% em peso)</b>	45,1
<b>Cinzas (% em peso)</b>	0,12
<b>Enxofre (% em peso)</b>	0,42

### 3.3 Coqueificação

O coque metalúrgico é produzido num forno de câmara, que consiste de duas paredes verticais de aquecimento, feitas de tijolos refratários, com uma chaminé adjacente correspondente para cada uma das paredes. Uma carga de carvão betuminoso, também conhecido como carvão mineral, é carbonizada entre as paredes na ausência de oxigênio, provocando liberação de gases e o aparecimento de um resíduo sólido e poroso, denominado coque (SATO, 1999; SILVA, 2008). Apenas carvões que amolecem sob a faixa de temperatura de 350°C a 500°C podem ser usados para fabricar o coque metalúrgico (SATO, 1999).

A produção de coque se dá através do carregamento da mistura de diferentes carvões minerais, com diferentes quantidades de materiais voláteis, pelo topo do forno vertical convencional, sendo carregado por gravidade. Entre as paredes opostas do forno, se localizam as câmaras de combustão, na qual passam os gases de combustão, fazendo com que a temperatura das paredes chega a uma faixa de temperatura entre 1100°C a 1350°C. A carga de carvão é então aquecida por transferência de calor a partir das paredes do forno até o centro do mesmo. O processo de carbonização é finalizado quando o centro do forno chega a temperatura acima de 1000°C. A Figura 3.4 mostra o comportamento da carga durante a coqueificação (ULHÔA, 2003; COSTA, 2008; SATO, 1999).



**Figura 3.4:** Comportamento da carga de carvão mineral no processo de coqueificação (ULHÔA, 2003).

O processo de coqueificação se inicia com a pirólise, ou decomposição térmica, que pode ser dividida em três etapas.

A primeira etapa ocorre até a temperatura de 350°C, na qual é caracterizada pela perda de umidade, temperaturas na faixa de 100°C a 120°C e início da desvolatilização primária, temperaturas próximas de 350°C (JÜTGEN, 1984; KOCH et al., 1995; COSTA, 2008; LIMA, 2016).

A segunda etapa ocorre entre temperaturas da ordem de 350°C a 500°C, com liberação de hidrocarbonetos pesados e alcatrão. Nesta etapa o material se torna fluido e pastoso que envolve as partes que ainda estão sólidas, sendo denominada de etapa plástica ou fluidez. Esta etapa pode ser dividida em quatro fenômenos: o fenômeno do amolecimento, sendo considerado um processo puramente físico, correspondendo a fusão de um material termoplástico e independente da pirólise; formação de alcatrão; volatilização de parte do alcatrão e a dissolução do carvão mineral durante a etapa de carbonização (JÜTGEN, 1984; KOCH et al., 1995; ULHÔA, 2003; COSTA, 2008; SILVA, 2008; LIMA, 2016).

A última etapa ocorre em temperaturas acima de 500°C podendo chegar a temperaturas superiores a 1000°C. Nesta etapa o fluido pastoso continua a perder matéria volátil e começa o processo de ressolidificação, temperaturas próximas a 700°C, formando uma massa plástica que se converte irreversivelmente ao estado sólido, o semicoque. Na temperatura acima de 950°C, ocorre a fase plástica do material, com a dilatação da massa do material causada pela resistência oferecida a liberação dos gases, provocando pressões nas paredes do forno da coqueria, e depois a contração da massa, seguida da perda de peso e aumento da densidade (JÜTGEN, 1984; KOCH et al., 1995; ULHÔA, 2003; COSTA, 2008; SILVA, 2008; LIMA, 2016).

A fase plástica no processo de coqueificação possui uma forte dependência da petrografia do carvão mineral, sendo maior quanto menor a porcentagem em peso de vitrinita (SILVA, 2008). Esta fase pode ser dividida em dois tipos de reações. O primeiro tipo de reação denomina-se craqueamento, que consiste em produzir polímeros de cadeias menores que os existentes na carga inicial de carvão mineral. Essa redução se dá diante da ruptura de ligações carbono-carbono. Essa ruptura faz com que haja uma saturação de radicais, necessitando de hidrogênio, que será suprido pelo outro tipo de reações (LOISON et al., 1989; COSTA, 2008).

O outro tipo de reações são reações de aromatização e condensação na qual liberam o hidrogênio e levam a formação do resíduo de carbono sólido. Essas reações são



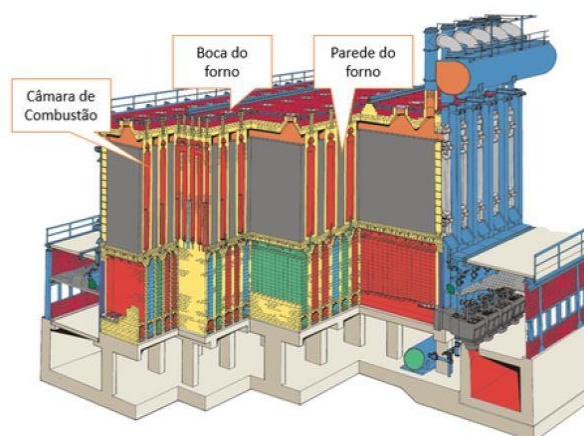
responsáveis por formar grupos de cadeias aromáticas maiores e com anéis saturados, a desidrogenação dos anéis e a recombinação dos grupos aromáticos (LOISON et al., 1989; COSTA, 2008).

### 3.4 Parâmetros que Influenciam nas Propriedades do Coque Metalúrgico

Existem três principais parâmetros que influenciam nas propriedades do coque produzido nos fornos da coqueria que são: largura dos fornos, velocidade de coqueificação e granulometria da matéria-prima enforada.

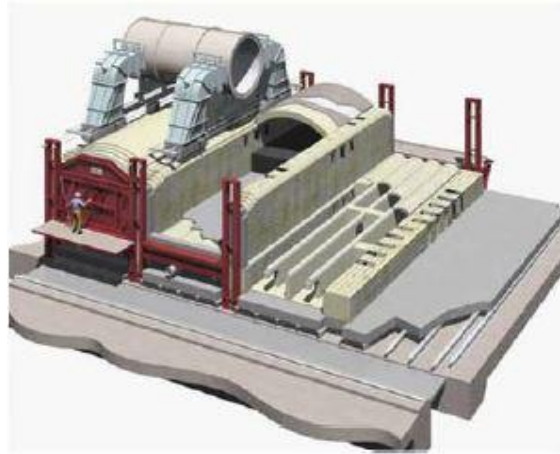
#### 3.4.1 Largura e tipo dos fornos da coqueria

Existem no mundo dois principais tipos de fornos para a produção de coque metalúrgico. O mais convencional é do tipo *by-product*, em fornos verticais, Figura 3.5, e o segundo tipo é o *heat recovery/non recovery*, Figura 3.6.



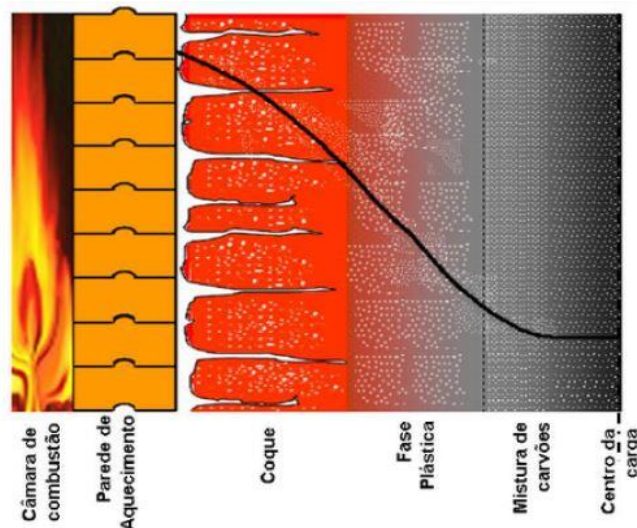
**Figura 3.5:** Desenho esquemático de um forno convencional do tipo *by-product* (LIMA, 2016).

O coque produzido em fornos do tipo *heat recovery/non recovery*, Figura 3.6, possuem qualidade superior ao coque produzido em fornos do tipo *by-product* quando se utiliza misturas de carvões americanos como matéria-prima. Porém, quando se utiliza carvões de diversas origens esta qualidade superior ao coque não é significativa (VALIA et al., 2008).



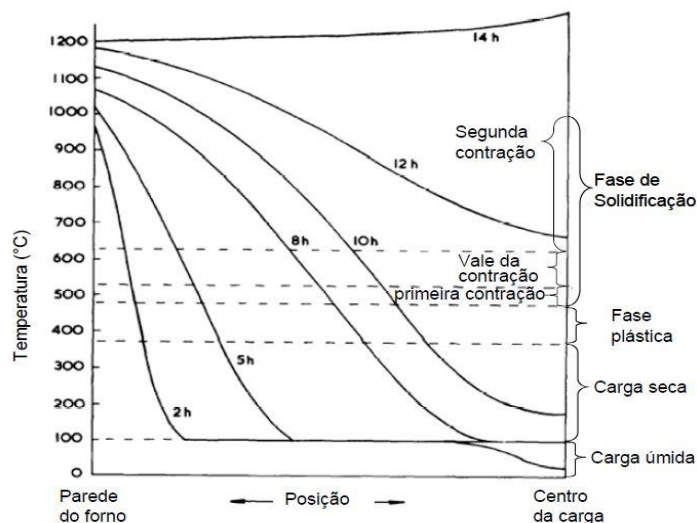
**Figura 3.6:** Desenho esquemático de um forno *heat recovery* (VALIA et al., 2008).

A coqueria convencional do tipo *by-products* é constituída de fornos verticais no formato paralelepípedo de 3 a 7m de altura, 11 a 15m de comprimento e 300 a 550mm de largura (SILVA, 2008). A dinâmica da transferência de calor no interior dos fornos da coqueria ocorre pela forma de condução, convecção e radiação (LOISON et al., 1989). A transferência de calor ocorre no sentido da parede para o centro da largura do forno, com isso pode-se correlacionar a largura dos fornos com a taxa de aquecimento, sendo a taxa de aquecimento maior nas partes mais próximas as paredes do forno (MERRICK, 1983). A Figura 3.7 é um esquema do avanço da frente de queima que ocorre durante o processo de coqueificação, na qual, de acordo com Merrick (1983), é influenciado, diretamente, pela largura dos fornos.



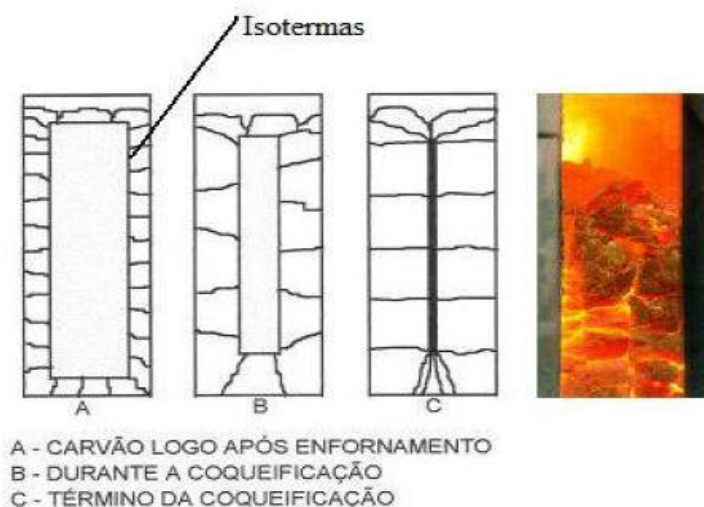
**Figura 3.7:** Esquema do avanço da frente de queima no processo de coqueificação (VIANA, 2007).

Na Figura 3.8 é possível observar a distribuição da temperatura ao longo da largura do forno de acordo com o decorrer das etapas do processo de coqueificação.



**Figura 3.8:** Perfil de temperatura da carga de carvão enforada no interior do forno (MERRICK, 1983).

O processo de coqueificação é finalizado após o encontro das frentes plásticas, Figura 3.9, que significa o avanço das isothermas da extremidade das paredes do forno até o centro da carga, a velocidade desse avanço é chamada de *coking-rate*. O material situado entre as isothermas forma uma camada de 15mm de espessura, constituindo o “envelope plástico”, a partir daí o processamento das reações de desidrogenação e condensação transformam o semicoque em coque. O tempo total do processo dura em média de 13 a 24 horas, na qual depende fortemente da largura do forno, além da temperatura de operação e densidade da carga (SILVA, 2008).



**Figura 3.9:** Demonstração do avanço das frentes de queima no processo de coqueificação (CALDEIRA, 2003).

Quanto maior a largura do forno, menor rank os carvões minerais necessitam ter para obter um coque de boa qualidade. A largura influencia diretamente no índice de fissuração do coque metalúrgico produzido, na qual, quanto maior o volume do coque, menor é a força que atua no mesmo (MERRICK, 1983).

### **3.4.2 Velocidade de coqueificação**

A velocidade de coqueificação está relacionada com a plasticidade da mistura a coqueificar, pois o aumento da taxa de aquecimento está ligado a fluidez do carvão e o intervalo da zona plástica. A fluidez do carvão deve ser capaz de permitir o inchamento da carga, eliminar gases condensáveis e não condensáveis e ocupar os interstícios entre os grãos de carvão mineral a fim de formar pontes de união para aglomeração da carga (MERRICK, 1983).

Uma carga que possui boa fluidez e uma zona plástica mínima, suficiente para uma boa aglomeração da carga, está relacionada com o intervalo plástico, que é uma consequência do tempo de coqueificação que a mistura permanece no interior do forno. A umidade também faz com que o tempo de permanência da mistura no forno da coqueria aumente, e conseqüentemente a velocidade de coqueificação será menor, com isso há um possível aumento nas fissuras do coque gerado (MERRICK, 1983).

A porosidade entre as fases da coqueificação (granular, plástica e semicoque) é importante para a transferência de calor, que ocorre pela forma de condução pelas partículas, convecção pelos gases formados e pela radiação entre os interstícios, poros e trincas (MERRICK, 1983).

### **3.4.3 Granulometria dos carvões minerais**

A granulometria do carvão mineral para a produção de coque metalúrgico deve ser controlada rotineiramente pelo controle de qualidade das matérias-primas da coqueria, pois de acordo com Ulhôa (1988) uma granulométrica adequada e constante influi positivamente na resistência mecânica e na homogeneidade do coque, acarretando em um rendimento positivo para o alto-forno e redução do *coke rate*.

Carvões minerais que apresentam faixas granulométricas inferiores a 0,15mm após uma britagem possuem maior teor de macerais, vitrinitas e exinitas (SILVA et al., 2011a). Em contra partida, carvões minerais com faixas granulométricas maiores possuem elevada

dureza e parte inerte, acarretando em menor velocidade de contração do material, gerando tensões ao seu redor que não conseguem ser absorvidas pelo conjunto e gera uma série de fissuras no coque (CLARKE e MARSH, 1989a; SILVA et al., 2011a).

O percentual de carvão abaixo de 0,15mm não deve ser superior a 13% da carga, pois o mesmo contribui para formação de carbono no interior dos fornos e tubos da coqueria, além de não possuírem grande poder de inchamento e fluidez (SILVA et al., 2011a).

### **3.5 Funções do Coque Metalúrgico no Alto-Forno**

Segundo Sato (1999), Díez e outros (2002), Carneiro (2003) e Casagrande (2010), no alto-forno, o coque tem de cumprir três principais funções: térmica, química e física.

O coque metalúrgico fornece cerca de 80% do calor requerido pelo processo, caracterizando assim a sua função térmica como combustível (SATO, 1999; DÍEZ et al., 2002; CARNEIRO, 2003; CASAGRANDE, 2010).

Devido a sua grande quantidade de carbono, o coque é uma fonte necessária para a produção de monóxido de carbono (gás de redução) por combustão nas ventaneiras, é utilizado para a regeneração parcial do CO pela reação de perda de solução, atua como um redutor para a redução direta do FeO na escória líquida e para a redução dos elementos de liga como o silício e o manganês, e também atua como elemento de liga para a carburação do metal quente (SATO, 1999; DÍEZ et al., 2002, CASAGRANDE, 2010).

Em sua função física, o coque possui algumas finalidades tais como suportar grande parte do peso da carga do alto-forno e fornecer o meio permeável (coluna de gotejamento) que permite uma percolação adequada dos gases ascendentes e descida do ferro gusa/escória para o cadinho (SATO, 1999; DÍEZ et al., 2002, CASAGRANDE, 2010).

A resistência física e a reatividade do coque são medidas através do CRI (*coke reactivity index*), CSR (*coke strength after reaction*) e do DI (*Drum index*). Essas análises possuem a função de medir a variação do *coke rate*, como mostrado na Figura 3.10, e também os riscos de engaiolamentos e arreamentos de carga (FLINT, 1962).

Propriedade mecânica	Impacto operacional	Efeito negativo	Risco
CRI – Reatividade	Coque com alta reatividade acelera a redução de granulometria em contato com CO <sub>2</sub> , piorando a permeabilidade da carga na zona granular e cadinho	+1% CRI  +2 kg/t coke rate	Engaiolamento e arreamentos de carga
CSR – Resistência a quente após reação com CO <sub>2</sub>	Coque com baixa resistência a quente acelera a redução de granulometria em contato com CO <sub>2</sub> , piorando a permeabilidade do cadinho e fragilizando a estrutura de sustentação da carga	-1% CSR  + 2 kg/t coke rate	Engaiolamento e arreamentos de carga
DI – Resistência mecânica a frio	Coque com baixa resistência mecânica a frio reduz a granulometria durante o manuseio e possui alta fragilidade para sustentação da coluna de carga no interior do alto-forno	-1% DI  +5 kg/t coke rate	Engaiolamento e arreamentos de carga

**Figura 3.10:** Tabela de Flint para correlação dos parâmetros de resistência física e da reatividade do coque com o *coke rate* (adaptado de FLINT, 1962).

Entre as três funções do coque no alto-forno, a função física é considerada a mais importante, uma vez que nenhum outro material possui propriedades mecânicas suficientes para substituir o coque a um custo aceitável (SATO, 1999).

### 3.5.1 Indicadores de Qualidade do Coque Metalúrgico para Uso em Alto-Forno

Os testes de resistência física do coque são de suma importância para a sua utilização como material redutor e energético no alto-forno, pois o coque é degradado na região da baixa cuba e na rampa do alto-forno. Diante disso é levada em consideração a reatividade do coque (CRI), a resistência física após a reação com o CO<sub>2</sub> (CSR) e a resistência física a frio (DI) (CASAGRANDE, 2010).

O coque de alta reatividade (CRI<25%) pode acarretar em maior geração de finos, granulometria menor que 13mm, prejudicando a permeabilidade do forno e originando problemas como engaiolamento e arreamento de carga (FLINT, 1962; NOMURA et al., 2007; CASAGRANDE, 2010).

Os fatores que afetam a reatividade do coque (CRI) são a estrutura (tamanho e espessura dos poros), textura (formas do carbono) e composição química da cinza. A velocidade de reação do coque está intimamente ligada a sua estrutura porosa e com a energia de ativação (SERVICES, 2003).

A resistência mecânica a quente do coque (CSR) é também muito importante para a sua avaliação de qualidade a fim de evitar problemas com a permeabilidade do leito do alto-forno que geram custo e aumento no tempo de produção.

Diversos parâmetros afetam a resistência a quente do coque após a reação com o CO<sub>2</sub>. De acordo com Casagrande (2010), a granulometria e as características físicas e químicas do carvão mineral, densidade de carga, temperatura e tempo de coqueificação são parâmetros que influenciam no CSR do coque. Utilização de carvões de baixo poder coqueificante e a sua estrutura porosa também são fortes parâmetros que influenciam na resistência a quente do coque.

### **3.6 Tecnologias para Aumento de Densidade de Carga nos Fornos da Coqueria**

Como alternativa ao processo de coqueificação convencional, vários processos de aprimoramento dos fornos da coqueria e dos processos de fabricação do coque têm sido estudados.

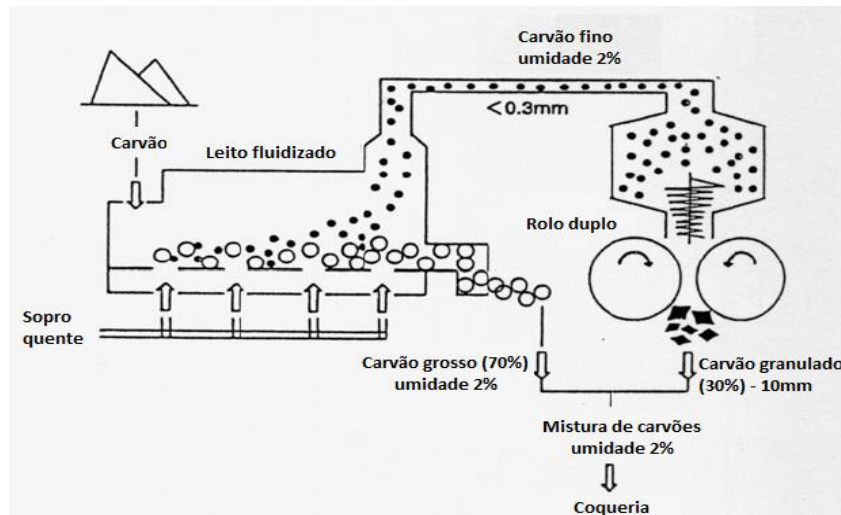
A Nippon Steel, empresa japonesa, desenvolveu com sucesso processo de carregamento a seco do carvão mineral como o CMC (Coal Moisture Control) e DAPS (Dry-Cleaned and Agglomerated Precompaction System). Um sistema CMC é uma planta para secar o carvão mineral em um leito fluidizado, na qual a umidade é reduzida para aproximadamente 5% em massa e o DAPS em até 2% em massa, na qual a redução da umidade leva ao aumento de densidade aparente do carvão (KATO et al., 2007; NIPPON STEEL e SUMIKIN ENGINEERING, 2017).

Uma maior densidade aparente de carvão carregado permite que a quantidade de carvão que é carregado seja aumentada. Além disso, o carvão seco permite reduzir o tempo necessário para que a umidade remanescente seja evaporada, a carbonização é completada em um tempo menor. Tanto uma densidade aparente aumentada quanto o tempo de carbonização reduzido permitem aumentar a produção de coque por unidade de tempo (KATO et al., 2007; NIPPON STEEL e SUMIKIN ENGINEERING, 2017).

O carregamento de carvão mineral seco em um forno de coqueria permite, também, reduzir o teor de calor de carbonização para evaporar a umidade contida no carvão mineral, com isso gerando economia de energia (KATO et al., 2007).



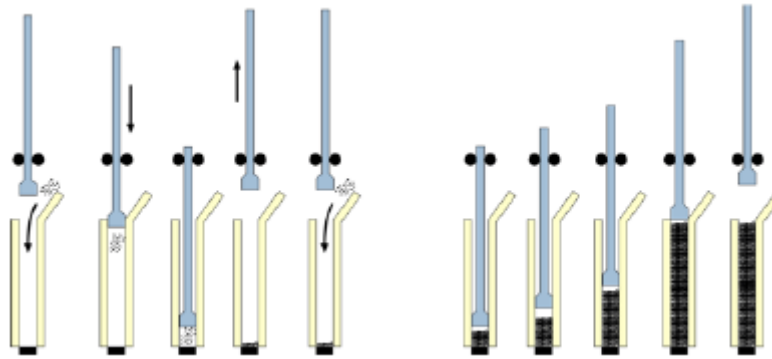
No processo do DAPS o carvão é seco em um secador de leito fluidizado e, em seguida, o carvão fino menor que 0,3 mm é separado por um ciclone à saída do secador de leito fluidizado e depois aglomerado por um compactador de rolos. A proporção de carvão fino aglomerado pelo compactador de rolos é cerca de 30% em massa de carga de carvão. Depois disso, o carvão fino aglomerado é adicionado ao carvão grosso e carregado nos fornos da coqueria, como mostrado na Figura 3.11 (DÍEZ et al., 2002; KATO, 2007; NIPPON STEEL e SUMIKIN ENGINEERING, 2017).



**Figura 3.11:** Esquema do processo DAPS (adaptado de KATO, 2007).

O *stamp charging* é outro processo que visa o adensamento da carga de carvão mineral nos fornos da coqueria. Várias empresas como a Tata Steel, Sesa Goa, Bla, JSW Steel, ZKS, ThyssenKrupp (CSA), entre outras ao redor do mundo adotaram em suas plantas siderúrgicas o processo de *stamp charging*. O *stamp charging* consiste na introdução da mistura de carvão mineral previamente moída em um tamanho específico, dentro de uma caixa de aço, com três camadas sucessivas que são empurradas mecanicamente. O processo pode ser aplicado verticalmente ou horizontalmente e podem-se aplicar vibrações para melhor acomodação e compactação da carga (MADIAS e CÓRDOVA, 2013).

A Figura 3.12 mostra, através de um esboço, a sequência de carregamento, pressão e novo carregamento no processo de *stamp charging*.



**Figura 3.12:** Esboço do processo de *stamp charging* vertical (MADIAS e CÓRDOVA, 2013).

A densificação e as propriedades mecânicas são aspectos importantes no processo de *stamp charging*, pois quanto mais denso for o bolo de carvão mineral, melhor é a qualidade física do coque e maior será a produção. As propriedades mecânicas devem ser suficientes para suportar o transporte do bolo de carvão mineral e preenchimento do forno da coqueria (KUYUMCU e ABEL, 2011).

Alguns estudos recentes por Nascimento (2016) e Alves (2017), em escala piloto, apontaram o uso de um vibrador de imersão, Figura 3.13, a fim de promover um aumento na densidade de carga através da vibro compactação, na qual foi possível um aumento de até 28%.



**Figura 3.13:** Vibrador de imersão (NASCIMENTO, 2016).

A vibro compactação se dá através do uso de um motor acionado por gatilho com uma extremidade própria para o encaixe de uma mangueira flexível que apresenta uma ponta metálica com um peso excêntrico que ao rotacionar vibra e transmite ondas de compressão

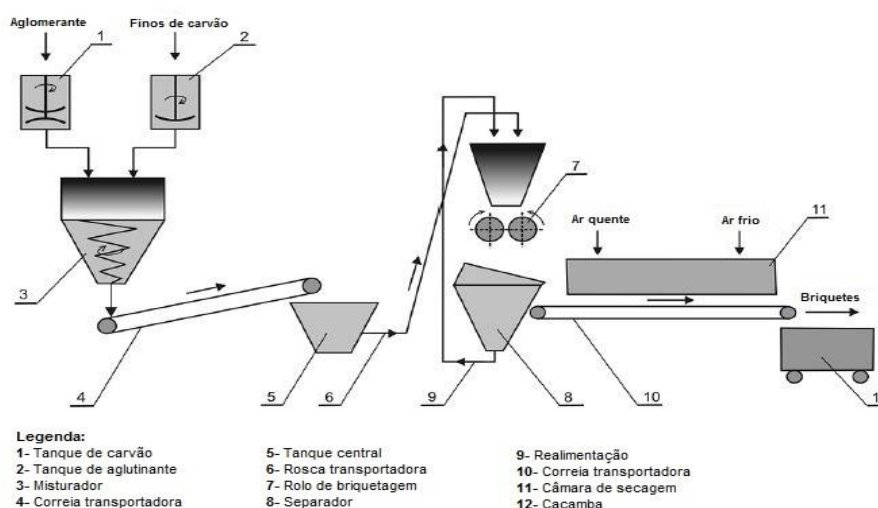
e tração. A vibro compactação se inicia juntamente com o carregamento da carga de carvão a fim de promover a compactação e adensamento dos espaços vazios dentro do forno.

### 3.7 Briquetagem

A Briquetagem de carvão é uma das aplicações mais antigas do processo de aglomeração, este processo consiste na aglomeração de partículas finas em prensas utilizando uma pressão externa elevada (DEHONT, 2006). Os processos de briquetagem nas quais podem ser utilizados para este fim são por extrusão contínua em máquinas do tipo maromba, em prensas hidráulicas e em prensa de rolos, sendo o último o mais utilizado para este processo (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).

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 3.14 mostra o diagrama de linha usado para a briquetagem.



**Figura 3.14:** Fluxograma do processo de briquetagem (Adaptado de BOROWSKI e HYCENAR, 2013).

### **3.7.1 Etapas da briquetagem**

Em estudos e pesquisas desenvolvidas pela Sahut-Conreur S.A., em 2006, DEHONT, propôs que uma planta de briquetagem de carvão deveria incluir uma triagem e unidade de cominuição se o material estiver com uma granulometria superior a 6mm, uma unidade de secagem para diminuir o teor de umidade do carvão, uma unidade misturadora para misturar o carvão e o aglutinante, uma unidade de briquetagem com uma prensa de rolo duplo e uma unidade de tratamento térmico do briquete a fim de acelerar o processo de cura do mesmo.

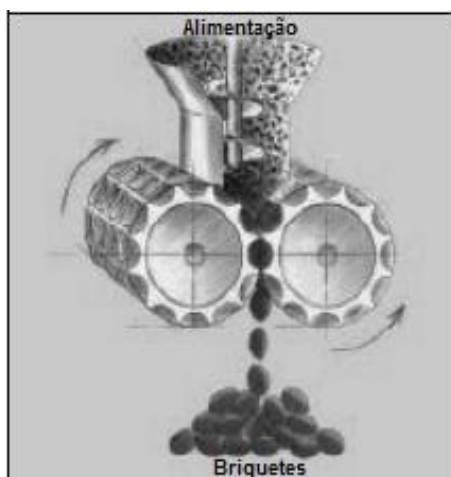
A primeira etapa da briquetagem consiste na preparação do material que inclui a determinação das características do carvão como a umidade, a superfície específica e a análise granulométrica (CARVALHO e BRINCK, 2004).

Para briquetagem de carvão mineral, a mistura deve conter no máximo 20% das partículas menores que 0,5mm e 5% de partículas menores que 0,09mm e o teor de umidade abaixo de 2,5%, pois quanto menor o teor de umidade menor o tempo de cura do material e menor o gasto de energia para eliminação dessa umidade nos fornos da coqueria (CARVALHO e BRINCK, 2004).

A segunda etapa é a de mistura de aglutinante juntamente com o carvão. Essa é a etapa mais importante da briquetagem na qual consiste de um misturador que deverá ser dimensionado de acordo com o seu material de modo que a carga não fique submetida a um tempo muito elevado nesse equipamento.

O aglutinante deve ser distribuído uniformemente por toda a superfície do material a ser briquetado. Alguns tipos de aglutinantes precisam de um tratamento térmico, na qual pode ser feito fora ou dentro do próprio misturador. Como exemplo, para briquetagem de carvão utilizando alcatrão como aglutinante, a temperatura de descarga da mistura deve apresentar uma temperatura em torno de 70°C. A qualidade do briquete é fortemente dependente da quantidade e do tipo de aglutinante, por isso, os mesmos devem ser devidamente estudados (LUZ et al., 2010). De acordo com Carvalho e Brinck (2004), quanto menor a quantidade de partículas finas menor será a quantidade de aglutinante a ser utilizada.

A terceira etapa, que é a compactação ou briquetagem do material, se dá na prensa de rolo duplo mostrado na Figura 3.15, no espaço existente entre os dois rolos da máquina de briquetagem que ficam girando com velocidade de rotação igual e em sentidos contrários (CARVALHO e BRINCK, 2004).



**Figura 3.15:** Esquemático de uma prensa de rolo duplo (LUZ et al., 2010)

É muito importante que os parâmetros operacionais de briquetagem sejam avaliados, pois cada tipo de material e equipamento pode exigir uma carga diferente (BAYUL, 2012).

A pressão exercida sobre o material cresce de forma progressiva ao longo do segmento do rolo, atingindo o valor máximo no ponto de menor distância entre eles, caindo até a liberação e saída do aglomerado. No caso de produtos obtidos em equipamentos do tipo tiras, como o coque, são removidas horizontalmente podendo alimentar diretamente os fornos, observando um ganho na eficiência térmica do processo, devido à redução das perdas com partículas finas e redução do impacto ambiental devido à eliminação de material particulado (CARVALHO e BRINCK, 2004).

Materiais que possuem resistência mecânica elevada precisam de um pré-aquecimento antes da etapa de compactação a fim de alcançar o regime plástico do material a ser briquetado. A temperatura de pré-aquecimento pode chegar a valores de 1000°C, como no caso de alguns minérios e resíduos metálicos e a pressão exercida para a briquetagem é de aproximadamente 294MPa (CARVALHO e BRINCK, 2004).

A quarta etapa consiste na secagem ou tratamento térmico do briquete, que pode se dar à temperatura ambiente, em secadores a uma temperatura em torno de 400°C ou em fornos com temperatura acima de 1000°C. Briquetes quando secados a temperatura

ambiente possuem resistência mecânica menor que briquetes secados em temperaturas superiores, na qual pode promover a recristalização do briquete, com isso aliviando as tensões internas (LUZ et al., 2010).

### 3.7.2 Objetivo e vantagens

Através da briquetagem é possível obter briquetes de carvão resistentes e compactos, e ter um bom aproveitamento das pequenas frações de carvões não-coqueificáveis de baixo valor econômico (CLARKE e MARSH, 1989b), além de facilitar o manuseio (PEREIRA, 2009), transporte e armazenamento (KOMAREK, 1991).

O briquete de carvão mineral é o mais produzido no mundo e pode ser introduzido na coqueria em até 30% da carga total de carvão e com uma densidade superior a carga, levando a um rendimento superior do coque (DEHONT, 2006).

No entanto, briquetes introduzidos na carga de carvão mineral podem influenciar o fluxo do processo tradicional de coque, e podem diminuir a qualidade do coque obtido e causar efeitos imprevisíveis refletindo em mudanças volumétricas da carga de carvão (ZUBKOVA et al., 2014).

A presença dos briquetes na carga facilita o desenvolvimento da não homogeneidade da estrutura porosa. Poros maiores são formados no carvão briquetado, isso se deve ao fato dos processos de deslocamento da massa não volátil não ter lugar na camada plástica da mistura devido à falta de deslocamento do material amassado (ZUBKOVA et al., 2014).

De acordo com Grandin (1994), Zubkova e outros (2014) e Lima (2016), em síntese, a briquetagem de carvão mineral tem por objetivo a realização dos seguintes objetivos:

- Aumento da densidade da carga para os fornos da coqueria, gerando aumento na produção;
- A criação de um bom combustível e resistente mecanicamente, com isso, reduzindo o *coke rate*;
- Utilização de carvões de baixa qualidade (carvões *soft*).

Na mineração de carvão metalúrgico e nas indústrias siderúrgicas, gera-se uma grande quantidade de particulados que poderiam ser recuperados para produção de briquetes de qualidade superior ao carvão (GRANDIN, 1994).

A utilização de briquetes de carvão mineral com uma densidade maior que o resto da carga de carvão, para a introdução nos fornos da coqueria, gera um aumento na produção do coque (ZUBKOVA et al., 2014).

### **3.7.3 Conceitos e princípios**

O conceito de aglomeração é o termo empregado para designar operações aplicadas a materiais de granulometria fina, para transformá-los em corpos maiores dando forma e tamanho adequados ao uso, ou seja, é um ato ou efeito de juntar os materiais por meio da ligação rígida e consolidação de suas partículas, através de mecanismos físicos e/ou químicos fazendo com que haja uma maior concentração de energia por unidade de volume (CARVALHO e BRINCK, 2004).

A granulometria fina, no beneficiamento convencional de carvão mineral, ou seja, as partículas com tamanho inferior a 0,6mm e o aproveitamento deste material se dá através da aglomeração ou reutilização destas partículas de forma adequada (LUZ et al., 2010).

O material ligante, que também é chamado de aglomerante ou aglutinante, é um material geralmente pulverulento que tem a finalidade de aglutinar outros materiais, ou seja, agregar os grãos de agregados inertes, influenciando na resistência físico-mecânica do material resultante (TAYLOR e HENNAH, 1991).

Uma teoria para explicar o fenômeno da briquetagem é descrita por Lowry em 1962 (*apud* ELLISON e STANMORE, 1981a) onde a união das partículas é fortemente influenciada pela força de atração molecular de Van der Waals que são também denominadas de interações fracas. Contudo, Iyengar (*apud* ELLISON e STANMORE, 1981a) afirma ter demonstrado conclusivamente que as ligações de hidrogênio são responsáveis pela resistência do briquete. Porém, só se tornam efetivas quando é aplicada uma elevada pressão externa a fim de promover a ligação entre as partículas obtendo uma resistência mecânica ideal para uma aplicação posterior (LUZ et al., 2010).

Os carvões contêm grupos funcionais alcoólicos e ácidos que podem formar pontos de fixação para as moléculas de água para conectar partículas adjacentes. O modelo da ligação de hidrogênio se aplica a teoria do ponto ótimo, quando pouca água estiver presente o número de pontes é reduzido, ao passo que o excesso de água produz efeitos de solvatação, através da qual um grande número de moléculas associada a cada grupo funcional resultam em resistências mais baixas e conseqüentemente briquetes mais fracos (ELLISON e STANMORE, 1981a).

### **3.8 Parâmetros que Influenciam nas Propriedades dos Briquetes**

O conceito de qualidade dos briquetes sempre foi entendido como a resistência mecânica, isto é, a resistência dos briquetes à abrasão, ao esmagamento, à tração, à água, ao transporte e manuseio. Existem vários parâmetros e fatores que influenciam na qualidade física e química dos briquetes, tais como granulometria do material, porosidade do briquete, temperatura de briquetagem e o uso do material ligante.

#### **3.8.1 Granulometria da matéria-prima**

O tamanho das partículas da matéria prima, ou seja, a granulometria é um fator importante que não só influencia na aglomeração das partículas, mas também nas propriedades físico-mecânicas e na carbonização do briquete. A seleção da matéria prima é muito importante para fabricação de briquetes de antracito e semi antracito. (CLARKE e MARSH, 1989a).

É bem conhecido que tamanho de partículas mais finas produzem um briquete de melhor qualidade (ELLISON e STANMORE, 1981a). Entretanto, aumentam significativamente a área de superfície do mesmo a ser umedecido pelo aglomerante (CLARKE e MARSH, 1989a), o que pode vir a necessitar do uso de maior quantidade de aglomerante, caso a briquetagem necessite de aglomerante, para obter uma melhor resistência mecânica (PEREIRA, 2009).

Trommer em 1976 (apud ELLISON e STANMORE, 1981a) relatou que a distribuição do tamanho de partícula assim como o tamanho de partícula é um parâmetro importante. Uma relação de Gaudin-Schumann expressa pela Equação 3.1, mostra a distribuição granulométrica para a fabricação de briquetes:



$$Q(d) = \left(\frac{d}{d_{max}}\right)^m \quad (3.1)$$

em que  $Q(d)$  é a distribuição cumulativa no tamanho  $d$ ,  $d_{max}$  é o diâmetro das maiores partículas presentes e  $m$  dá uma medida da “dispersão” de tamanho. Trommer descobriu que um valor intermediário de dispersão igual a 0,6 obtém os maiores pontos fortes e explica esse resultado devido ao preenchimento dos interstícios com partículas superfinais para dar o máximo contato superficial entre as partículas. Industrialmente o carvão britado é peneirado para remover tamanhos superiores a 4mm, e mais de 50% da carga deve ser menor do que 1mm (ELLISON e STANMORE, 1981a).

A granulometria juntamente com a pressão exercida influencia na densidade relativa aparente e na resistência à compressão do briquete, devido a maior massa no mesmo volume (PEREIRA, 2009). Com isso, uma variedade de tamanhos de partículas, abaixo de 6mm, de diferentes tipos de carvões deve ser utilizado, respeitando alguns limites de granulometrias ultra finas de no máximo 5% (CLARKE e MARSH, 1989a).

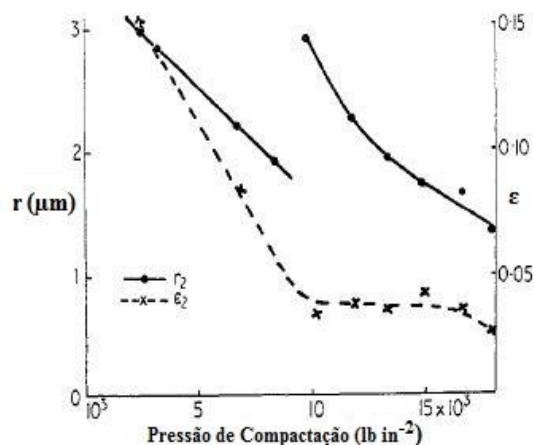
A adição de *coke breeze*, embora seja desejável economicamente, diminui a resistência mecânica e a densidade do briquete, pois aumenta a quantidade de poros do mesmo (CLARKE e MARSH, 1989a).

### 3.8.2 Porosidade

De acordo com Dollimore e outros (1963), a porosidade do briquete ( $\epsilon$ ) é definida como os espaços vazios através dos quais o escoamento dos gases acontece e pode ser definida segundo a Equação 3.2, onde  $\rho_b$  é a densidade aparente do briquete e  $\rho$  é a densidade da partícula que deu origem ao briquete.

$$\epsilon = 1 - \frac{\rho_b}{\rho} \quad (3.2)$$

No momento da briquetagem, quanto maior a pressão exercida na máquina seja de rolo duplo ou maromba, menor será a quantidade e o raio dos poros no briquete, como mostrado na Figura 3.16 (DOLLIMORE et al., 1963).



**Figura 3.16:** Efeito da pressão de compactação sobre a porosidade e o raio médio do poro no briquete (Adaptado de DOLLIMORE et al., 1963).

A granulometria das partículas de carvão e a força de prensagem são influenciadores significativamente importantes na resistência à abrasão (KALIYAN e MOREY, 2009), resistência à tração, resistência à compressão e também na densidade relativa aparente do briquete (BORGHI, 2012).

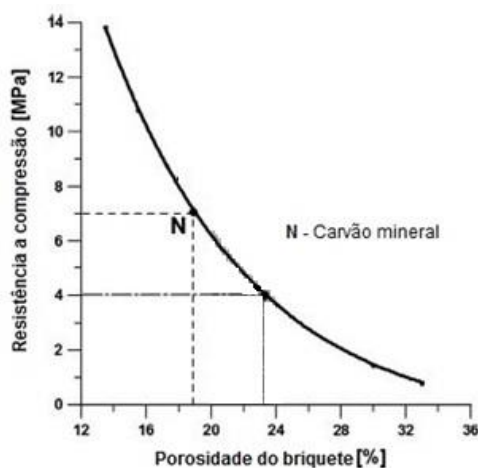
A utilização de partículas de baixa granulometria facilita a segregação e a compactação, com isso, diminuindo a porosidade e proporcionando maior densidade relativa aparente, devido a maior quantidade de massa no mesmo volume (BRITO, 1986).

O carvão mineral possui cerca de 19% de porosidade do seu volume total com uma resistência mecânica de 7MPa. Máquinas do tipo maromba fornecendo uma pressão acima de 20MPa podem fabricar briquetes de carvão mineral com volume de poros abaixo de 13,5% e possuir o dobro da resistência mecânica do carvão mineral. O aumento da porosidade no briquete, acima de 24% diminui a resistência à tração e à compressão (SKOCZYLAS et al., 2014).

O aumento da densidade de empacotamento do carvão poderia reduzir a quantidade de ligante a ser utilizada através da minimização de espaços vazios e com isso reduzindo custos de transporte (PATIL et al., 2009).

Os briquetes que possuem baixa resistência à tração devido a uma maior quantidade de poros (CLARKE e MARSH, 1989a) são, também, caracterizados por serem mais susceptíveis a explosões, que é a degradação do briquete quando submetido a elevadas temperaturas da ordem de 1000°C (BODZIONY, 1994).

Baixas pressões aplicadas na máquina de maromba conseguem fabricar briquetes, como visto na Figura 3.17, mesmo que com características físicas não desejáveis como porosidades elevadas em torno de 33% e resistência mecânica de 1MPa. Porém, não é possível a formação de briquetes aplicando pressões abaixo de 2,7MPa, o mesmo é desmanchado no momento da retirada da máquina (SKOCZYLAS et al., 2014).



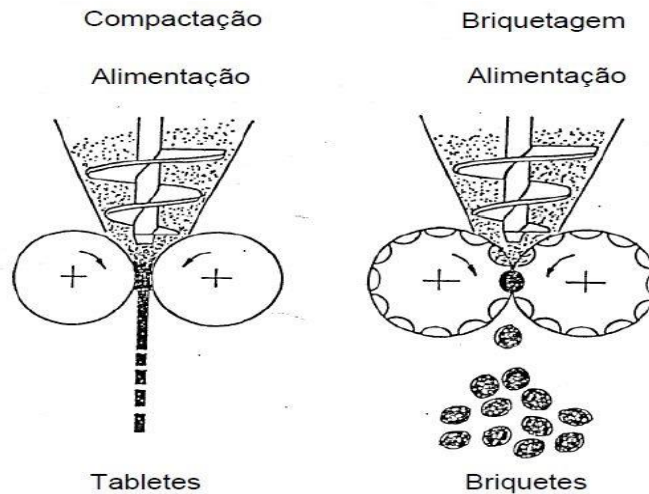
**Figura 3.17:** Resistência à compressão de acordo com a porosidade do briquete (Adaptado de SKOCZYLAS et al., 2014).

As resistências elevadas dos briquetes não são devidas apenas pela pressão de briquetagem, mas também devido à preparação e temperatura de alimentação do material (ELLISON e STANMORE, 1981b).

### 3.8.3 Tamanho e forma

Os briquetes adquirem forma e tamanho na etapa denominada de compactação ou briquetagem na qual o material é submetido a uma forte pressão originando diferentes formas do material produzido (BOROWSKY e HYNAR, 2013).

A forma das cavidades do equipamento é em função da susceptibilidade do material à compactação e podem ser na forma de barras, folhas e tiras podendo estas ser lisas ou onduladas. Com isso, o material pode adquirir formas tabulares, tabletes, fitas, barras, entre outras (CARVALHO e BRINCK, 2004). A Figura 3.18 mostra duas diferentes formas de aglomeração de partículas com aplicação de pressão.



**Figura 3.18:** Formas diferentes de aglomeração de partículas finas (CARVALHO e BRINCK, 2004).

Os briquetes podem possuir vários formatos denominados de ovoide, como mostrado na Figura 3.19, quadrada ou retangular (MUKHERJEE, 1940), travesseiro ou elipsóide, tetraédrico e cilíndrico, podendo estes ser vazados ou não, com uma granulometria de no máximo 8 cm (RAHMAN et al., 1989).



**Figura 3.19:** Briquetes de carvão mineral no formato ovoide (BOROWSKI e HYNAR, 2013).

A produção dos tabletes pode ser obtida pela Equação 3.3, onde  $p$  é a vazão ou produção dos tabletes calculada em função da largura do rolo ( $B$ ), espessura do tablete ( $S$ ), velocidade periférica do rolo ( $V_p$ ) e densidade do tablete ( $d_t$ ) (CARVALHO e BRINCK, 2004).

$$p = B * S * V_p * d_t \quad (3.3)$$

Na produção dos briquetes a produção ou vazão é obtida pela Equação 3.4, onde  $P$  é a produção dos briquetes que é calculada em função do volume do briquete ( $V_b$ ), do número de moldes do rolo ( $R$ ), da velocidade de rotação ( $N$ ) e da densidade do briquete ( $d_b$ ) (CARVALHO e BRINCK, 2004).

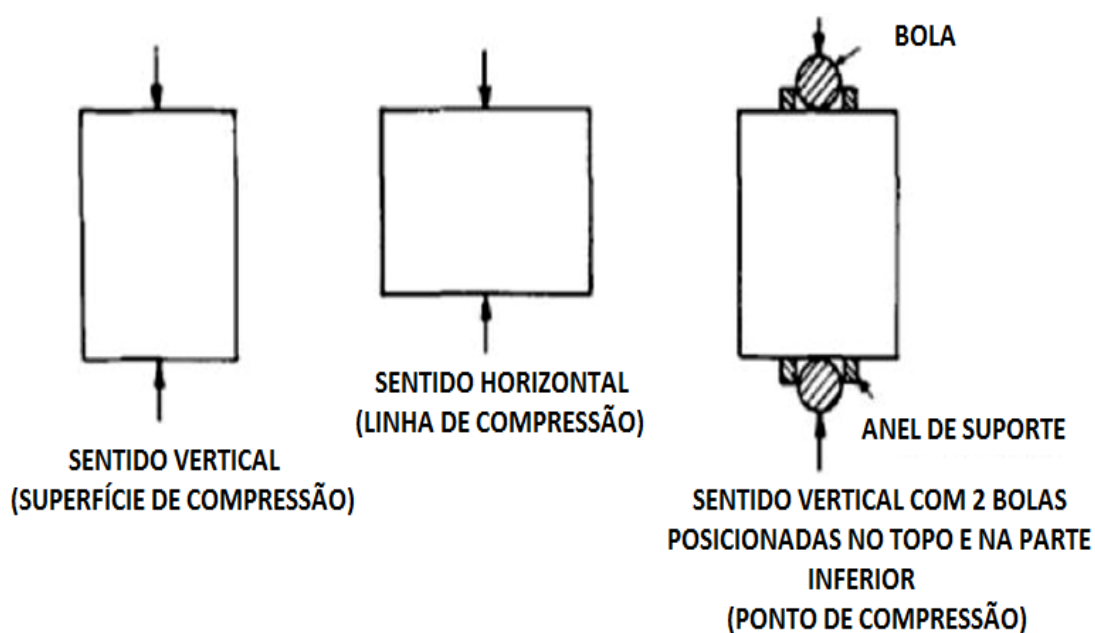
$$P = V_b * R * N * d_b \quad (3.4)$$

A qualidade dos briquetes produzidos pode ser avaliada a partir de alguns testes e os fatores que influenciam na resistência mecânica do briquete são dimensão, volume, massa, aglomerante e velocidade de compressão (RAMMLER e METZNER, 1953).

Mochida e Honda (1963) enfatizaram que a dureza do briquete é relacionada com as propriedades mecânicas, em especial propriedades elásticas e plásticas do carvão, sendo que alguns briquetes possuem um comportamento plástico muito extenso na qual o briquete se deforma sem sofrer a ruptura, isso depende do material e também do teor de aglomerante. Além disso, a não uniformidade em um briquete sempre existe independente do formato e a principal causa é devida ao efeito da fricção entre o material e a parede do molde.

Em briquetes cilíndricos compactados num único sentido, a dureza máxima e a máxima densidade encontram-se na parte superior do cilindro próximo à parede do molde (MOCHIDA e HONDA, 1963).

Através de testes realizados por Rahman e outros (1989), Figura 3.20, a resistência à compressão dos briquetes de formato cilíndrico pode variar de acordo com o comprimento, diâmetro, massa e posição do briquete de acordo com a Tabela 3.4.



**Figura 3.20:** Diferentes sentidos no teste de resistência à compressão para briquetes cilíndricos (Adaptado de RAHMAN et al., 1989).

**Tabela 3.4:** Resistência à compressão de briquetes cilíndricos (adaptado de RAHMAN et al., 1989).

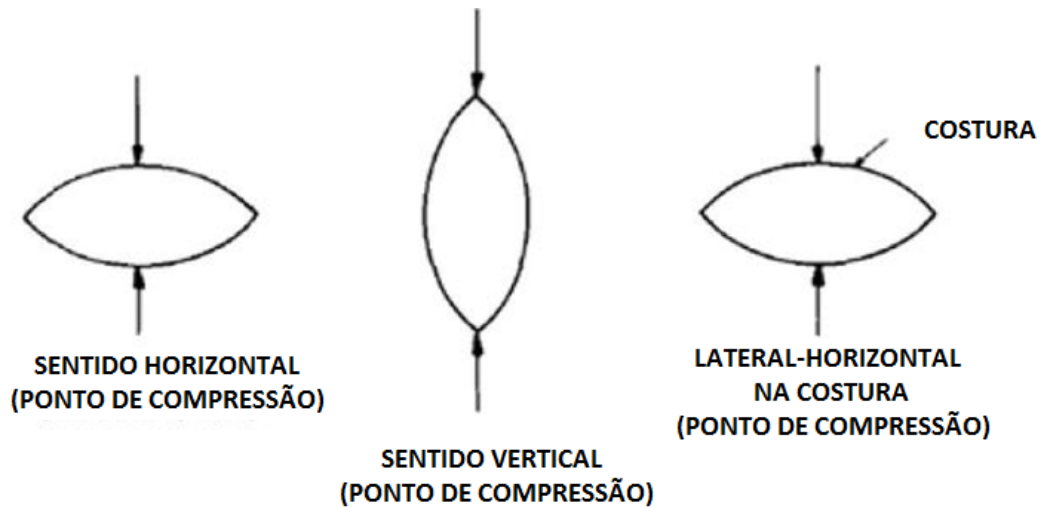
Dimensão do Briquete				Força de Compressão (MPa)	
Peso (g)	Comprimento (mm)	Diâmetro (mm)	Razão (Comprimento/Diâmetro)	Sentido Vertical	Sentido Horizontal
8,50	11,00	29	0,379	13,3	0,5
12,50	16,25	29	0,560	10,7	0,7
16,75	22,25	29	0,769	10,0	0,9
20,40	27,25	29	0,939	9,3	1,0
23,91	32,25	29	1,110	7,0	1,2
32,35	43,00	29	1,482	6,0	1,3
47,50	16,00	57	0,282	30,0	1,3
62,75	21,08	57	0,369	26,7	1,5
95,49	32,31	57	0,566	13,3	2,0
143,66	47,97	57	0,841	6,7	2,7

Algumas observações sobre a tabela podem ser feitas, tais como:

- A resistência à compressão diminui quanto menor for a razão (comprimento/diâmetro) e aumenta quanto maior for a razão.
- Independentemente do diâmetro, os briquetes cilíndricos mostram que com o aumento do peso do briquete a resistência diminui.
- A resistência à compressão dos briquetes em formato cilíndrico na posição vertical é cerca de 10 vezes maior que na posição horizontal.

A grande diferença entre a resistência de compressão na posição vertical da posição horizontal pode ser atribuída a maior área de contato entre as placas e o briquete e, também, pelo fato de que toda a massa do briquete tem a possibilidade de ser comprimida e esmagada até o último momento (RAHMAN et al., 1989).

Ainda segundo Rahman e outros (1989), após experimentos em escala de bancada verificou-se que para todos os formatos e tamanhos dos briquetes, em três diferentes posições que são: horizontal, lateral-horizontal e vertical, Figura 3.21. A resistência à compressão não depende da dimensão e nem da massa como mostrado na Tabela 3.5. Sob as mesmas composições, briquetes elipsoides ou em formato travesseiro possuem um quinto da força de compressão de briquetes cilíndricos.



**Figura 3.21:** Diferentes sentidos no teste de resistência à compressão para briquetes em formato travesseiro (Adaptado de RAHMAN et al., 1989).

**Tabela 3.5:** Resistência à compressão de briquetes elipsoides ou em formato de travesseiro (adaptado de RAHMAN et al., 1989).

Dimensão do Briquete			Força de Compressão (MPa)		
Peso (g)	Tamanho (mm)	Razão (Comprimento/Diâmetro)	Sentido vertical	Sentido lateral-horizantal	Sentido horizontal
28,80	50x40x25	0,379	1,9	1,7	2,0
78,50	70x50x40	0,560	2,0	1,2	2,1
42,42	55x40x30	0,769	2,0	1,9	2,0

### 3.8.4 Tipo e quantidade de materiais ligantes

Os materiais ligantes, também chamados de aglomerante ou de aglutinante, podem estar presentes ou não no material a ser briquetado. As matérias-primas para fabricação de briquetes podem incluir vários tipos de carvões com vários ligantes (CLARKE e MARSH, 1989b). O tipo de material ligante, bem como a quantidade de material ligante e a adição de água, tem como efeito significativo sobre a resistência mecânica dos briquetes de carvão mineral (TAYLOR e HENNAH, 1991; MONTIANO et al., 2014).

A briquetagem com material ligante ocorre quando o material a ser briquetado é pressionado com algum aglomerante a fim de fabricar o briquete (BOROWSKY e HYCNAR, 2013). Os materiais ligantes usados como aglomerantes, junto com partículas finas da matéria prima empregada na fabricação de briquetes, são vários, como mostrado na Tabela 3.6 e podem ser divididos em três tipos: matriz, filme e aglutinantes químicos, de acordo com a sua função na mistura (LUZ et al., 2010).

**Tabela 3.6:** Alguns aglomerantes utilizados na briquetagem de diversos materiais (LUZ et al., 2010; FONTES et al., 1989; KAMINSKI e PERUCH, 2011; MUKHERJEE, 1940; PLANCHER et al., 2002; ZUBKOVA et al., 2014; UZUMKISICI, et al., 1999) .

<b>Material</b>	<b>Aglomerante</b>
Minério de ferro	Cal e melação
Cromita	Cal e melação
Fluorita	Cal, melação e silicato de sódio
Bauxita	Cimento Portland
Coque	Alcatrão, piche, ácido fosfórico, polipropileno, polietileno e amido de milho
Carvão vegetal	Melaço e amido de milho
Carvão mineral	Alcatrão, piche, bagaço de cana, palha, talo de milho
Cobre	Lignosulfonatos
Magnesita	Lignosulfonatos
Areia de Quartzo	Água e Soda Cáustica
Barita	Melaço e <i>black-ash</i>

De acordo com Luz e outros (2010) os ligantes do tipo matriz conhecidos como plastificantes, como o alcatrão, piche, cimento Portland, melação entre outros, provocam embutimento das partículas finas da matéria prima dentro de uma fase contínua dando propriedades mecânicas e químicas aos briquetes determinadas pelas características desses ligantes.

Os ligantes do tipo filme dependem da evaporação do material ligante como a água, silicato de sódio, lignosulfonatos entre outros, para promover a aglomeração e conseqüentemente um aumento na resistência mecânica.

Por outro lado, os ligantes químicos funcionam como tipo matriz ou filme. Bons exemplos são os epóxies,  $\text{Ca(OH)}_2$  + molasses e Silicato de sódio +  $\text{CO}_2$ , este último sendo muito utilizado em areias de fundição.

O tipo de material ligante influencia diretamente nas características físicas dos briquetes. Em estudos feitos por Kaminski e Peruch (2011) concluíram que briquetes de coque feitos com amido de milho e com cimento Portland como material ligante obtiveram melhores características físicas do que com silicato de sódio. Porém, o cimento Portland aumentou muito a concentração de cinzas do briquete restringindo o seu uso.

O ligante inorgânico mais usado é o cimento, que é o mais abundante e barato. Os briquetes endurecem rapidamente, e depois de 6 a 10 horas de tempo de cura, eles já



podem ser transportados e armazenados (MUKHERJEE, 1940; KAMINSKI e PERUCH, 2011).

De acordo com Uzumkesici e outros (1999) a adição de grandes quantidades de polímeros como o polietileno e o polipropileno não reduzem a fluidez e nem a qualidade dos carvões.

O tipo de material ligante pode interferir na textura, porosidade e no inchaço do material devido às diferenças da quantidade e composição dos produtos voláteis na qual participam do processo de gaseificação do briquete de carvão mineral. A adição de polietileno de baixa densidade ou de polipropileno como aglomerante reduz o aumento do volume das cargas de carvão na fase de inchamento. Os briquetes desempenham um papel de moderadores no aumento do volume da carga, facilitando a redução na pressão do coque fabricado (ZUBKOVA et al., 2014).

Os briquetes verdes são os briquetes que acabaram de serem produzidos e que geralmente possuem resistências físicas menores que briquetes que passaram por um tempo de cura. De acordo com Patil e outros (2009), o tempo de cura é benéfico para briquetes que utilizam materiais com partículas maiores, devido a uma perda de água significativa durante este período, mostrando que a umidade é benéfica à ligação inicial de partículas menores.

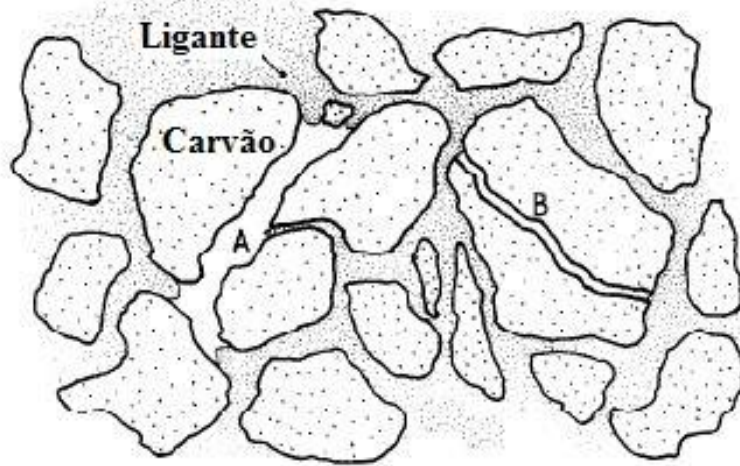
### **3.8.5 Temperatura**

O trunfo da utilização do material ligante permite a adesão das partículas finas dando origem ao briquete (LUZ et al., 2010). A temperatura e a quantidade de material ligante dependem do tipo de material a ser briquetado, e também, da qualidade física e química final desejada para o briquete (RUBIO et al., 1999).

A qualidade química e física do briquete é determinada pela natureza das interações entre os componentes da matéria prima que ocorrem durante a carbonização (CLARKE e MARSH, 1989b).

De acordo com Rubio e outros (1999) a redução da temperatura de briquetagem reduz a taxa de compactação devido à redução da velocidade a que se desloca o material ligante pelos interstícios do material devido ao aumento da viscosidade. O não deslocamento do aglomerante pelos interstícios do material resulta em uma maior quantidade de poros na

qual pode resultar em falhas estruturais e concentradores de tensões, conferindo uma menor resistência mecânica no briquete produzido. A Figura 3.22 é uma representação esquemática da seção de um briquete mostrando a distribuição do material ligante e o carvão (RUBIO et al., 1999).

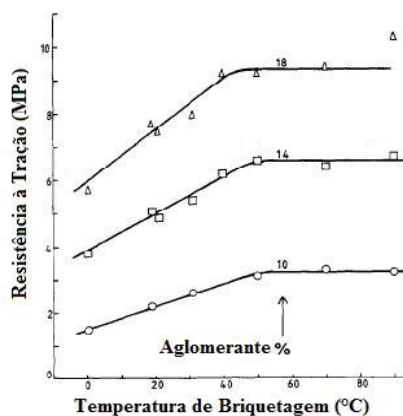


**Figura 3.22:** Representação esquemática da seção de um briquete. A, interstício; B, fratura (Adaptado de TAYLOR e HENNAH, 1991).

O interstício identificado pela letra A na Figura 3.22 também pode ser chamado de porosidade, que é uma falha potencial. Isso porque ele dá origem a correspondentes falhas estruturais no coque formado, ou seja, em superfícies de carvões adjacentes que não possuem ligante entre eles (TAYLOR e HENNAH, 1991).

Alguns ligantes podem causar um aumento na porosidade e no tamanho do poro nos coques formados a partir do briquete de carvão mineral, com isso podendo influenciar negativamente na resistência à tração. Os poros em formato elíptico proporcionam locais para a iniciação de fissura devido à alta concentração de tensão no interior do briquete enfraquecendo significativamente o material. O ligante ideal seria aquele que poderia alterar a textura do coque formado sem influenciar negativamente a estrutura porosa (CLARKE e MARSH, 1989b).

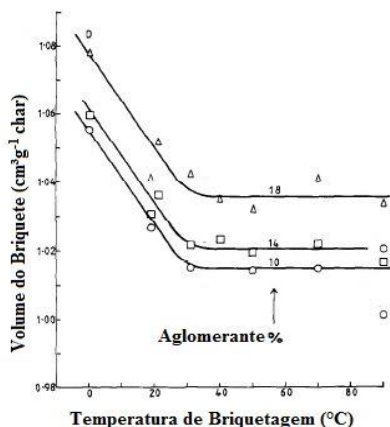
O aumento da temperatura de briquetagem ajuda a obter uma melhor distribuição do material ligante, diminuindo os interstícios sem o preenchimento do mesmo, com isso melhorando a resistência mecânica do briquete, como mostrado em experimentos de Taylor e Hennah (1991) na Figura 3.23.



**Figura 3.23:** Efeito da temperatura de briquetagem na resistência à tração do briquete (Adaptado de TAYLOR e HENNAH, 1991).

Taylor e Hennah (1991) e Rubio e outros (1999) também alegam que existe certa saturação de material ligante, que é a porcentagem de ligante que deixa os interstícios saturados, o que impede obter uma maior adesão entre as partículas finas do material a ser briquetado conduzindo a uma alta pressão hidrostática no ligante.

De acordo com Rubio e outros (1999) o aumento da quantidade de ligante também pode ocasionar em uma diminuição da densidade aparente, como mostrado na Figura 3.24, devido ao aumento do volume do material. A figura também mostra que a temperatura pode ser um fator chave para um aumento da densidade do briquete.



**Figura 3.24:** Efeito da temperatura de briquetagem no volume do briquete feito de alcatrão e carvão mineral (Adaptado de TAYLOR e HENNAH, 1991).

### 3.9 Briquetagem sem Material Ligante

A briquetagem sem o uso de material ligante consiste na fabricação de briquetes através de pós de carvão por meio da pressão. Tais carvões devem conter umidade de 5 a 12% e elevada quantidade de resina ou betume (MUKHERJEE, 1940).

Sem a utilização de materiais ligantes, resistências maiores são vistas em briquetes feitos com carvão de granulometria abaixo de 150 microns (PATIL et al., 2009).

Em caso de carvões não-coqueificáveis torna-se necessário o uso de uma parte de carvão coqueificável, pois, neste processo, ele apresenta a função de aglutinante e também para que a temperatura da mistura se situe na zona de amolecimento do carvão coqueificável (SCHINZEL, 1981).

A turfa e o linhito possuem propriedades de ligação que lhes permitem serem utilizadas como um material ligante para carvões sub-betuminosos ou outros combustíveis em briquetes e transformá-los em produtos úteis, que antes representavam uma grande perda econômica para as indústrias de carvão (RICHARDS, 1990a).

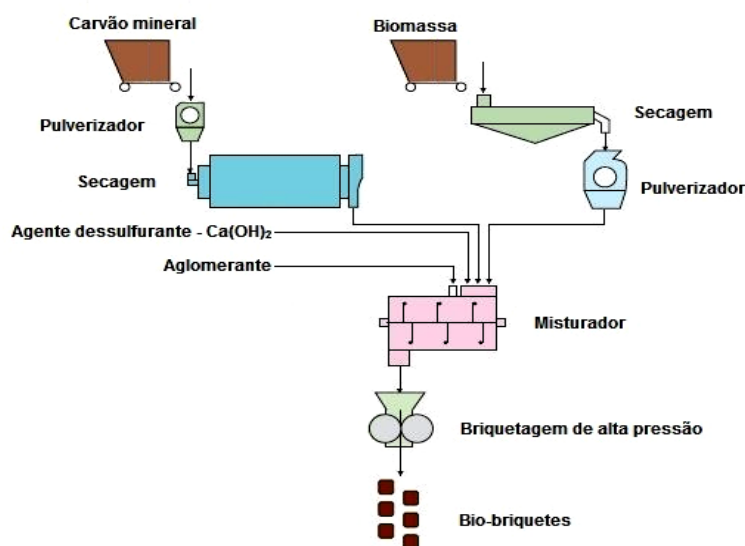
Carvões de classificação mais alta como a hulha, não podem ser briquetados sem a utilização de um material ligante, a não ser através de uma briquetagem a quente, em uma temperatura próxima do amolecimento, um processo difícil de controlar e custoso. Geralmente esse tipo de carvão necessita de um ligante termoplástico como o alcatrão, betume de petróleo ou um ligante adesivo, como o amido de milho, numa briquetagem de rolo duplo em que as partículas de carvão serão revestidas com o aglutinante líquido comprimido numa forma fixa (RICHARDS, 1990a).

### **3.10 Briquetagem e Meio Ambiente**

O conceito de sustentabilidade energética propõe o uso de fontes limpas e renováveis de energia como a biomassa, a fim de promover a melhoria da eficiência energética através da utilização de bioenergia. Atualmente, existe um consenso internacional para reduzir as emissões dos gases causadores do efeito estufa, através da redução do consumo dos combustíveis fósseis, estabelecendo uma proposta de desenvolvimento para a sustentabilidade dos recursos naturais (ASSIS, 2009).

Além do carvão mineral, a briquetagem pode aglomerar partículas finas de óxido de magnésio, lama de aciaria, cromita, barita, dolomita, carvão vegetal e biomassas. Em estudos desenvolvidos pelas empresas NEDO e JCOAL, 2015, os briquetes que utilizam biomassa são chamados de bio-briquetes, a Figura 3.25 mostra o diagrama do processo de obtenção desses briquetes. Eles são um tipo de combustível sólido preparado pela

mistura de carvão com 10 a 25% de biomassa, como madeira, bagaços de cana, palha e talos de milho, que podem servir como material ligante.



**Figura 3.25:** Fluxograma do processo de briquetagem de bio-briquetes (Adaptado de NEDO e JCOAL, 2015).

Devido à alta pressão no processo de briquetagem em rolo duplo, as partículas de carvão mineral e a biomassa se entrelaçam fortemente e aderem umas às outras, produzindo, assim, um briquete rígido, com boa resistência mecânica e que não se separa durante a combustão (NEDO e JCOAL, 2015). A pressão aplicada da máquina de briquetagem destrói a resiliência natural das fibras da biomassa na qual é usada para promover a união das partículas (RICHARDS, 1990b).

Os bio-briquetes possuem, ainda, um baixo tempo de ignição e expansibilidade. De acordo com Purohit e outros (2006) é possível produzir briquetes com 100% de biomassa, chamado de carvão limpo, porém, uma quantidade substancial de energia é necessária para tal feito.

A inclusão de materiais diferentes de carvões minerais em fornos de coqueria possibilita a redução no custo de fabricação do coque e também um aumento na densidade aparente. Em estudos feitos por Montiano e outros (2014) foi possível incluir até 15% em peso de briquetes contendo biomassa em sua composição. O uso parcial de briquetes de biomassa para inclusão na carga de carvão nos fornos de coqueria é de grande interesse por causa do menor custo desses materiais e também como forma de superar os problemas relacionados à escassez de carvões de alto *rank* e minimização da utilização de combustíveis fósseis causadores do efeito estufa.

#### **4 MATERIAIS E MÉTODOS**

Para a condução deste estudo, foram empregadas cinco etapas, na qual foi possível obter dados das matérias-primas utilizadas (mistura de carvões minerais padrão e alcatrão) fornecidas pela Gerdau Ouro Branco. Posteriormente, foi analisado o briquete oriundo da briquetagem feita na SOLVI Insumos em Timóteo, e por fim, a fabricação e a análise do coque metalúrgico fabricado em escala piloto na Gerdau Ouro Branco.

A primeira etapa do estudo é a de caracterização das matérias-primas para fabricação do briquete de carvão mineral. Análise química, petrográfica e granulométrica da mistura de carvões padrão utilizada.

A segunda etapa é a de briquetagem, na qual inclui todo o processo de fabricação do briquete, desde a mistura dos materiais até a compactação na prensa de rolo duplo.

A terceira etapa é a de análise química e física do briquete, seguindo as normas exigidas para cada ensaio.

A quarta etapa é a de fabricação do coque metalúrgico em escala piloto, utilizando mistura base de carvões minerais e os briquetes produzidos.

Na última etapa do trabalho é feita uma análise química e física dos coques fabricados.

A Figura 4.1 representa um fluxograma em ordem cronológica das cinco etapas anteriormente citadas.

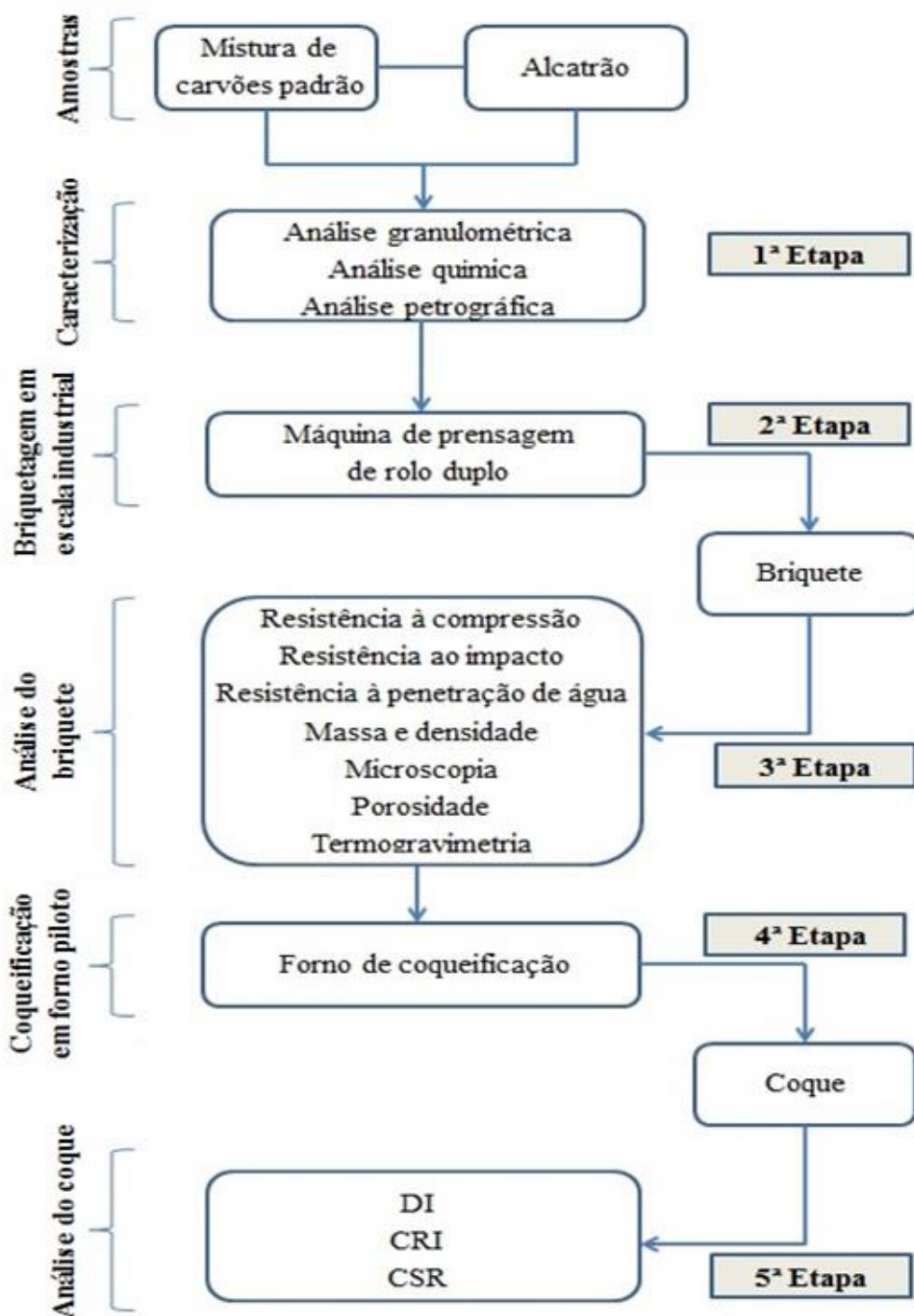


Figura 4.1: Fluxograma das etapas de análise do material.

#### 4.1 Preparação das Matérias-Primas

A preparação da matéria-prima para iniciar o processo de briquetagem incluiu análise química imediata, análise granulométrica e de umidade do carvão mineral e análise química do alcatrão.

A mistura de carvões minerais, com granulometria abaixo de 4mm, utilizada no experimento para fabricação dos briquetes é oriunda do transporte e manuseio da mistura base de carvão mineral para produção de coque, dentro da usina da Gerdau Ouro Branco.

O alcatrão é um subproduto do processo de coqueificação do carvão mineral da coqueria, na qual, foi coletado no setor carboquímico, onde se dá o tratamento dos gases da coqueria.

#### **4.1.1 Caracterização granulométrica do carvão mineral**

A análise imediata para conhecer as características físicas do carvão foi análise de fluidez, utilizando a norma ASTM D 2639, realizado em um Plastômetro Gieseler, R. B. Automazione modelo PL2000, e também, a análise de granulometria da matéria-prima para fabricação dos briquetes.

A análise da granulometria do carvão mineral ocorre através de uma metodologia própria da SOLVI Insumos. A amostra, contendo 500g, passa por uma série de peneiras com 2,0mm, 1,0mm, 0,355mm e 0,15mm de abertura, Figura 4.2, com o auxílio de um vibrador ROTAP, permanecendo no sistema de peneiras por 15 minutos.



**Figura 4.2:** Peneiras para análise da granulometria.

#### **4.1.2 Caracterização química do carvão mineral e briquetes**

Para o ensaio de umidade do carvão mineral feito na empresa SOLVI Insumos, primeiramente, separou-se uma quantidade de 500g de amostra para a análise de



umidade do carvão mineral, de acordo com a norma ASTM D 3173. Para o teste de umidade, peneira-se a amostra em uma peneira de 2,8mm, e, depois de peneirado, o montante retido é triturado com um rolo manual até que toda a amostra esteja abaixo de 2,8mm. Homogeneizar três vezes em cone. Em seguida, o material vai para uma estufa por cerca de uma hora, a uma temperatura de 105°C.

A fim de tirar dúvida sobre a análise da umidade, a mesma foi, também, determinada através do determinador de umidade Ohaus do modelo MB25.

A análise de matéria volátil (ASTM D 3175) e cinza (ASTM D 3174) do carvão mineral e também dos briquetes é feita através da termogravimetria em um forno TGA/DSC da marca Mettler-Toledo, Figura 4.3. A análise foi feita no Laboratório de Hidrometalurgia da Universidade Federal de Ouro Preto.

A técnica é utilizada para analisar a variação de massa da amostra, em função da temperatura utilizando uma programação e atmosfera controlada. Separa-se uma pequena amostra de 25g, com uma granulometria abaixo de 0,150mm para a mistura base de carvões minerais e dos briquetes analisados. A amostra, após as especificações, é homogeneizada e pesada em cadinhos próprios do forno TGA/DSC, contendo amostras de no máximo 15mg. O material é exposto a uma temperatura que varia de 35 a 942,5°C durante o tempo de 90 minutos, com uma taxa de aquecimento de aproximadamente 9,16°C por minuto.



**Figura 4.3:** Forno TGA/DSC do Laboratório de Hidrometalurgia da Universidade Federal de Ouro Preto.

A matéria-prima para a fabricação dos briquetes contendo 947kg de carvão mineral, Figura 4.4, e 1500kg de carvão mineral para fabricar o coque, é composta de carvões baixo (BV), médio (MV), alto voláteis (AV) e inertes, onde apresenta quantidades de matérias voláteis abaixo de 25%.



**Figura 4.4:** Mistura base de carvão mineral abaixo de 4mm.

A mistura base de carvão mineral da Gerdau é composta por 6 carvões de 4 diferentes origens. Fizeram-se as análises da matéria volátil, das cinzas (ASTM D 3174) e do enxofre (ASTM D 3175) dos carvões minerais utilizados para formar a mistura base. A composição química do carvão mineral é a mesma presente nos briquetes.

#### **4.1.3 Caracterização petrográfica do carvão mineral**

As análises petrográficas realizadas foram a composição dos macerais (vitritina, inertinita, exinita e outros) com base na norma ASTM D 2799 e o índice de reflectância com base na norma ASTM D 2798.

A amostra contendo cinco gramas é moída até que esteja com a granulometria abaixo de 1mm, depois esta é embutida em uma resina de poliéster utilizando um molde cilíndrico. Após o endurecimento da resina o corpo de prova está pronto para o polimento.

#### **4.1.4 Caracterização química do alcatrão**

A análise do material ligante para a fabricação dos briquetes, contendo 53kg de alcatrão é feita em insolubilidade em Quinoleína e foi feita no Laboratório de Matérias-Primas da Gerdau Ouro Branco.

## 4.2 Processo de Briquetagem

As etapas do processo de briquetagem do carvão mineral foram realizadas na empresa SOLVI Insumos, simulando uma produção industrial de uma tonelada de briquetes.

A primeira etapa é a de mistura do material no misturador. O carvão mineral é misturado juntamente com o material ligante, o alcatrão.

A segunda etapa é a de compactação ou briquetagem. O material é compactado em uma prensa de rolo duplo, contendo cavidades em formato travesseiro, dando origem aos briquetes.

Foram fabricados quatro tipos de briquetes, Tabela 4.1, cada tipo com certa porcentagem em peso de material ligante, totalizando uma tonelada de briquetes produzidos.

**Tabela 4.1:** Briquetes produzidos com diferentes porcentagens de alcatrão na mistura.

<b>Briquete</b>	<b>Sigla</b>
Mistura base de carvão mineral + 4% em peso de alcatrão	B400
Mistura base de carvão mineral + 5% em peso de alcatrão	B500
Mistura base de carvão mineral + 6% em peso de alcatrão	B600
Mistura base de carvão mineral + 7% em peso de alcatrão	B700

### 4.2.1 Mistura

Para a fabricação dos briquetes, foi utilizado um misturador, Figura 4.5, com velocidade de 2000rpm para misturar o carvão mineral juntamente com o alcatrão, que foi aquecido até 70°C para aumentar a fluidez. Foram fabricadas quatro bateladas de briquetes com diferentes quantidades de alcatrão (4%, 5%, 6% e 7% em peso).

O misturador foi dimensionado de modo que o tempo de mistura no equipamento fosse de 5 minutos. A mistura seguiu por uma correia transportadora até a etapa de compactação.



**Figura 4.5:** Misturador.

#### **4.2.2 Compactação**

A compactação do material foi feita em uma máquina de prensagem de rolo duplo. Os rolos são simétricos e montados um diante do outro e giram com velocidade de 1711rpm em sentidos contrários. Ambos os rolos, Figura 4.6, possuem cavidades em formato de travesseiro para dar forma ao briquete.



**Figura 4.6:** Rolo com cavidades em formato travesseiro.

A pressão de compactação sobre o material cresce progressivamente ao longo do segmento do rolo, a partir do início da força de compressão sobre o material até o ponto de menor distância entre os rolos, e diminui até o ponto de saída do briquete de carvão mineral, Figura 4.7.



**Figura 4.7:** Briquetes de carvão mineral.

### 4.3 Análise do Briquete

As análises dos briquetes foram feitas no Laboratório de Metalurgia do Departamento de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal de Ouro Preto e na Gerdau Ouro Branco.

#### 4.3.1 Análise de densidade

A determinação da densidade real dos briquetes foi realizada no Núcleo de Valorização de Materiais Minerais do Departamento de Engenharia Metalúrgica da UFOP, utilizando um multipicnômetro da marca Quantachrome Instruments modelo Ultrafon, Figura 4.8. A análise é feita colocando a amostra dentro do equipamento na qual é passado um gás hélio com pressão de 18psi, capaz de penetrar em poros da ordem de  $1 \times 10^{-10}$  m.



**Figura 4.8:** Multipicnômetro do Núcleo de Valorização de Materiais Minerais do Departamento de Engenharia Metalúrgica da UFOP.

A determinação da densidade real expressa por  $D$ , Equação 4.1, é calculada em função do peso da amostra ( $W$ , em gramas) e do volume do pó ( $V_p$ , em  $\text{cm}^3$ ).

$$D = \frac{W}{V_p} \quad (4.1)$$

O peso das amostras dos briquetes ( $W$ ) é feito utilizando uma balança de precisão a fim de aferir o peso de cada amostra e fazendo uma média das massas.

O volume do pó ( $V_p$ ), Equação 4.2, é calculado em função do volume da célula da amostra ( $V_c$ , em  $\text{cm}^3$ ), do volume de referência ( $V_r$ , em  $\text{cm}^3$ ), da leitura da pressão após a mínima pressão sobre o volume de referência ( $P_1$ , em psi) e da leitura da pressão após a inclusão do volume da célula de amostra ( $P_2$ , em psi).

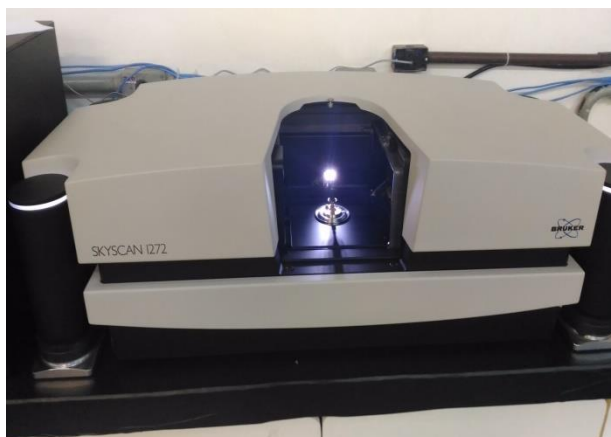
$$V_p = (V_c - V_r) * \left[ \left( \frac{P_1}{P_2} \right) - 1 \right] \quad (4.2)$$

#### 4.3.2 Análise de porosidade

A análise de porosidade e área superficial dos grãos do briquete é um parâmetro importante na determinação da resistência física do mesmo como visto na revisão bibliográfica.

A técnica da análise de porosidade é feita através de um sistema de microtomografia computadorizada de alta resolução no microtomógrafo de raios X SkyScan da marca Bruker, modelo 1272, Figura 4.9, que se encontra no laboratório NANOLAB da UFOP.

O procedimento técnico da análise de microtomografia consiste em coletar imagens de projeção de raios X em diferentes ângulos, por um intervalo de tempo de 2 horas, ao redor da amostra de formato cilíndrico, com dimensões máxima de 75mm de diâmetro e 70mm de comprimento, através do software do equipamento SkyScan 1272 e converter este conjunto de imagens e seções que representam uma imagem tridimensional através do software NRecon com resolução de 350nm. A análise tridimensional é então analisada por um software CTAN (Comprehensive Tex Archive Network) a fim de obter o volume de interesse e a porosidade da amostra.



**Figura 4.9:** Microtomógrafo de raios X SkyScan 1272 do laboratório NANOLAB do Departamento de Engenharia Metalúrgica da UFOP.

### 4.3.3 Análise microscópica

O Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), da marca TESCAN modelo VEGA 3, Figura 4.10, utilizado para gerar imagens microscópicas dos briquetes pertence ao laboratório NANOLAB da UFOP. Este microscópio permite reproduzir imagens ampliadas em até 300.000 vezes.



**Figura 4.10:** Microscópio Eletrônico de Varredura do laboratório NANOLAB do Departamento de Engenharia Metalúrgica da UFOP.

A análise microscópica é iniciada com a preparação da amostra, retirando-se três amostras de 3g de cada briquete, com o intuito de ver a quantidade e o formato dos poros nas três diferentes dimensões de cada tipo de briquete. Após a preparação, as amostras foram metalizadas com uma fina camada de ouro, na qual é responsável pela condução e escoamento de elétrons do feixe do microscópio para o porta amostras e, em seguida, para o aparelho.



#### 4.3.4 Análise de resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão dos briquetes, utilizando uma máquina de ensaio de compressão Amsler Frères com capacidade de 20kN (2000 kgf), Figura 4.11, foi feito no Laboratório de Ensaios Mecânicos do Departamento de Engenharia Metalúrgica da UFOP, de acordo com a norma NBR 7190. O ensaio é utilizado para determinar a resistência física dos briquetes aos esforços compressivos durante a sua estocagem, manuseio e condições de trabalho, no caso de uma coqueria, resistir ao peso da carga dentro do forno sem fraturar (LUZ et al., 2010). O valor de resistência à compressão dos briquetes analisados foi calculado em função da força de resistência do briquete até que o mesmo frature.



**Figura 4.11:** Máquina Amsler Frères do Laboratório de Ensaios Mecânicos do Departamento de Engenharia Metalúrgica da UFOP.

Foram feitas três replicatas aplicando uma força perpendicular nas três diferentes dimensões do briquete, 40 x 30 x 15 mm, Figura 4.12, totalizando nove ensaios para cada tipo de briquete, a fim de determinar o aumento da resistência mecânica do mesmo, após o tempo de cura. O tempo de cura analisado foi de 10, 15, 20, 25 e 30 dias após a fabricação do briquete.



**Figura 4.12:** Ensaio de compressão axial nas três diferentes dimensões do briquete.



### 4.3.5 Análise de resistência ao impacto

O ensaio de resistência ao impacto, também denominado de ensaio de queda, mede a degradação do briquete, simulando as quedas que o mesmo sofre durante o manuseio e dentro do forno de coqueria. O briquete sofre três quedas consecutivas (LUZ et al., 2010) no equipamento de correia transportadora para teste de queda Stemmann da Gerdau Ouro Branco.

Quatro amostras de briquetes de 3kg cada são utilizadas para a análise. Após três quedas de todo o material pelo equipamento, a amostra passa por peneiramento através das peneiras de 25mm, 10mm e 5mm, Figura 4.13.



**Figura 4.13:** Ensaio de impacto realizado na Gerdau Ouro Branco.

O resultado do teste de resistência ao impacto (RI), também chamado de rendimento, do briquete é obtido através da Equação 4.3. Onde  $M_2$  é igual a massa retida acima da peneira de 10mm, após o ensaio, e  $M_1$  é a massa inicial do ensaio.

$$RI = \left( \frac{M_2}{M_1} \right) * 100 \quad (4.3)$$

O teste de resistência ao impacto é considerado o melhor diagnóstico geral de força do briquete.

### 4.3.6 Análise de resistência à penetração de água

O ensaio de resistência à penetração de água no briquete consiste em avaliar a resistência à absorção de água e desintegração (RICHARDS, 1990b). O briquete é imerso em um recipiente com água por um tempo estimado de 2 horas, medindo-se a massa antes e depois do ensaio (CUNHA et al., 2006).

#### 4.4 Fabricação do Coque Metalúrgico

A fabricação do coque metalúrgico em escala piloto foi realizada no forno piloto da Gerdau Ouro Branco. O coque foi feito utilizando a mistura base de carvões minerais com 20 e 30% de briquetes de acordo com estudos prévios por Lima (2016) e Jon e Ida (1960) que limitam o aumento da quantidade de briquetes nos fornos da coqueria devido ao aumento da pressão exercida pelo fenômeno da contração e expansão do carvão, o que poderia resultar em degradação da parede refratária.

Para a fabricação do coque, foram feitos quatorze enforamentos, doze deles contendo 150kg de mistura (carvão mineral + briquete) e dois enforamentos contendo 150kg de carvão mineral, como mostrado na Tabela 4.2.

**Tabela 4.2:** Experimentos realizados em duplicata de acordo com porcentagens de briquetes na mistura.

<b>Mistura utilizada</b>	<b>Sigla</b>
Mistura base de carvão mineral	MB
Mistura base de carvão mineral + 20% de briquete com 4% de alcatrão	MB420
Mistura base de carvão mineral + 30% de briquete com 4% de alcatrão	MB430
Mistura base de carvão mineral + 20% de briquete com 5% de alcatrão	MB520
Mistura base de carvão mineral + 30% de briquete com 5% de alcatrão	MB530
Mistura base de carvão mineral + 20% de briquete com 6% de alcatrão	MB620
Mistura base de carvão mineral + 20% de briquete com 7% de alcatrão	MB720
Mistura base de carvão mineral + 30% de briquete com 7% de alcatrão	MB730

##### 4.4.1 Forno piloto

O forno piloto da Gerdau Ouro Branco modelo *Carbolite Furnace*, Figura 4.14, de capacidade de 250kg, constituído em estruturas de chapas grossas e de ferro fundido perfilado, em formato retangular, possui portas articuladas a partir da estrutura principal montada sobre mancais lineares. O deslocamento da parede móvel é facilitado pela suspensão da abóboda do forno. O centro do forno possui duas aberturas, uma para saída de gases e outra para carregamento. As aberturas também permitem medir a pressão de coqueificação e mudança do núcleo da soleira (VIANA, 2007).



**Figura 4.14:** Forno piloto da coqueria da Gerdau Ouro Branco (documento interno da Gerdau Ouro Branco, 2015).

O forno possui um sistema de aquecimento elétrico, feito por meio de setenta e duas resistências de carvão de silício, em formato espiral duplo, que permite trabalhar com temperaturas até 1250°C e é dividido em seis zonas, cada zona contendo um sistema de ventilação próprio, para distribuir homogeneamente a temperatura pelo forno (VIANA, 2007).

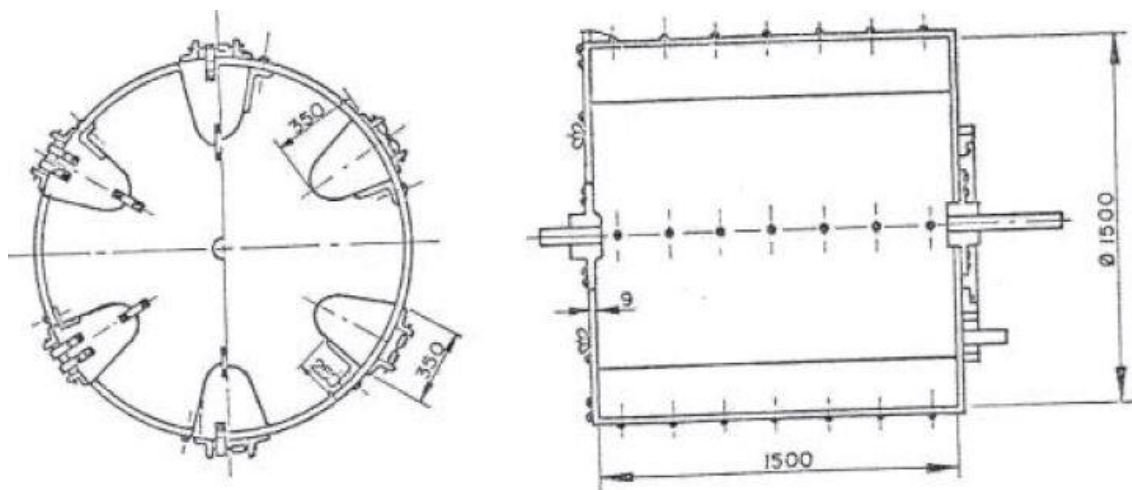
#### **4.5 Análise do Coque Metalúrgico**

Os testes para caracterização química e física do coque foram feitos na Gerdau Ouro Branco.

##### **4.5.1 Análise de resistência à frio**

Para a análise de resistência à frio (DI – *Drum Index*) do coque foi utilizado um equipamento de acordo com a norma JIS K 2151. O ensaio de DI simula a degradação do coque no seu manuseio e transporte até a chegada no alto-forno.

O equipamento para o ensaio é um tambor cilíndrico, feito em chapa de aço com espessura entre 6 e 9mm, com diâmetro interno de 1500mm e largura de 1500mm contendo 6 aletas de 350mm de largura e 9mm de espessura, como mostrado no desenho esquemático da Figura 4.15.



**Figura 4.15:** Desenho esquemático do tambor (SILVA, 2008).

São carregados 10kg de coque de tamanho maior que 25mm, na qual são submetidas a uma velocidade de giro de 15rpm e 150 voltas de revolução durante 10 minutos. Em seguida, as amostras são peneiradas. O índice de DI do coque é o percentual em peso do coque com tamanho superior a 15mm após o ensaio e pode ser calculado de acordo com a Equação 4.4, onde  $M_{15}$  é a massa retida na peneira de 15mm e  $M_0$  é a massa inicial antes do ensaio.

$$DI = \left( \frac{M_{15}}{M_0} \right) * 100 \quad (4.4)$$

#### 4.5.2 Análise de resistência a quente e reatividade

A análise permite obter a resistência mecânica do coque após reação (CSR) e o índice de reatividade do coque (CRI).

Para a realização do ensaio de reatividade do coque (CRI – *Coke Reactivity Index*), utilizou-se a norma ASTM D 5341. Primeiramente pesou-se 200g de cada material com granulometria entre 19mm e 22,4mm. Antes de iniciar o ensaio, passa-se uma corrente de nitrogênio gasoso no interior do cadinho durante 5 minutos, com uma vazão de 5l/min. Em seguida, carrega-se o cadinho com a amostra de coque.

Com a passagem do gás nitrogênio ( $N_2$ ), após 25 minutos, a amostra chega a uma temperatura de 1110°C e o gás do fluxo é substituído por dióxido de carbono ( $CO_2$ ) mantendo a vazão de 5l/min. Um decaimento de temperatura de 10°C é observado após

a troca dos gases. Passadas 2 horas com o gás CO<sub>2</sub> no coque, a temperatura é reduzida gradativamente com passagem do gás N<sub>2</sub>, durante 5 minutos e com a vazão de 5l/min.

O índice de reatividade do coque (CRI) é calculado de acordo com a Equação 4.5.

$$CRI = \left( \frac{M_i - M_f}{M_i} \right) * 100 \quad (4.5)$$

Em que:

M<sub>i</sub> = massa inicial da amostra;

M<sub>f</sub> = massa final da amostra após da reação.

O ensaio de resistência a quente para determinação da reação do coque após reação (CSR – *Coke Strength after Reaction*) foi feito para simular a resistência do coque, dentro do alto-forno, após a reação de Boudouard.

A amostra de cada material, oriunda do ensaio de reatividade do coque (CRI) é submetida um tratamento mecânico em um tambor tipo “I”, Figura 4.16, com comprimento e dimensões de acordo com a norma ASTM D 5425.



**Figura 4.16:** Tambor tipo “I” da Gerdau Ouro Branco (documento interno da Gerdau Ouro Branco, 2015).

O tambor tipo “I” gira a uma velocidade de 20rpm durante 30 minutos com 600 revoluções. Após o ensaio, cada amostra é peneirada em uma peneira de 9mm. O ensaio pode ser mensurado de acordo com a Equação 4.6.

$$CSR = \left( \frac{M_9}{M_f} \right) * 100 \quad (4.6)$$

Em que:

$M_9$  = massa retida na peneira de 9mm;

$M_f$  = massa oriunda do teste CRI.

#### 4.5.3 Análise de expansão e contração

A análise de expansão e contração da mistura de carvão é determinada utilizando um forno de soleira aquecida, padronizado pela norma ASTM D 2014. A análise foi feita apenas na mistura que continha briquetes com 5% em peso de alcatrão como material ligante (MB520 E MB530), diante dos melhores resultados obtidos, desde os ensaios nos briquetes até nos ensaios do coque produzido.

Primeiramente, as amostras são pesadas e peneiradas em uma peneira de 3,35mm. O retido é triturado até que 70 a 85% da amostra se encontre abaixo de 3,35mm de granulometria. Em seguida, a amostra é dividida em duas bandejas e secadas ao ar por 12h.

Após a secagem, a amostra é homogeneizada e dividida no quarteador Jones até a obtenção de uma fração de 500g para realizar o ensaio de expansão/contração. O restante é utilizado para determinação da umidade.

Após o quarteamento e homogeneização da amostra, a massa é dividida em 2 porções de 4,5g cada, para serem inseridas nas duas câmaras do forno de soleira aquecida, que devem se encontrar em uma temperatura superior a 554°C. Em seguida, devem-se abrir as câmaras e inserir um suporte de 5cm de altura no fundo da mesma, colocar o pistão sobre o suporte e descer o braço de alavanca sobre o pistão. Depois dos ajustes de leitura, retira-se o pistão e o suporte do forno de soleira aquecida.

Com os ajustes e a retirada do pistão e do suporte, pode-se enfornar a amostra da mistura de carvões. Para tal feito, é necessário inserir o pistão, descer o braço de alavanca sobre o pistão e colocar o peso no gancho do mesmo, sobre a amostra. Com isso, traça-se a altura da carga no forno.

A partir desse momento, deve-se iniciar os registradores de expansão e contração e inserir 2 termopares de medição de temperatura no topo dos orifícios dos pistões.

O ensaio de expansão e contração pode ser mensurado de acordo com a Equação 4.7.

$$E_a = \left( \frac{H_f - H_i}{H_i} \right) * 100 \quad (4.7)$$

Em que:

$E_a$  = porcentagem de expansão/contração da carga;

$H_i$  = altura inicial da carga;

$H_f$  = altura final da carga.

A altura inicial da carga ( $H_i$ ), Equação 4.8, e a altura final da carga ( $H_f$ ), Equação 4.9, podem ser calculadas de acordo com as seguintes fórmulas:

$$H_i = (D_i * K) + A \quad (4.8)$$

$$H_f = (D_f * K) + A \quad (4.9)$$

Onde:

$D_i$  = distância da carga no início do ensaio do ponto zero à linha traçada (cm);

$D_f$  = distância da carga após o ensaio do ponto zero à linha traçada (cm);

$K$  = constante de correção do gráfico (0,1579);

$A$  = altura do suporte (cm).

Por último, a porcentagem de expansão/contração da carga de carvão com 1% de umidade ( $E_1$ ), Equação 4.10, e a porcentagem de expansão/contração da carga de carvão com 2% de umidade ( $E_2$ ), Equação 4.11, podem ser calculadas de acordo com as fórmulas abaixo:

$$E_1 = \frac{D_1 * (100 - U_1)}{D_c * (100 - U_a)} * (100 + E_a) - 100 \quad (4.10)$$

$$E_2 = \frac{D_2 * (100 - U_2)}{D_c * (100 - U_a)} * (100 + E_a) - 100 \quad (4.11)$$

Em que:

$D_1 =$  densidade padrão  $0,881\text{g/cm}^3$ ;

$D_2 =$  densidade padrão  $0,833\text{g/cm}^3$ ;

$U_1 =$  umidade de referência igual a 1%;

$U_2 =$  umidade de referência igual a 2%;

$U_a =$  umidade final do coque.

A densidade de carga do coque ( $D_c$ ), Equação 4.12, pode ser calculada em função da massa amostrada do coque ( $M$ ) pelo volume ( $V$ ).

$$D_c = \left(\frac{M}{V}\right) \quad (4.12)$$

A análise deste ensaio permite concluir até que ponto a mistura de carvão irá expandir ou contrair, na qual está relacionada diretamente com a pressão de coqueificação.



## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico são abordados os resultados das características físicas, químicas e petrográficas do carvão mineral, alcatrão, briquetes e coque metalúrgico.

### 5.1 Resultado da Caracterização das Matérias-Primas

A caracterização do carvão mineral e da mistura dos carvões é muito importante para o conhecimento da matéria-prima a ser utilizada na fabricação dos briquetes e do coque metalúrgico.

#### 5.1.1 Análise física do carvão mineral

A Tabela 5.1 apresenta a granulometria da mistura base de carvões minerais utilizada para a fabricação dos briquetes. A granulometria <2mm do carvão mineral é um importante fator para o processo de briquetagem, na qual sugere-se que deve conter um mínimo de 50% em peso do briquete. O carvão mineral deve, também, possuir uma granulometria de superfino <0,149mm de no máximo 5% da carga do briquete. De acordo com Pereira (2009), uma maior concentração de superfino dificulta a aglomeração do material no processo de briquetagem, necessitando de mais material ligante.

**Tabela 5.1:** Análise granulométrica da mistura base de carvões.

<b>Granulometria (mm)</b>	<b>Massa (g)</b>	<b>% em massa</b>
>2	143,07	28,61
2>x>1	164,13	32,83
1>x>0,355	179,00	35,80
1>x>0,149	13,70	2,74
<0,149	0,10	0,02
<b>Total</b>	<b>500</b>	<b>100</b>

Os fenômenos de amolecimento e fusão correspondem às propriedades reológicas do carvão e o ensaio de fluidez Gieseler é feito no estágio em que esses fenômenos ocorrem na faixa de temperaturas de 300°C a 500°C. O amolecimento e fusão dos macerais reativos são responsáveis pela aglomeração entre as partículas de carvão dentro do forno da coqueria. A Tabela 5.2 mostra a temperatura de amolecimento,

fluidez máxima e solidificação da mistura base de carvões utilizada para a fabricação do briquete e do coque.

**Tabela 5.2:** Análise do ensaio de fluidez Gieseler.

<b>Temperatura</b>	<b>°C</b>
<b>Amolecimento</b>	407,07
<b>Fluidez máxima</b>	462,65
<b>Solidificação</b>	484,67

### 5.1.2 Análise química do carvão mineral e alcatrão

A Tabela 5.3 apresenta os resultados do enxofre, cinza e matéria volátil dos carvões utilizados para formar a mistura base de carvão para produção dos briquetes e do coque.

O enxofre variou de 0,34% a 0,90%. A cinza dos carvões variou de 3,70% a 10,06%. A química da cinza e também o enxofre são realizados como parâmetro no plano da mistura base. O enxofre do carvão é parcialmente retido no coque, por isso exige um maior controle da entrada deste elemento no processo.

Os carvões são classificados de baixo volátil, médio volátil e alto volátil e variam de 12,5% a 34,81% de matéria volátil.

**Tabela 5.3:** Resultado do enxofre, cinza e matéria volátil dos carvões minerais.

<b>Carvão</b>	<b>Origem</b>	<b>Enxofre (%)</b>	<b>Cinza (%)</b>	<b>Matéria Volátil (%)</b>	<b>Classificação</b>
<b>1</b>	EUA	0,90	7,12	34,81	Alto Volátil
<b>2</b>	EUA	0,72	8,46	21,07	Baixo Volátil
<b>3</b>	Canadá	0,34	9,50	21,71	Médio Volátil
<b>4</b>	Canadá	0,47	10,06	27,87	Médio Volátil
<b>5</b>	Colômbia	0,84	9,27	25,40	Médio Volátil
<b>6</b>	Brasil	0,85	3,70	12,50	Baixo Volátil

A Tabela 5.4 mostra a análise química imediata da mistura base de carvões e a umidade.

A mistura base de carvões possui um teor de matéria volátil de 22,06%. A umidade da mistura de carvão para a produção de coque deve estar abaixo de 9,5% pois interfere no processo de coqueificação. A baixa umidade também é requerida no processo de briquetagem, pois a mesma interfere no processo de aglomeração das partículas. Os fatores que afetam o aumento da umidade nos carvões são as chuvas e o sistema de

aspersão do pátio de carvão mineral. A mistura base de carvões apresenta um valor de umidade de 7,1%, está bem abaixo do máximo permitido.

As limitações relacionadas com a composição química e a quantidade de cinza do carvão estão ligadas a presença dos óxidos de silício, alumínio e ferro ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) que representam quase 90% do total da cinza, como mostrado na Tabela 5.4. Estes elementos possuem efeitos adversos na qualidade do ferro gusa, e também no volume e viscosidade da escória no alto-forno.

O enxofre contido na mistura base de carvões é retido em mais de 60% no coque. Este elemento químico é muito controlado devido ao impacto deste no processo de refino do aço. O enxofre contido na mistura de carvões é de 0,76%.

**Tabela 5.4:** Resultado da análise química imediata e elementar da mistura base de carvões minerais.

Álcalis (%)	$\text{Al}_2\text{O}_3$ (%)	CaO (%)	MgO (%)	$\text{Fe}_2\text{O}_3$ (%)	MnO (%)	ZnO (%)	$\text{Na}_2\text{O}$ (%)	$\text{K}_2\text{O}$ (%)	$\text{SiO}_2$ (%)	$\text{TiO}_2$ (%)	$\text{P}_2\text{O}_5$ (%)	Cinza (%)	M.V (%)
1,67	27,12	1,84	0,76	6,92	0,04	0,025	0,51	1,17	54,80	1,48	0,98	6,18	22,06
C fixo (%)	Al (%)	Ca (%)	Mg (%)	Fe (%)	Mn (%)	Zn (%)	Na (%)	K (%)	Si (%)	Ti (%)	P (%)	S (%)	Umidade (%)
71,76	14,36	1,32	0,46	4,84	0,028	0,020	0,375	0,970	25,572	1,014	0,426	0,76	7,1

A análise do alcatrão feita em Quiloneína constatou que o material continha 3,9% de impurezas e 4,8% de umidade.

### 5.1.3 Análise petrográfica do carvão mineral

A Tabela 5.5 apresenta os dados de petrografia dos macerais: vitrinita, esporinita, cutinita, resinita, semifusinita, fusinita, esclerotinita, micrinita, macrinita, extinita, inertinita e matéria mineral, além do índice de refletância que é medido através da vitrinita.

**Tabela 5.5:** Resultado da análise petrográfica da mistura base dos carvões.

<b>Macerais</b>	<b>%</b>
Vitrinita	55,82
Esporinita	0,24
Cutinita	0,05
Resinita	0,38
Semifusinita	8,84
Fusinita	0,75
Esclerotinita	0,02
Micrinita	0,07
Macrinita	0,32
Exinita	0,66
Inertinita	29,91
Reativos	57,43
Inertes	42,57
<b>Matéria Mineral</b>	3,42
<b>Refletância</b>	1,16

A vitrinita quando submetida a elevadas temperaturas é reativa e fluida, enquanto que a inertinita não é reativa. No rank dos carvões minerais, os macerais vitrinita e inertinita influenciam na classificação, como também o CSR e CRI.

## **5.2 Resultado da Análise dos Briquetes**

A caracterização dos briquetes é muito importante para o conhecimento da matéria-prima a ser utilizada na fabricação do coque e também os efeitos que podem influenciar no processo de coqueificação.

### **5.2.1 Análise de porosidade e microscópica dos briquetes**

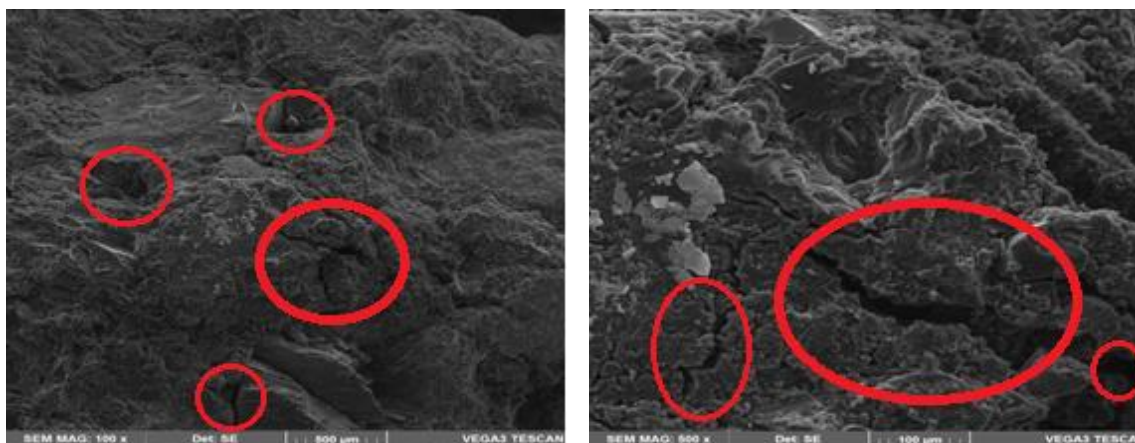
A porosidade, além de outros fatores, possui relação direta com a resistência física dos briquetes. A Tabela 5.6 apresenta valores de análise em picnômetro (densidade) e microtomógrafo (porosidade), para as 4 amostras de briquetes (B400, B500, B600, B700). Aumento na densidade do material pode acarretar em aumento na produtividade da coqueria. Quanto maior a porosidade de um material, maior será a área superficial deste material.

**Tabela 5.6:** Resultado das análises de densidade e porosidade dos briquetes.

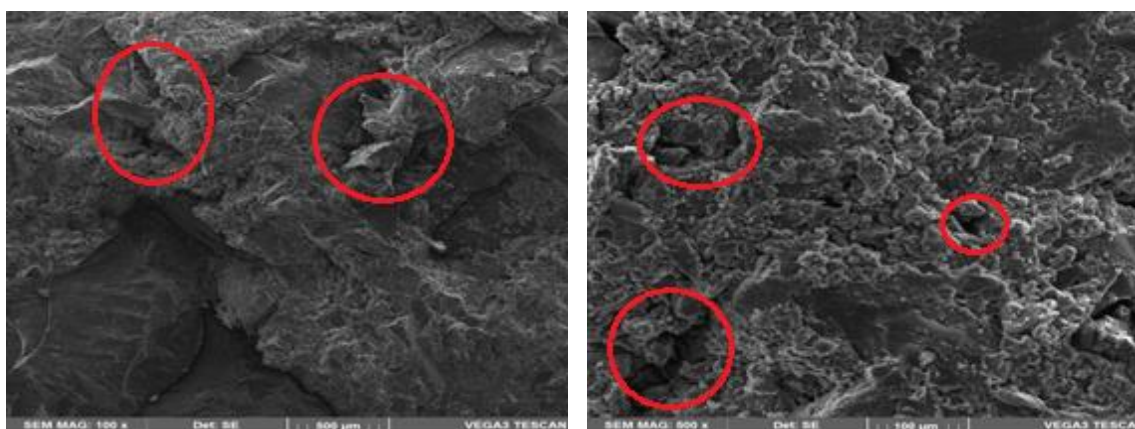
Amostra	Densidade Real (g/cm <sup>3</sup> )	Porosidade (%)
B400	1,280	18,29
B500	1,283	16,57
B600	1,270	17,65
B700	1,274	17,02

Analisando as densidades reais dos briquetes e as porosidades, têm-se uma proximidade entre os valores, porém a amostra B400 apresentou uma maior porosidade.

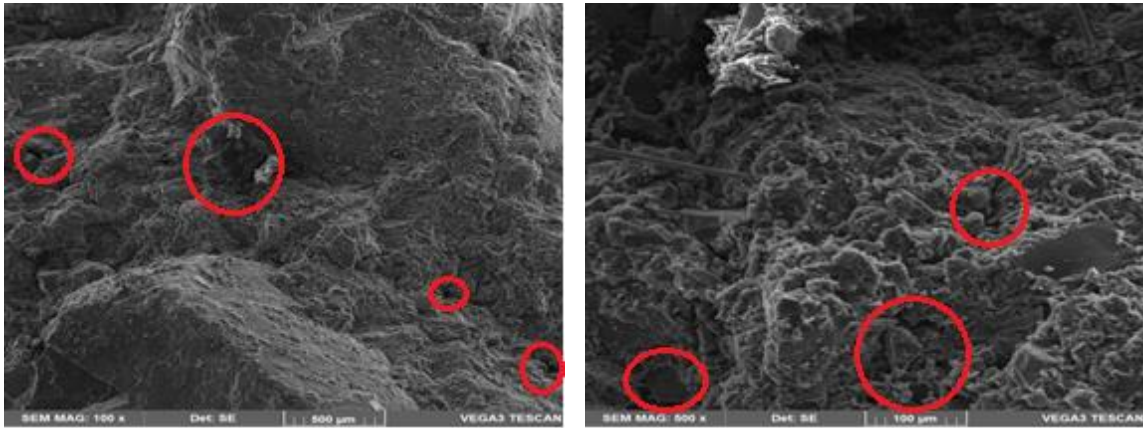
A estrutura física das amostras de briquete podem ser vistas nas Figuras 5.1 à 5.4., através da digitalização feita em microscópio eletrônico de varredura (MEV). No MEV é possível observar as partículas de carvão mineral que foram aglomeradas para dar origem ao briquete, bem como os poros formados pela não completa compactação e ligação entre as partículas identificadas pelos círculos vermelhos.



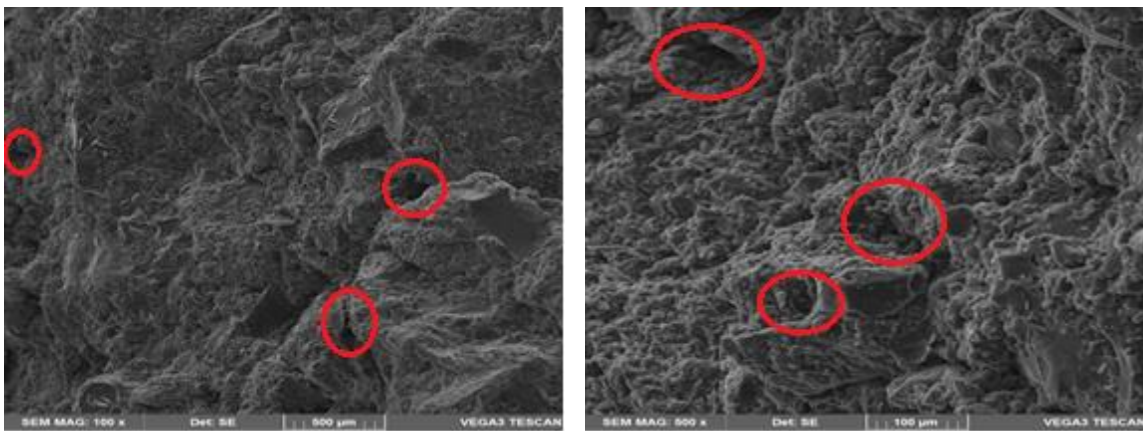
**Figura 5.1:** Resultado da microscopia eletrônica de varredura da amostra B400.



**Figura 5.2:** Resultado da microscopia eletrônica de varredura da amostra B500.



**Figura 5.3:** Resultado da microscopia eletrônica de varredura da amostra B600.

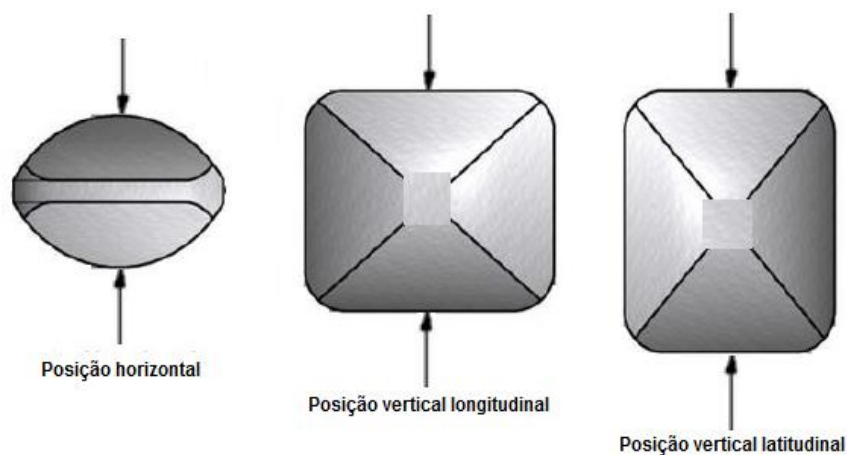


**Figura 5.4:** Resultado da microscopia eletrônica de varredura da amostra B700.

### 5.2.2 Análise de resistência mecânica dos briquetes

Três propriedades físicas foram identificadas como sendo mais relevantes ao desenvolver ou avaliar a qualidade da briquetagem. Estas propriedades são: resistência à compressão, impacto e penetração de água.

As diferentes amostras de briquetes demonstraram diferentes resultados de resistência à compressão, como mostrado na Tabela 5.7. A Figura 5.5 auxilia na compreensão do sentido da força aplicada no briquete para o ensaio.



**Figura 5.5:** Três diferentes posições dos briquetes no ensaio de compressão.

**Tabela 5.7:** Força de compressão dos briquetes em função do tempo de cura.

Briquete		Força de Compressão (MPa)		
Tempo de cura (dias)	Amostra	Posição horizontal	Posição vertical longitudinal	Posição vertical latitudinal
10	<b>B400</b>	4,02	2,94	1,37
	<b>B500</b>	3,43	2,75	1,57
	<b>B600</b>	2,45	1,96	1,27
	<b>B700</b>	3,04	1,76	1,08
15	<b>B400</b>	3,43	2,55	1,37
	<b>B500</b>	4,02	3,14	1,57
	<b>B600</b>	3,24	2,26	1,37
	<b>B700</b>	4,02	2,55	1,57
20	<b>B400</b>	4,02	3,14	1,57
	<b>B500</b>	4,41	3,14	2,06
	<b>B600</b>	3,82	2,74	1,67
	<b>B700</b>	4,02	2,94	1,76
25	<b>B400</b>	4,81	3,53	2,54
	<b>B500</b>	5,50	3,83	2,36
	<b>B600</b>	4,61	2,65	2,26
	<b>B700</b>	5,20	3,53	1,96
30	<b>B400</b>	4,22	3,53	2,54
	<b>B500</b>	6,09	3,73	2,36
	<b>B600</b>	3,82	2,65	2,26
	<b>B700</b>	4,61	3,63	2,45

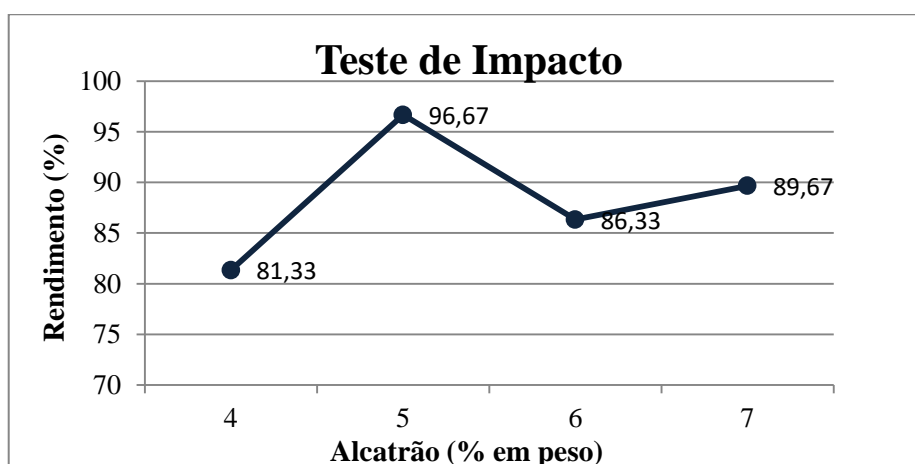
A resistência à compressão do briquete sofre uma queda a partir de uma quantia de 6% de alcatrão presente no briquete (amostra B600). O fato pode ser explicado a uma menor capacidade de aglomeração, oriunda de uma quantidade maior de alcatrão,

causando uma fraca ligação entre as partículas de carvão mineral devido a uma camada muito espessa de alcatrão. Outra explicação é devida a uma maior quantidade de poros, que deixa o material mais frágil mecanicamente.

Em estudos feitos por Rubio e outros (1999) concluíram que excesso de materiais ligantes pode diminuir a resistência mecânica dos briquetes e baixas quantidades de ligantes ocasionam em maiores quantidades de poros nos briquetes, o que também diminui a sua resistência. Sendo assim, para a análise da resistência a compressão, a melhor porcentagem de alcatrão no briquete corresponde a 5% (amostra B500). Uma menor resistência à compressão implicaria em fissuras e fragmentação do briquete durante o armazenamento, transporte e manuseio.

O tempo de cura favorece ao aumento da resistência à compressão do briquete, mostrando um aumento significativo após 20 dias de cura. Segundo Patil e outros (2009), o tempo de cura auxilia na eliminação da umidade do briquete, com isso, aumentando a resistência do mesmo.

O ensaio de impacto determina a resistência física do briquete em suportar repetidas quedas que podem ocorrer durante o manuseio, transporte e queda dentro do forno da coqueria. De acordo com Carvalho e Brinck (2004) uma perda de peso de até 5% após o teste de impacto é considerada um valor ótimo. Quando as perdas são maiores que 10% o resultado é considerado ruim. Os briquetes com diferentes quantidades de alcatrão demonstraram resultados variados em relação ao teste de impacto, mostrado na Figura 5.6.



**Figura 5.6:** Resultado do ensaio de impacto (queda) dos briquetes.



A resistência ao impacto dos briquetes foi melhor para o briquete contendo 5% de alcatrão (amostra B500) com um rendimento de 96,67%. Valores tanto abaixo ou acima da quantidade de 5% de alcatrão no briquete obtiveram resultados não muito satisfatórios já que a degradação dos materiais foram maiores que 10%. Esses valores de resistência ao impacto vinculado diretamente com os resultados da resistência à compressão eram de se esperar, já que ambas fazem parte da análise de resistência mecânica à frio do briquete, ou seja a resistência ao esmagamento e a queda que a carga de briquete apresenta dentro do forno de coqueria irá influenciar diretamente na produção do coque e também na perda de material através do transporte e manuseio, o que implicaria em custo.

Quando a briquetagem é feita com a utilização de material ligante insolúvel em água, como é o caso do alcatrão, os briquetes são geralmente resistentes à água. Por outro lado, briquetes feitos de materiais porosos como o carvão pedem a necessidade de se avaliar quanto a penetração de água. Essa resistência é a prova de que os briquetes podem ser transportados em vagões ou caminhões abertos e serem armazenados sem uma cobertura.

A Tabela 5.8 mostra o resultado do teste de penetração à água após 2 horas de imersão das amostras de briquete em água.

**Tabela 5.8:** Resultado do teste de penetração à água dos briquetes.

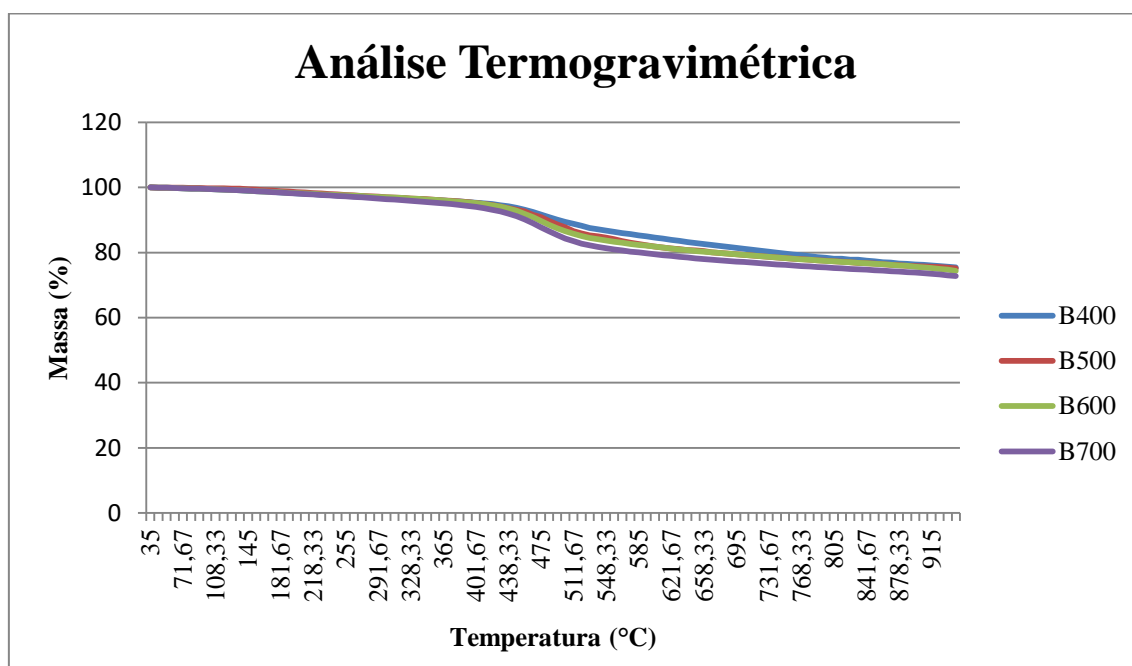
<b>Amostra</b>	<b>Seco (g)</b>	<b>Após 2h de imersão em água (g)</b>	<b>Água absorvida (%)</b>
<b>B400</b>	22,25	22,68	1,97
	26,11	26,50	1,51
	22,00	22,50	2,27
<b>Média</b>			<b>1,92</b>
<b>B500</b>	21,78	22,10	1,48
	23,46	23,84	1,64
	22,35	22,72	1,64
<b>Média</b>			<b>1,59</b>
<b>B600</b>	20,73	21,06	1,61
	21,93	22,33	1,84
	22,40	22,81	1,83
<b>Média</b>			<b>1,76</b>
<b>B700</b>	21,40	21,76	1,67
	21,20	21,53	1,56
	23,26	23,63	1,59
<b>Média</b>			<b>1,61</b>

O teste de resistência à penetração de água testa o desmanche do briquete em meio aquoso e também o seu possível enchimento. O excesso de água ocasiona em custo no processo de produção de coque, já que necessitaria de mais tempo e calor para a retirada dessa umidade no processo de coqueificação dentro dos fornos de coqueria, além da máxima limitação de umidade de 9,5% que o material deve conter para ser enornado. E também no transporte do briquete, já que o mesmo é higroscópico, o que implicaria em mais peso desnecessário.

De acordo com Richards (1990), um máximo de 5% de água absorvida seria um valor razoável para a maioria dos briquetes de carvão. A resistência à penetração de água mostrou-se favorável a todas as amostras de briquete tendo uma quantidade de água absorvida média menor que 2%. Ademais a mistura que continha 5% de alcatrão (B500) apresentou a menor taxa de absorção de água.

### 5.2.3 Análise termogravimétrica dos briquetes

A análise termogravimétrica dos briquetes, Figura 5.7, mostra a perda de massa das amostras em função da temperatura sem a presença de oxigênio para uma taxa de aquecimento de 9,16°C/min. A análise iniciou-se na temperatura ambiente com uma taxa de aquecimento de 9,16°C/min até a temperatura de 942,5°C.



**Figura 5.7:** Resultado da análise termogravimétrica das amostras de briquete.

Observa-se na Figura 5.7 que as amostras de briquetes apresentaram uma perda em porcentagem de massa bem semelhante, tendo como a maior perda em massa a amostra B700, por conter maior quantidade de alcatrão como material ligante.

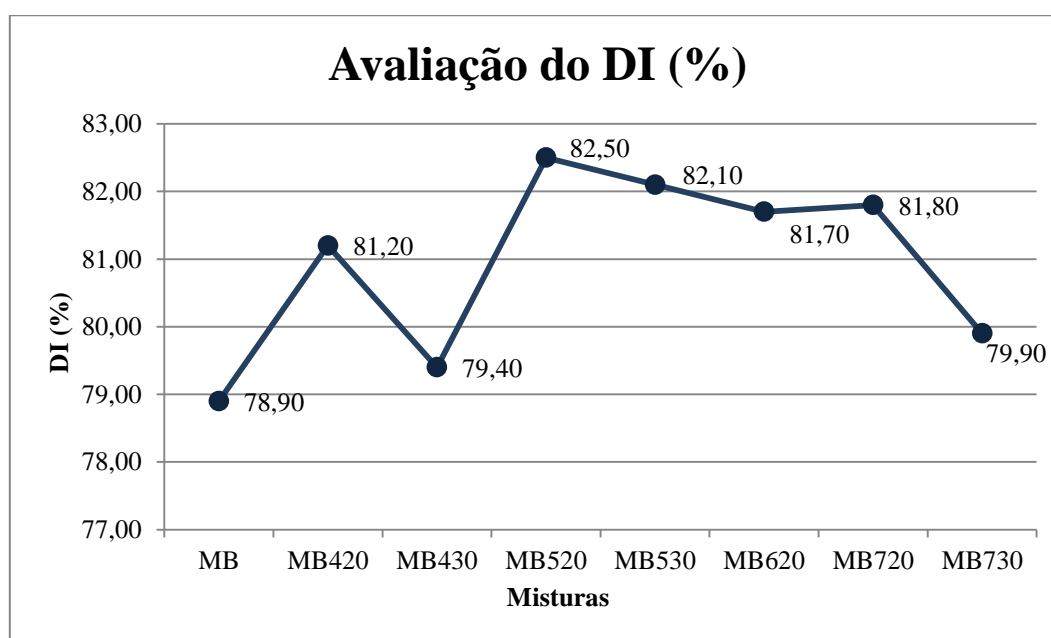
Primeiramente ocorre a perda de umidade do briquete entre temperaturas de 100 à 200°C. A maior perda de massa ocorre entre as temperaturas de 400 à 600°C que é chamada de desvolatilização primária, na qual ocorre liberação de hidrocarbonetos e alcatrão. A última parte do processo de perda de massa do carvão mineral, denominada desvolatilização secundária, ocorre a partir de 800°C com eliminação de hidrogênio.

### 5.3 Resultado da Análise do Coque Metalúrgico

A caracterização do coque é feita a fim de se determinar o impacto e o risco operacional do mesmo quando utilizado como matéria prima em altos-fornos.

#### 5.3.1 Análise de DI (*Drum Index*)

A Figura 5.8 mostra os resultados da análise da resistência mecânica à frio (DI) das amostras de coque.



**Figura 5.8:** Resultado da análise de resistência mecânica à frio do coque metalúrgico.

A resistência à frio do coque sofre um aumento com a utilização dos briquetes quando se comparada a produção do coque metalúrgico sem a utilização do mesmo.

**Tabela 5.9:** Valores de DI das amostras de coque em relação à porcentagem de briquete na mistura.

<b>Mistura base + 20% de briquete</b>	<b>DI (%)</b>	<b>Mistura base + 30% de briquete</b>	<b>DI (%)</b>
MB420	81,20	MB430	79,40
MB520	82,50	MB530	82,10
MB720	81,80	MB730	79,90

Pode ser notado na Tabela 5.9 que há um decaimento no DI com o aumento da quantidade de briquetes utilizados para fabricação do coque. Misturas compostas com 20% em peso de briquetes possuem melhores resultados de DI. Tal fato pode ser explicado devido a uma menor capacidade de aglomeração da mistura, ocasionada pela utilização de uma maior quantidade de briquetes, gerando assim, uma maior quantidade de espaços vazios no coque. Com isso, ocorre uma diminuição do DI devido a uma quantidade acima de 20% de briquetes em massa na mistura para fabricação do coque.

As misturas MB520 e MB530 compostas por briquetes que possuem 5% em peso de alcatrão originaram coques com melhores resistências à frio (DI). Para valores abaixo de 5% em peso de alcatrão no briquete, os valores de DI diminuem devido a uma maior quantidade de poros no briquete, poros originados de uma capacidade não efetiva de todo o alcatrão favorecer a união das partículas que originaram o briquete.

Para valores acima de 5% em peso de alcatrão no briquete, os valores de DI dos coques produzidos sofrem um leve decaimento, devido a uma menor resistência física do briquete, bem como uma maior porosidade do mesmo quando se comparada aos briquetes contendo 5% em peso de alcatrão.

Coques com baixos valores de DI são mais frágeis e se fragmentam durante o manuseio e, também, durante a redução do minério de ferro, podendo gerar uma perda de permeabilidade na zona granular do alto-forno, ocasionando em engaiolamentos e arreamentos da carga.

Segundo Flint (1962), a cada 1% a mais no DI otimizado da mistura base, ocasiona uma diminuição em 5kg de coque por tonelada de ferro gusa (*coke rate*). Sendo assim, com os resultados obtidos na Tabela 5.10, observa-se que a variação do DI foi positiva, com isso diminuindo os valores do *coke rate* com a utilização de briquetes na mistura para produção do coque. Tendo como o ponto máximo a amostra MB520 que obteve um

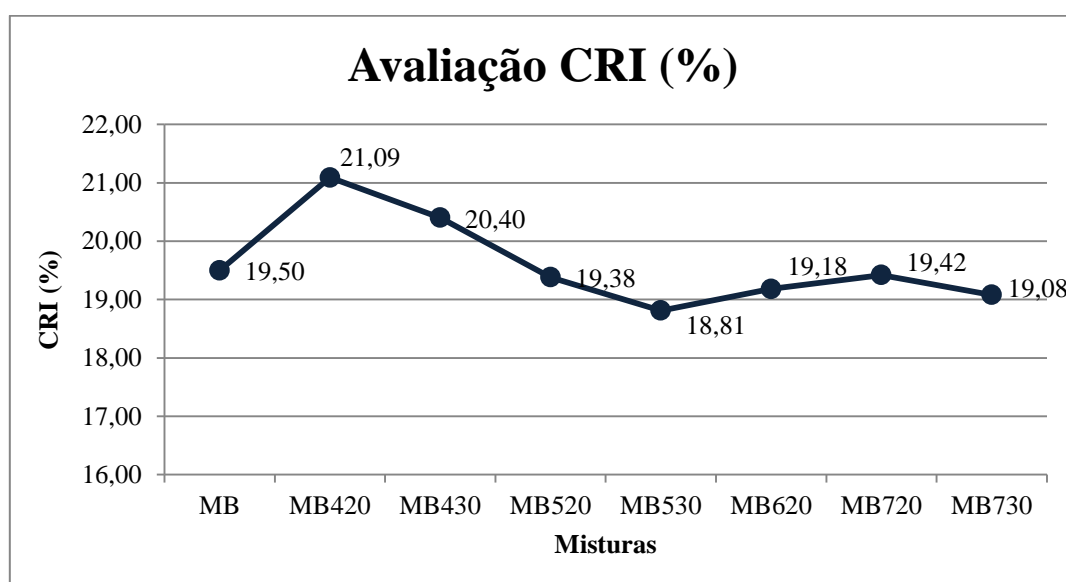
aumento de 3,60% de DI, consequentemente, ocasionará em uma redução de 18kg de coque por tonelada de ferro gusa.

**Tabela 5.10:** Variação do *coke rate* em relação à variação do DI.

Amostras	DI (%)	Variação do DI para a mistura base (%)	Variação do <i>coke rate</i> (kg)
MB	78,90	0,00	0,00
MB420	81,20	+2,30	-11,50
MB430	79,40	+0,50	-2,50
MB520	82,50	+3,60	-18,00
MB530	82,10	+3,20	-16,00
MB620	81,70	+2,80	-14,00
MB720	81,80	+2,90	-14,50
MB730	79,90	+1,00	-5,00

### 5.3.2 Análise de CRI (*Coke Reactivity Index*)

As diferentes amostras de coque fabricados com mistura base e diferentes quantidades e tipos de briquetes demonstraram diferentes resultados de CRI, como mostrado na Figura 5.9.



**Figura 5.9:** Resultado da análise do índice de reatividade do coque.

Os índices de reatividade do coque (CRI) com a utilização de briquetes que possuem porcentagem de alcatrão acima de 5% em peso foram bem próximos do CRI da mistura base (MB).

Briquetes com menores porcentagens de alcatrão possuem maiores quantidade de porosidade, originando assim um coque mais poroso, o que aumenta a reatividade do mesmo.

A reatividade do coque sofre uma pequena queda quando se utiliza 30% de briquete em peso compondo parte da mistura para fabricação de coque quando se comparada com a utilização de 20% em peso de briquetes, Tabela 5.11.

**Tabela 5.11:** Valores de CRI das amostras de coque em relação à porcentagem de briquete na mistura.

<b>Mistura base + 20% de briquete</b>	<b>CRI (%)</b>	<b>Mistura base + 30% de briquete</b>	<b>CRI (%)</b>
MB420	21,09	MB430	20,40
MB520	19,38	MB530	18,81
MB720	19,42	MB730	19,08

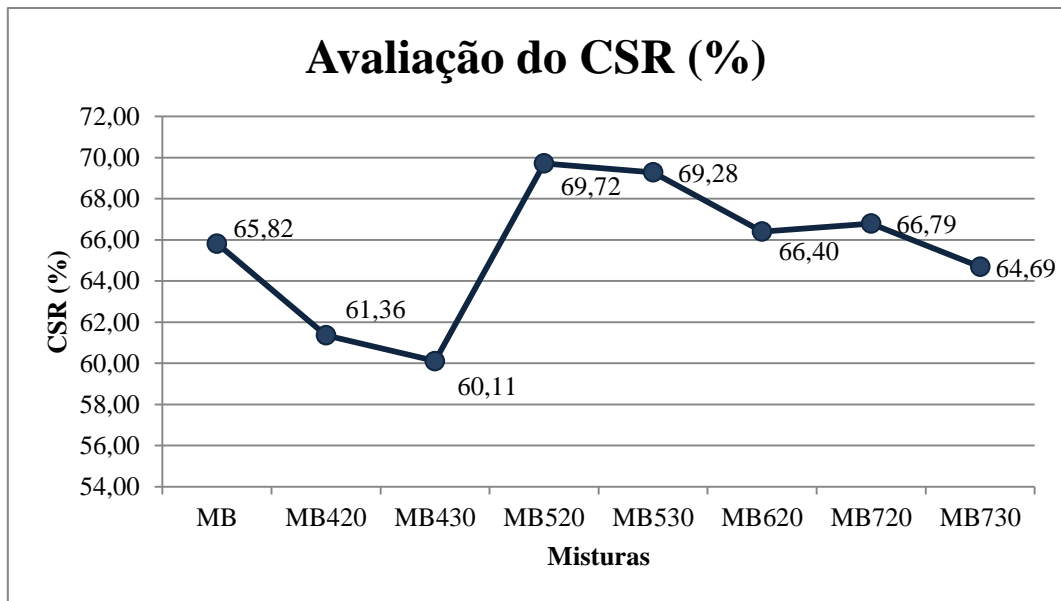
De acordo com Flint (1962), a cada 1% a menos no CRI otimizado da mistura base, ocasiona uma diminuição de 2kg de coque por tonelada de ferro gusa (*coke rate*). Devido a variação do CRI das amostras terem sido muito pequena em relação a variação do CRI da mistura base, o *coke rate* não teve grande variação, como mostrado na Tabela 5.12.

**Tabela 5.12:** Variação do *coke rate* em relação à variação do CRI.

<b>Amostras</b>	<b>CRI (%)</b>	<b>Variação do CRI para a mistura base (%)</b>	<b>Variação do <i>coke rate</i> (kg)</b>
MB	19,50	0,00	0,00
MB420	21,09	+1,59	+3,18
MB430	20,40	+0,90	+1,80
MB520	19,38	-0,12	-0,24
MB530	18,81	-0,69	-1,38
MB620	19,18	-0,32	-0,64
MB720	19,42	-0,08	-0,16
MB730	19,08	-0,42	-0,84

### 5.3.3 Análise de CSR (*Coke Strength after Reaction*)

De acordo com a Figura 5.10, a variação do CSR ocorre de maneira semelhante à variação do DI.



**Figura 5.10:** Resultado da análise da resistência mecânica à quente do coque.

Para a análise de CSR, obtiveram-se os melhores resultados para o coque fabricado com briquetes com 5% em peso de alcatrão (MB520 e MB530). O coque fabricado com briquetes abaixo de 5% em peso de alcatrão obtiveram os piores resultados de CSR. Há, também, uma queda nos valores de CSR para coques fabricados com briquetes acima de 5% em peso de alcatrão.

A resistência mecânica a quente (CSR) sofre uma queda quando se aumenta a quantidade de briquete na mistura para produção do coque, como mostrado na Tabela 5.13, na qual, isso pode ser explicado de forma semelhante à resistência mecânica à frio do coque (DI).

**Tabela 5.13:** Valores de CSR das amostras de coque em relação à porcentagem de briquete na mistura.

Mistura base + 20% de briquete	CSR (%)	Mistura base + 30% de briquete	CSR (%)
MB420	61,36	MB430	60,11
MB520	69,72	MB530	69,28
MB720	66,79	MB730	64,69

Para cada variação positiva de 1% no CSR reduz-se 2kg de coque por tonelada de ferro gusa (*coke rate*) (FLINT, 1962). De acordo com a Tabela 5.14, a variação do CSR foi positiva com a utilização de briquetes que possuem quantidade de alcatrão acima de 5% em peso. Pode-se observar, também, que há um decaimento no CSR do coque com a utilização acima de 20% de briquetes na mistura. O melhor resultado foi da amostra

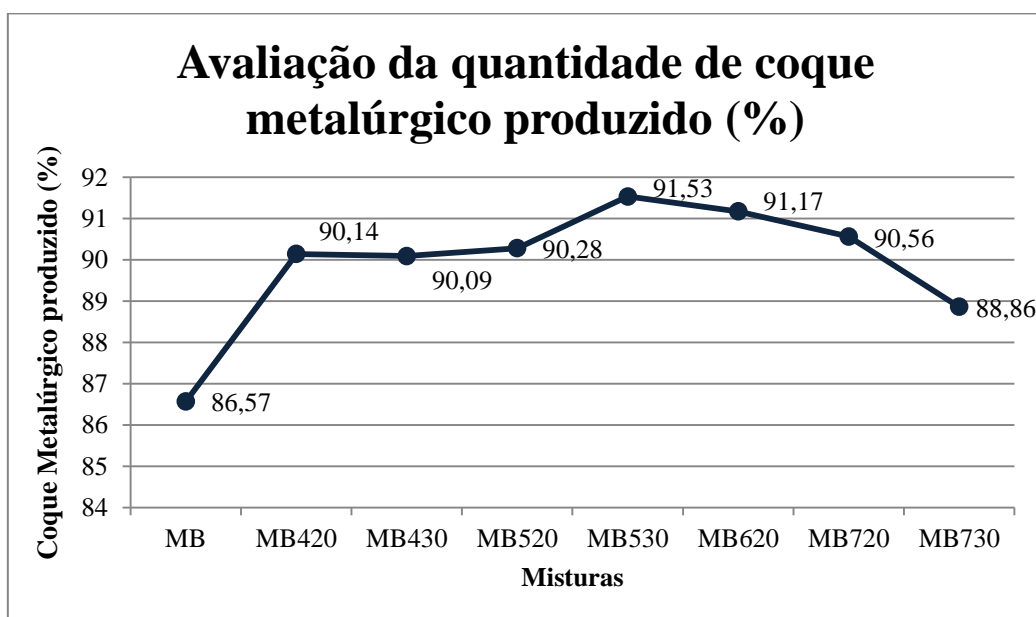
MB520, que obteve um aumento de 3,90% CSR, o que provocaria uma diminuição de 7,80kg de coque por tonelada de ferro gusa produzido no alto-forno e evitando problemas de permeabilidade do leito.

**Tabela 5.14:** Variação do *coke rate* em relação à variação do CSR.

Amostras	CSR (%)	Variação do CSR para a mistura base (%)	Variação do <i>coke rate</i> (kg)
MB	65,82	0,00	0,00
MB420	61,36	-4,46	+8,92
MB430	60,11	-5,71	+11,42
MB520	69,72	+3,90	-7,80
MB530	69,28	+3,46	-6,92
MB620	66,40	+0,58	-1,16
MB720	66,79	+0,97	-1,94
MB730	64,69	-1,13	2,26

### 5.3.4 Quantidade de coque metalúrgico produzido

A avaliação da quantidade de coque metalúrgico produzido é analisada frações granulométricas de coque acima de 25mm. Granulometria entre 13 e 25mm é chamado de *small coke* e abaixo de 13mm *coke breeze*. A Figura 5.11 mostra a quantidade de coque metalúrgico produzido (granulometria acima de 25mm) com e sem a utilização parcial de briquetes na mistura da carga.



**Figura 5.11:** Quantidade de coque fabricado com e sem utilização de briquetes na mistura base.



Através do gráfico foi possível observar que houve um aumento na produção de coque metalúrgico através da utilização de briquetes na mistura base de carvão. O maior resultado apresentado foi com a utilização da amostra MB530. O gráfico mostra uma pequena tendência em diminuir a quantidade de coque produzido devido ao aumento da quantidade de briquetes como parte da carga e, também, devido ao aumento da quantidade de alcatrão no briquete.

A produção de menor quantidade de coque metalúrgico, granulometria acima de 25mm, gera menor produtividade, tendo em vista que a utilização de *coke breeze* no alto-forno pode acarretar em problemas de permeabilidade da carga.

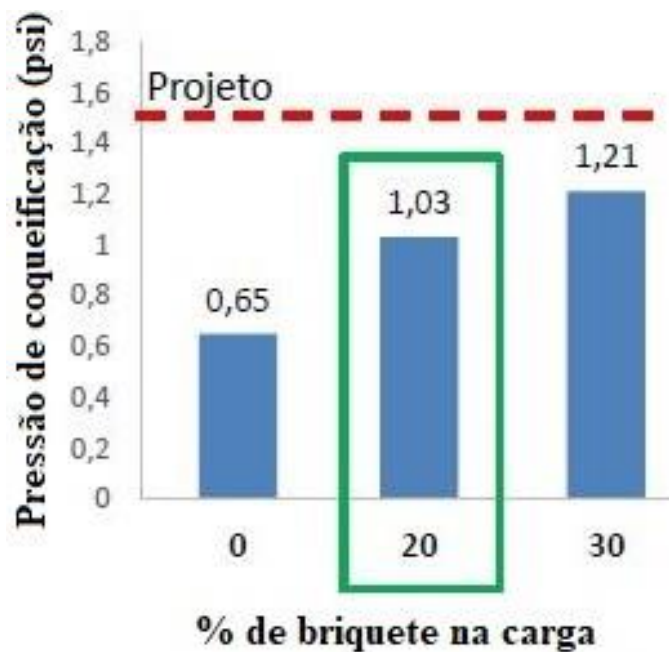
### **5.3.5 Pressão exercida pela mistura de carvões com briquetes sobre as paredes do forno de soleira aquecida**

Realizaram-se os estudos interligados à preservação da estrutura da parede dos fornos da coqueria. O ensaio de compressão/expansão influencia diretamente na capacidade do forno em suportar tais esforços, sem que o mesmo sofra algum tipo de degradação.

Neste ensaio foram analisadas apenas as amostras com ausência de briquete (MB) e as amostras contendo briquetes com 5% em peso de alcatrão como material ligante (MB520 e MB530) devido estas amostras apresentarem os melhores resultados tanto nos ensaios de resistência do briquete como nos ensaios de resistência e produção do coque.

De acordo com a Figura 5.12, notou-se que, a utilização de até 30% de briquetes na mistura, apresenta valores de contração dentro dos limites de especificação de projetos em baterias mais novas de coquerias convencionais, sendo o valor de 1,5% a mais na expansão do material. Porém, em fornos mais antigos este limite diminui para 1,0%, fazendo com que no máximo uma quantidade de 20% de briquetes na carga seja tolerada a fim de que não haja prováveis danos nas paredes dos fornos de coqueificação.

O aumento da pressão de coqueificação diante da maior quantidade de briquetes na mistura se dá devido a uma maior quantidade de carvões baixo voláteis na mistura e também devido ao aumento da quantidade de matéria volátil presente no briquete devido a utilização de alcatrão para promover a aglomeração do briquete, dificultando passagem de gases pelo material, acarretando em maior expansão.



**Figura 5.12:** Pressão de coqueificação em função da % de briquete na mistura da carga.

Por fim, através da Figura 5.13, notou-se que, a utilização de 20% de briquete, a mistura apresenta uma contração dentro dos limites de especificação de projeto para coquerias convencionais mais antigas, -15% a -9%. Uma maior quantidade de briquetes acarretaria em possíveis danos a parede refratária destes fornos. Isto se dá devido aos mesmos fatores que influenciaram na Figura 5.12. Grande quantidade de carvões baixo voláteis e maior quantidade de matéria volátil contida no alcatrão utilizado para aglomerar o briquete.



**Figura 5.13:** Contração da amostra em função da % de briquete na mistura da carga.

## 6 CONCLUSÕES

Comparando-se os resultados dos briquetes, o briquete contendo 5% em peso de alcatrão obteve os melhores resultados de resistência mecânica.

Briquetes com a utilização de alcatrão superior a 5% em peso como material ligante possui menor resistência mecânica, o que leva a conclusão de que quanto maior a quantidade de material aglomerante, menor a resistência física do mesmo.

A resistência mecânica dos briquetes aumenta com o tempo de cura, com um valor ótimo no período de 25 a 30 dias.

A qualidade do coque aumentou em todos os quesitos com a utilização parcial dos briquetes comparando-se os resultados do coque produzido com e sem a utilização de briquetes na mistura da carga.

A produção do coque utilizando o briquete contendo 5% em peso de alcatrão obteve os melhores resultados para DI, CSR, CRI e quantidade de coque metalúrgico produzido.

O coque produzido contendo briquete com 5% em peso de alcatrão na mistura da carga obteve o menor *coke rate*, podendo reduzir em até 26kg de coque por tonelada de gusa.

A produção de coque metalúrgico aumentou em 4,96% utilizando 30% de briquetes na mistura da carga.

As amostras contendo 20% de briquetes na carga de carvão garante a estabilidade da vida útil da bateria de fornos mais antigos da coqueria. Entretanto, em fornos mais novos a quantidade de 30% de briquete também está dentro do limite como visto no ensaio de expansão e contração da carga.

Com os resultados apresentados neste trabalho, a utilização dos briquetes para fabricação do coque se torna adequada em termos de qualidade metalúrgica e produtiva. Os estudos mostram uma diminuição na qualidade do briquete com o acréscimo de alcatrão acima de 5% em peso, bem como uma menor qualidade físico-química do coque produzido.

## **7 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS**

Baseado nos estudos realizados sugere-se a realização de testes de produção de coque em escala industrial, bem como diferentes tipos de aglomerantes que visem uma maior densidade de carga e uma maior qualidade do coque metalúrgico.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, F. I. C. **Produção de Coque Metalúrgico a Partir de Carvão Densificado por Vibrocompactação em Forno de Soleira Aquecida**. 2017. 77f. Dissertação de mestrado (Mestrado em Engenharia de Materiais) – REDEMAT- Rede Temática em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

ARAÚJO, L. A.; **Manual de Siderurgia**. 2. ed. São Paulo: Arte & Ciência, v. 1. 2009. 470p.

ASSIS, P. S. **Curso de injeção de materiais pulverizados em altos-fornos**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. 2009. 304p.

BARBOSA, V. **Os 15 países com as maiores reservas de carvão do mundo**. EXAME. Disponível em: <<http://exame.abril.com.br/economia/noticias/os-15-paises-com-as-maiores-reservas-de-carvao-do-mundo#6>>. Acesso em: 28 out. 2015.

BAYUL, K. V. Effect of the Geometrical Parameters of Roll Press Forming Elements on the Briquetting Process: Analytical Study. **Powder Metallurgy and Metal Ceramics**, v. 51, n. 3-4, p. 157-164, 2012.

Biomania. **Alcatrão**. Disponível em: <<http://www.biomania.com.br/bio/conteudo.asp?cod=2685>>. Acesso em 26 out. 2015.

BODZIONY, J.; KRAWCZYK, J.; TOPOLNICKI, J. Determination of the Porosity Distribution in Coal Briquettes by Measurements of the Gas Filtration Parameters in an Outburst Pipe. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, Great Britain, v. 31, n. 6, p. 661-669, 1994.

BORGHI, M. M. **Efeito da Granulometria na Avaliação dos Briquetes**. 2012. 37f. Trabalho de conclusão de curso (Monografia em Engenharia Industrial Madeireira) - Departamento de Ciências Florestais e da Madeira, Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2012.

BOROWSKI, G.; HYCNAR, J. J. Utilization of Fine Coal Waste as a Fuel Briquettes. **International Journal of Coal Preparation and Utilization**, v. 33, p. 194-204, 2013.

BRITO, J. O. **Estudo sobre a produção de carvão e briquetes de carvão de casca de pinus**. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". 1986. 58p.

CALDEIRA, J. G. Teoria da Coqueificação. In: ULHÔA, Murilo B. **Carvão Aplicado à Fabricação de Coque de Alto Forno**. São Paulo: ABM, 2003. p.104-152.

CARNEIRO, R. T. S. O papel do coque no alto-forno. In: Programa de educação continuada, 2003, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABM, 2003. 9p.

CARVALHO, E. A. D.; BRINCK, V. Briquetagem. In: A. B. LUZ, J. A. SAMPAIO, S. C. A. FRANÇA. **Tratamento de Minérios**. Rio de Janeiro: CETEM, 2004. p. 613-636.

CASAGRANDE, C.M. **Avaliação dos parâmetros de CRI e CSR do coque produzido em forno industrial, forno de soleira aquecida e box test**. 2010. 102f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

CASTRO, J. A.; GONÇALVES, J. M.; BALTAZAR, A. W. S.; SILVA, A. J.; VILELA, A. C. F.; OSÓRIO, E. Estudo do Comportamento do alto-forno operando com injeção auxiliares de carvões mineral e vegetal pulverizados. In: Seminário de redução de minério de ferro e matérias-primas, 1., 2006, Ouro Preto. **Anais...** São Paulo: ABM, 2006. p. 223–231.

CLARKE, D. E. e MARSH, H. Factors influencing properties of coal Briquetes. **Fuel**, v. 68, p. 1031-1038, 1989.

CLARKE, D. E. e MARSH, H. Influence of coal/binder interactions on mechanical strength of briquettes. **Fuel**, v. 68, p. 1023-1030, 1989.

COSTA, L. **Parâmetros de controle do processo de coqueificação das baterias de fornos de coque da Cosipa**. 2008. 89f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

CUNHA, A. F.; MOL, M. P. G.; MARTINS, M. E.; ASSIS, P. S. Caracterização, beneficiamento e reciclagem de carepas geradas em processos siderúrgicos. **Revista Escola de Minas**, n. 59, p. 111-116, 2006.

DEHONT, F. **Coal Briquetting Technology**. SAHUT-CONREUR S.A. Raismes, 10p. 2006.

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

DNPM. **Sumário Mineral**. Departamento Nacional de Produção Mineral. Brasília, 152p. 2014. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/sumario-mineral-2014>>. Acesso em: 16 nov. 2015.

DOLLIMORE, D.; DOLLIMORE, J.; NOWELL, D. V. The pore structure of coal briquettes prepared at various compacting pressures. **British Journal Applied Physics**, v. 14, p. 365-367. 1963.

ELLISON, G. e STANMORE, B. R. High Strength Binderless Brown Coal Briquettes. Part I. Production and Properties. **Fuel Processing Technology**, v. 4, p. 277-289. 1981.

ELLISON, G. e STANMORE, B. R. High Strength Binderless Brown Coal Briquettes. Part II. An Investigation Into Bonding. **Fuel Processing Technology**, v. 4, p. 291-304, 1981.

FLINT, R. V. Effect of Burden Materials and Practices on Blast Furnaces Coke Rate. **Blast Furnace and Steel Plant**, v. 50, n. 1, p.47-58 e 74-76, 1962.

FOGAÇA, J. R. V. **Alcatrão**. Brasil Escola. Disponível em: <<http://www.brasilecola.com/quimica/alcatrao.htm>>. Acesso em: 26 out. 2015.

FONTES, P. J. P; QUIRINO, W. F.; OKINO, E. Y. A. **Aspectos Técnicos da Briquetagem do Carvão Vegetal no Brasil**. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Brasília, 14p. 1989.

FREITAS, E. D. **Carvão Mineral**. Brasil Escola. Disponível em: <<http://www.brasilecola.com/geografia/carvao-mineral.htm>>. Acesso em: 28 out. 2015.

GRANDIN, F. H. Compacting and Briquetting. In: Environmental Technology Applications. **Powder Handling and Processing**, v. 6, n. 1, 1994.

JON, H. e IDA, S. Metallurgical Coke Manufacturing Method by Blending Raw Briquette. **Technical Research Institute of Yawata Iron and Steel Works**, 7p. 1960.

JUNIOR, A. M. e ZANCAN, F. L. Carvão mineral nacional. In: Associação Brasileira do Carvão Mineral, 2006, Ouro Preto. **Anais...** Criciúma: ABCM, 2006. 25p.

KALIYAN, N. e MOREY, R. V. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, n. 3, p. 337–359, 2009.

KAMINSKI, D. e PERUCH, F. Estudo da Influência do uso de Aglomerantes sobre as Propriedades do Coque Metalúrgico. In: CREEM, 18., 2011, Erechim. **Anais...** Rio de Janeiro: ABCM, 2011. 2p.

KATO, K.; NOMURA, S.; ARIMA, T.; NAITO, M., UEMATSU, H. Effect of Coal Pre-treating Technology on Coke Strength. In: The Iron & Steel Technology Conference and Exposition, 2007, Pittsburgh. **Proceedings...** Pittsburgh: AISTech, 2007, 10p.

KOCH, A.; GRUBER, R.; CAGNIANT, D.; PAJAK, J.; KRZTON, A.; DUCHÈNE, J. M. A physicochemical study of carbonization phases. Part. I. Tars migration and coking pressure. **Fuel Processing Technology**, n. 45, p. 135-153, 1995.

KOMAREK, R. K. Binderless Briquetting of Peat, Lignite, Sub-Bituminous and Bituminous Coals in Roll Press. In: Biennial Conference, 4., 1991, San Antonio. **Proceedings...** San Antonio: TX. 1991. 233-242 p.

KUYUMCU, H.Z.; ABEL, F.; Evaluation of coal blend densification and coal cake stability within the stamped charged cokemaking operation. In: ECIC-METEC InSteelCon, 2011, Session 19, Stamp Charging in Cokemaking. Düsseldorf, Germany. **Proceedings...** Düsseldorf: ECIC-METEC, 2011, 10 p.

LIMA, B. S. C. **Briquetagem de Carvões para Produção de Coque Metalúrgico**. 2016. 81f. Trabalho de conclusão de curso (Monografia em Engenharia Metalúrgica) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

LOISON, R.; FOCH, P.; BOYER, A. **Coke: Quality and Production**. 2. ed. London: Butterworth-Heinemann, 1989. 570p.



LUZ, A. B. D.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de Minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/CNPq, 2010. 963p.

MADIAS, J.; CÓRDOVA, M. A Review on Stamped Charging of Coals. In: The Iron & Steel Technology Conference and Exposition, 2013, Pittsburgh. **Proceedings...** Pittsburgh: AISTech, 2013, 10p.

MERRICK, D. Mathematical models of the thermal decomposition of coal. **Fuel**, v. 62, p. 534 – 561. 1983.

MOCHIDA, Y. e HONDA, H. Hardness of briquetted coal. In: Symposium on Low Temperature Carbonisation of Non-caking Coals and Lignite and Briquetting of Coal Fines, 1., 1963, Hyderabad. **Anais...** Hyderabad: CSIR, 1963, 22p.

MUKHERJEE, A. N. Briquetting of coal. **By-product Plant**, Giridih, v. 6, n. 3, p. 387-393, 1940.

MONTIANO, M. G.; DÍAZ-FAES, E.; BARRIOCANAL, C. Partial briquetting vs direct addition of biomass in coking blends. **Fuel**, v. 137, p. 313-320, 2014.

NASCIMENTO, L. M. **Simulação física a frio da densificação da mistura de carvões em coqueria via vibração mecânica**. 2016. 84f. Dissertação de mestrado (Mestrado em Engenharia de Materiais) – REDEMAT- Rede Temática em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) and Japan Coal Energy Center (JCOAL). **Briquette Production Technology**. In: Japan Coal Energy Center, 2014, Tokio. Disponível em: <<http://www.jcoal.or.jp/eng/cctinjapan/>>. Acesso em: 20 jul. 2015.

NIPPON STEEL e SUMIKIN ENGINEERING CO., LTD. **Fluidized Bed type CMC Utilizing Coke Oven Exhaust Gas**. Disponível em: <[https://www.eng.nssmc.com/english/whatwedo/steelplants/ironmaking/coal\\_moisture\\_control/](https://www.eng.nssmc.com/english/whatwedo/steelplants/ironmaking/coal_moisture_control/)> Acesso em: 20 jul. 2017.

NOMURA, S.; NAITO, M.; YAMAGUSHI, K. Post-reaction Strength of Catalyst-added Highly Reactive Coke. **ISU International**, v. 47, n. 6, p. 831 – 839, 2007.

PATIL, D. P.; TAULBEE, D.; PAREKH, B. K.; HONAKER, R. Briquetting of Coal Fines and Sawdust – Effect of Particle-size Distribution. **International Journal of Coal Preparation and Utilization**, v.29, p. 251–264. 2009.

PEREIRA, F. A.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; LÚCIA, R. M. D.; JÚNIOR, W. P.; BIANCHE, J. J. Propriedades físico-químicas de briquetes aglutinados com adesivo de silicato de sódio. **Floresta e Ambiente**, v. 16, n. 1, p. 23-29, 2009.

PLANCHER, H.; AGARWAL, P. K.; SEVERNS, R. Improving form coke briquette strength. **Fuel Processing Technology**, v. 79, p. 83-92. 2002.

PUROHIT, P.; TRIPATHI, A. K.; KANDPAL, T. C. Energetics of Coal Substitution by Briquettes of Agricultural Residues. **Energy**, v. 31, p. 1321–1331, 2006.

QUIRINO, W. F.; BRITO, J. O. **Características e índice de combustão de briquetes de carvão vegetal**. IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Brasília, n. 13, 18p. 1991.

RAHMAN, A. N. E.; MASOOD, M. A.; PRASAD, C. S. N.; VENKATESHAM, M. Influence of Size and Shape on the Strength of Briquettes. **Fuel Processing Technology**, v.23, p. 185-195. 1989.

RAMMLER, E. e METZNER, H. About the relation between briquette thickness, strength and briquetting pressure. **Freib, Forschungsh**, v. 135, p. 36-43. 1953.

RICHARDS, S. R. Briquetting Peat and Peat-Coal Mixtures. **Fuel Processing Technology**, v. 25, p. 175-190. 1990.

RICHARDS, S. R. Physical Testing of Fuel Briquettes. **Fuel Processing Technology**, v. 25, p. 89-100. 1990.

RUBIO, B.; IZQUIERDO, M. T.; SEGURA, E. Effect of binder addition on the mechanical and physicochemical properties of low rank coal char briquettes. **Carbon**, v. 37, p. 1833-1841. 1999.

SATO, H. **Strength of metallurgical coke in relation to fissure formation**. 1999. 173f. Tese (Doutorado em Filosofia) – Loughborough University, Londres, 1999.

SCHINZEL, W. **The briquetting of coal**. Centro de Tecnologia Mineral - CETEM. 1981.

SCHWEITZER, P. A. **Paint and Coatings: applications and corrosion resistance**. Boca Raton: CRC press, 2006. 647p.

SERVICES, A. **Study of Factors Affecting Coke Reactivity and Strength after Reaction**. [S.l.], 2003.

SILVA, G. L. R.; DESTRO, E.; MARINHO, G. M.; ASSIS, P. S. Caracterização Química, Física e Metalúrgica das Frações Granulométricas da Mistura de Carvão da Gerdau Aço Minas In: ABCM, 3., 2011, Gramado. **Anais...** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Ciências Mecânicas, 2011. 13p.

SILVA, G. L. R.; DESTRO, E.; MARINHO, G. M.; ASSIS, P. S. Problema na otimização de mistura de carvão na produção de coque metalúrgico. In: ABCM, 3., 2011, Gramado. **Anais...** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Ciências Mecânicas, 2011. 14p.

SILVA, G. L. R.; AMARAL, P. A.; BRAGA, E. M. H.; AMORIM, L. C.; ASSIS, P. S. Partial briquetting of the coal blend. In: 47<sup>o</sup> Redução, 2017, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2017. 9p.

SILVA, O. J. **Caracterização tecnológica de carvões para coqueria**. 2008. 113f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.

SKOCZYLAS, N.; DUTKA, B.; SOBCZYK, J. Mechanical and gaseous properties of coal briquettes in terms of outburst risk. **Fuel**, v. 134, p. 45-52, 2014.

TAYLOR, J. W. e HENNAH, L. The effect of binder displacements during briquetting on the strength of formed coke. **Fuel**, v. 70, p. 873-876, 1991.

ULHÔA, M. B. **Britabilidade de carvões**. Seminário ABM, Rio de Janeiro. 1988.

ULHÔA, M. B. **Carvão aplicado à fabricação de coque de alto-forno**. São Paulo: ABM, 2003. 130p.

UZUMKESICI, E. S.; CASAL-BANCIELLA, M. D.; McRAE, C.; SNAPE, C. E.; TAYLOR, D. Co-processing of single plastic waste streams in low temperature carbonization. **Fuel**, v. 78, p. 1697–1702. 1999.

VALIA, H. S e ELLIS, A. R. Non-Recovery Operating Practices From Around the World. In: The Iron & Steel Technology Conference and Exposition, 2008, Pittsburgh. **Proceedings...** Pittsburgh: AisTech, 2008, 21p.

VIANA, O. A. **Estudo para o uso de matérias-primas nacionais em misturas de carvões para obtenção de coque com características requeridas em altos-fornos de alta produtividade.** 2007. 108f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

**World Coal Institute.** 2006. Disponível em: <[www.worldcoal.org](http://www.worldcoal.org)>. Acesso em: 16 nov. 2015.

ZUBKOVA, V.; STROJWAS, A.; STROJANOWSKA, M.; KOWALCZYK, J. The influence of composition of coal briquettes on changes in volume of the heated coal charge. **Fuel Processing Technology**, v. 128, p. 265-275. 2014.