

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

Diogo Gonçalves de Souza

**ESTUDO DE CASO DA EFICIÊNCIA DE PENEIRAMENTO NA DISTRIBUIÇÃO DE  
COQUE PARA ALTO-FORNO**

Ouro Branco

2025

DIOGO GONÇALVES DE SOUZA

**ESTUDO DE CASO DA EFICIÊNCIA DE PENEIRAMENTO NA DISTRIBUIÇÃO DE  
COQUE PARA ALTO-FORNO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso Bacharelado em Engenharia Metalúrgica do Instituto Federal de Minas Gerais - *Campus* Ouro Branco para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Guilherme Liziero Ruggio da silva

Ouro Branco

2025

S729e Souza, Diogo Gonçalves de.

Estudo de caso da eficiência de peneiramento na distribuição de coque para alto-forno/ Diogo Gonçalves de Souza. – 2024.

59f.: il.col.

Orientador: Guilherme Liziero Ruggio da Silva.

Trabalho de Conclusão de Curso (bacharelado) – Instituto Federal de Minas Gerais. *Campus Ouro Branco*, 2025.

1. Coque. 2. Eficiência de peneiramento. 3. Alto-forno. 4. Manuseio de coque. I Souza, Diogo Gonçalves de. II. Silva, Guilherme Liziero Ruggio da. III. Instituto Federal de Minas Gerais. *Campus Ouro Branco*. IV. Título.

CDU: 620.11



**INSTITUTO FEDERAL DE MINAS GERAIS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA  
CURSO DE ENGENHARIA METALÚRGICA**

**DOCUMENTO ÚNICO DE DEFESA DE TCC (ANEXO IV)**

**ATA DA DEFESA DE TCC**

No dia 17/02/2025, às 19:00 horas, o aluno DIDGO GONÇALVES DE SOUZA, do curso de ENG. METALÚRGICA turma \_\_\_\_\_ do IFMG – Campus Ouro Branco defendeu o ( ) TCC I () TCC II e foi APROVADO (aprovado/reprovado) com a nota 10,0, que está condicionada ao cumprimento dos procedimentos pós-defesa do TCC. Caso seja aprovado, deverá apresentar o trabalho com as devidas modificações e no formato solicitado em 25/02/2025.

O aluno está ciente de que, caso não cumpra os procedimentos pós-defesa de TCC até a data estipulada, sua nota será considerada zero e a sua defesa será anulada. Também está ciente de que o trabalho de conclusão de seu curso poderá ser divulgado pela Instituição através dos seus meios de comunicação.

Observações pertinentes da defesa:

---



---



---

**DECLARAÇÃO ANTI-PLÁGIO**

Eu, Diogo Gonçalves de Souza, estudante do curso Engenharia Metalúrgica do IFMG – Campus Ouro Branco, declaro, para os devidos fins e efeitos, e para fazer prova junto ao IFMG – Campus Ouro Branco, que, **sob as penalidades previstas no art. 299 do Código Penal Brasileiro**, que é de minha criação o trabalho de conclusão de curso que ora apresento.

**Art. 299 do Código Penal Brasileiro, que dispõe sobre o crime de Falsidade Ideológica:**

"Omitir, em documento público ou particular, declaração que dele devia constar, ou nele inserir ou fazer inserir declaração falsa ou diversa da que devia estar escrita, com o fim de prejudicar direito, criar obrigação ou alterar verdade sobre fato juridicamente relevante: Pena — reclusão, de 1 (um) a 5 (cinco) anos, e multa, se o documento é público, e reclusão de 1 (um) a 3 (três) anos, e multa, se o documento é particular.

Parágrafo único. Se o agente é funcionário público, e comete o crime prevalecendo-se do cargo, ou se a falsificação ou alteração é de assentamento de registro civil, aumenta-se a pena de sexta parte." Este crime engloba plágio e compra fraudulenta de documentos científicos.

Por ser verdade, e por ter ciência do referido artigo, firmo a presente declaração.

Assinatura do aluno: \_\_\_\_\_

**NOME COMPLETO E ASSINATURA DOS COMPONENTES DA BANCA E DO ORIENTADO**

Orientador(a): Nome: Quilherme Luiz R L Assinatura: \_\_\_\_\_  
 Membro 2: Nome: Carlos Roberto Ferreira Assinatura: \_\_\_\_\_  
 Membro 3: Nome: Leticia Maria de M. S. Cheloni Assinatura: Lm M Cheloni  
 Membro 4: Nome: \_\_\_\_\_ Assinatura: \_\_\_\_\_  
 Membro 5: Nome: \_\_\_\_\_ Assinatura: \_\_\_\_\_  
 Aluno: Nome: Diogo Gonçalves de Souza Assinatura: \_\_\_\_\_

## RESUMO

As matérias primas carregadas no alto-forno têm grande influência sobre os parâmetros e controles operacionais do reator. A permeabilidade da carga no interior do alto-forno está diretamente ligada ao tamanho e formato das matérias primas, nele, carregadas sendo assim o conhecimento da eficiência do sistema de peneiramento no processo de preparação da carga torna-se fundamental no controle de entrada de finos que influenciam negativamente na passagem dos gases gerados no *raceway* em direção ao topo do alto-forno. Este trabalho tem por objetivo principal realizar um estudo de caso sobre um sistema de peneiramento de coque de uma usina siderúrgica, buscando conhecer sua eficiência de peneiramento e qualidade de separação. O estudo aborda os conceitos de preparação de carga para um alto-forno, dando destaque para a carga de redutor (coque), responsável por aproximadamente 30% do custo de produção de aço, a etapa de separação por tamanhos de partículas utilizando métodos de análises granulométricas do coque alimentado e dos produtos gerados, observando a influência e relevância da umidade, realizando uma análise da condição do sistema e dos controles, até então, existentes para propor ações de melhoria diretamente ligadas as condições reais de processo. Para tal fim foram realizadas 20 amostragens em um período de 5 dias, essas amostras foram coletadas a partir da alimentação e das três frações granulométricas geradas, realizado análises granulométrica e da umidade no laboratório interno da siderúrgica, com os dados gerados foram plotadas curvas granulométricas dessas amostras e determinação do tamanho médio. Para a determinação da eficiência de peneiramento, além de formulações descritas por Carvalho (2004), a faixa retida em 11 mm foi determinada a partir da aplicação da lei de distribuição granulométrica de Rosin-Rammler-Bennet. A eficiência do sistema de peneiramento foi inferior a faixa de 80 a 90%, esperado para peneiramento industrial. O primeiro deck, apresenta, até então, um valor médio de aproximadamente 77%, a retenção de grossos, acima de 25 mm, atingiu valores superiores a 90%. No segundo deck, a eficiência global média foi de 58% com recuperação de produto, acima de 11 mm, máxima de 78%. A eficiência de recuperação de finos se mostrou adequada, para os dois decks, gerando um valor médio aproximadamente 90%. A partir da avaliação das variáveis de processo e condição atual do sistema foi possível propor ações simples, como criar rotina periódica de troca de telas, que poderão aumentar o desempenho de separação granulométrica e ganhos potenciais em desempenho do alto-forno com a redução da entrada de finos a partir da carga puramente de redutor (coque).

**Palavras-chave:** Coque. Eficiência de peneiramento. Alto-forno. Manuseio de coque

## ABSTRACT

The raw materials charged into the blast furnace have a significant influence on the operational parameters and controls of the reactor. The permeability of the charge inside the blast furnace is directly related to the size and shape of the raw materials loaded into it. Therefore, understanding the efficiency of the screening system in the charge preparation process becomes fundamental in controlling the entry of fines, which negatively affect the passage of gases generated in the raceway towards the top of the blast furnace. This work aims to conduct a case study on a coke screening system at a steel plant, seeking to understand its screening efficiency and separation quality. The study addresses the concepts of charge preparation for a blast furnace, with a focus on the reductant charge (coke), which accounts for approximately 30% of steel production costs. It examines the particle size separation stage using granulometric analysis methods of the fed coke and the generated products, observing the influence and relevance of moisture. It also analyzes the condition of the system and the existing controls to propose improvement actions directly linked to the actual process conditions. For this purpose, 20 samples were taken over a period of 5 days. These samples were collected from the feed and the three generated granulometric fractions, with granulometric and moisture analyses conducted in the steel plant's internal laboratory. The generated data were used to plot granulometric curves of these samples and determine the average size. To determine the screening efficiency, in addition to formulations described by Carvalho (2004), the fraction retained at 11 mm was determined by applying the Rosin-Rammler-Bennet particle size distribution law. The screening system's efficiency was below the expected range of 80 to 90% for industrial screening. The first deck showed an average value of approximately 77%, with the retention of coarse particles above 25 mm reaching values above 90%. On the second deck, the overall average efficiency was 58%, with a maximum product recovery above 11 mm of 78%. The fine recovery efficiency was adequate for both decks, generating an average value of approximately 90%. Based on the evaluation of process variables and the current condition of the system, it was possible to propose simple actions, such as establishing a periodic screen replacement routine, which could improve granulometric separation performance and potentially enhance blast furnace performance by reducing the entry of fines from the purely reductant charge (coke).

**Keywords:** Coke. Screening efficiency. Blast furnace. Coke handling

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>3</b>
2.1. OBJETIVO GERAL .....	3
2.2. OBJETIVO ESPECÍFICO .....	3
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>4</b>
3.1. PROCESSO DE PRODUÇÃO DE COQUE .....	4
3.1.1. <i>Coqueria by-products</i> .....	4
3.1.2. <i>Coqueificação</i> .....	5
3.2. PARÂMETROS DE QUALIDADE DO COQUE .....	8
3.2.1. <i>Resistencia do coque</i> .....	8
3.2.2. <i>Distribuição granulométrica de carvão e coque</i> .....	9
3.2.3. <i>Reatividade do coque</i> .....	12
3.2.4. <i>Química do coque</i> .....	14
3.3. FUNÇÕES DO COQUE NO ALTO FORNO .....	16
3.3.1. <i>Função térmica e química</i> .....	17
3.3.2. <i>Função física</i> .....	18
3.4. MANUSEIO DO COQUE .....	19
3.5. PENEIRAMENTO .....	22
3.6. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO.....	24
3.6.1. <i>Amostragem</i> .....	24
3.6.2. <i>Preparação da amostra</i> .....	25
3.7. EFICIÊNCIA DE PENEIRAMENTO.....	26
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>31</b>
4.1. PLANO DE AMOSTRAGEM .....	31
4.2. MÉTODO DE COLETA .....	32
4.3. ANÁLISE DE PENEIRAMENTO .....	33
4.4. ANÁLISE DE UMIDADE.....	34
4.5. DETERMINAÇÃO DAS EFICIÊNCIAS DE PENEIRAMENTO.....	34
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>37</b>
5.1. CARACTERÍSTICAS GRANULOMÉTRICAS .....	43
5.2. APLICAÇÃO DA LEI DE DISTRIBUIÇÃO DE ROSIN-RAMMLER-BENNET.....	45
5.3. EFICIÊNCIA DO SISTEMA DE PENEIRAMENTO .....	47
5.4. UMIDADES .....	50
5.5. OVERVIEW DO SISTEMA.....	53
5.6. PROPOSTAS DE MELHORIAS DO SISTEMA.....	55
5.6.1. <i>Recuperação de produto</i> .....	55
5.6.2. <i>Remoção de finos</i> .....	56
<b>6. CONCLUSÃO.....</b>	<b>58</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>54</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Em uma usina siderúrgica integrada, a produção de ferro gusa representa maior fatia do custo de produção, pensando em estabilidade operacional e produtividade, o tratamento das matérias primas é de suma importância. As demandas para a carga do alto-forno se estendem à composição química e a resistência física. A composição química deve ser tal que, após os processos de redução e fusão, sejam produzidas as composições corretas de ferro e escória, e isso será determinado pela composição química de todos os materiais carregados no forno (GEERDES et al., 2009).

As especificações físicas do coque são caracterizadas pela resistência mecânica a fragmentação e abrasão e a distribuição de tamanho. A forma das partículas e a distribuição granulométrica são os fatores decisivos para a permeabilidade do leito, tanto para o gás ascendente como para os líquidos descendentes. O tamanho médio do coque metalúrgico geralmente varia entre de 45 e 55 mm (GEERDES *et al.*, 2009).

Durante a preparação das matérias primas, um peneiramento adequado é primordial para o controle de tamanho das partículas que serão carregadas no reator. O coque após ser desenfundado e resfriado na coqueria, passa por uma etapa de peneiramento, com o objetivo de realizar a separação das frações finas gerando três produtos, o coque metalúrgico, com granulometria predominante entre 25 e 100 mm, enviado para os silos ou carregado nos Altos Fornos, o “Coque *Small*” fração intermediária, tipicamente entre 11 e 25 mm e o coque fino, também conhecido como “Coque *Breeze*”, com predominância de partículas menores que 11 mm.

Para tal, o conhecimento e controle do processo de peneiramento bem como a sua eficiência é de grande valia para determinar parâmetros que garantem uma separação eficiente e a destinação dos produtos gerados aos consumidores adequados. Além de beneficiar no controle de finos carregados no alto-forno, uma vez que um alto percentual de finos deve ser evitado pois têm uma influência negativa na operação do reator, a separação eficiente do coque, por ser uma matéria-prima de alto valor agregado, influencia diretamente no custo de produção do gusa.

Este trabalho tem como objetivo a realização de um estudo de caso da eficiência de uma peneira de coque de uma siderúrgica típica da região, utilizando formulações de cálculo

de eficiências propostas por Carvalho (2004) e o modelo de distribuição granulométrica de Rosin-Rammler, descritos por Silva (2016).

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. Objetivo geral

Estudar um sistema de peneiramento de coque de uma usina siderúrgica, buscando conhecer sua eficiência de peneiramento e qualidade de separação granulométrica.

### 2.2. Objetivo Específico

- a) Realizar amostragens do coque alimentado na peneira e dos produtos gerados, passante (*undersize*) e do retido (*oversize*);
- b) Conhecer as características granulométricas da alimentação e dos produtos gerados, passante (*undersize*) e do retido (*oversize*);
- c) Determinar a umidade da alimentação e dos produtos gerados;
- d) Determinar a eficiência do sistema de peneiramento;
- e) Propor melhorias visando aumentar a eficiência de peneiramento ou consolidar informações de operação dentro da rotina

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. Processo de produção de coque

Segundo Giglio (2016), o processo de coqueificação consiste basicamente no aquecimento de carvões coqueificáveis, até cerca de 1.450°C em ausência de oxigênio, onde ocorre a decomposição térmica do carvão carregado, que dá origem aos produtos voláteis e a um resíduo, como ilustrado na Figura 1, sólido carbonoso, macroporoso e de alta resistência mecânica, chamado coque. A destinação ou utilização dos produtos voláteis vai depender do tipo de processo de coqueificação utilizado.

Figura 1 – Partículas de coque de origem nacional



Fonte: (BARBOSA, 2018)

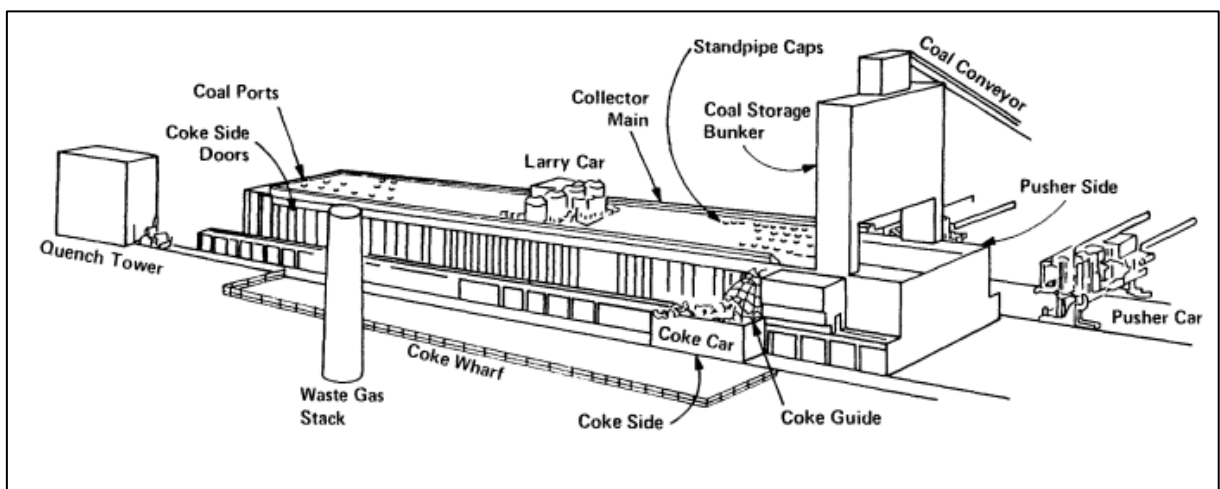
Na atualidade, os processos de obtenção do coque metalúrgico se dão, principalmente, em coquearias convencionais *by-products* em fornos verticais e pelo método *non-recovery/heat recovery* em fornos horizontais do tipo colmeia (CASAGRANDE, 2010).

##### 3.1.1. Coqueria *by-products*

O processo convencional de produção de coque (*by-products*), este sendo o mais utilizado na siderurgia, é caracterizado, principalmente, por realizar a separação e limpeza dos gases gerados durante a coqueificação do carvão mineral (GIGLIO, 2016). Os fornos são verticais em formato paralelepípedos, geralmente, com 11 a 15 m de comprimento, 3 a 7 m de altura com largura entre 300 e 350 mm, as paredes de aquecimento são construídas com tijolos refratários de sílica e vedadas de forma que não haja passagem de gás e entre essas paredes existem câmaras de combustão, onde o gás é queimado para fornecer energia térmica para o

processo (SILVA, 2011). O gás bruto gerado é direcionado a uma área da usina siderúrgica chamada de carboquímicos, onde é realizada a limpeza e destilação do gás gerado no processo de coqueificação, obtendo os subprodutos como gás de coqueria limpo, piche, alcatrão, óleos leves, amônias, enxofre. O gás de coqueria limpo é utilizado na própria coqueria para aquecimento dos fornos ou para fornos de reaquecimento das laminações e das sinterizações. A Figura 2 apresenta uma visão esquemática de uma coqueria “*by-products*”, com seus principais componentes.

Figura 2 - Representação esquemática dos componentes de uma coqueria convencional



Fonte: (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 1987)

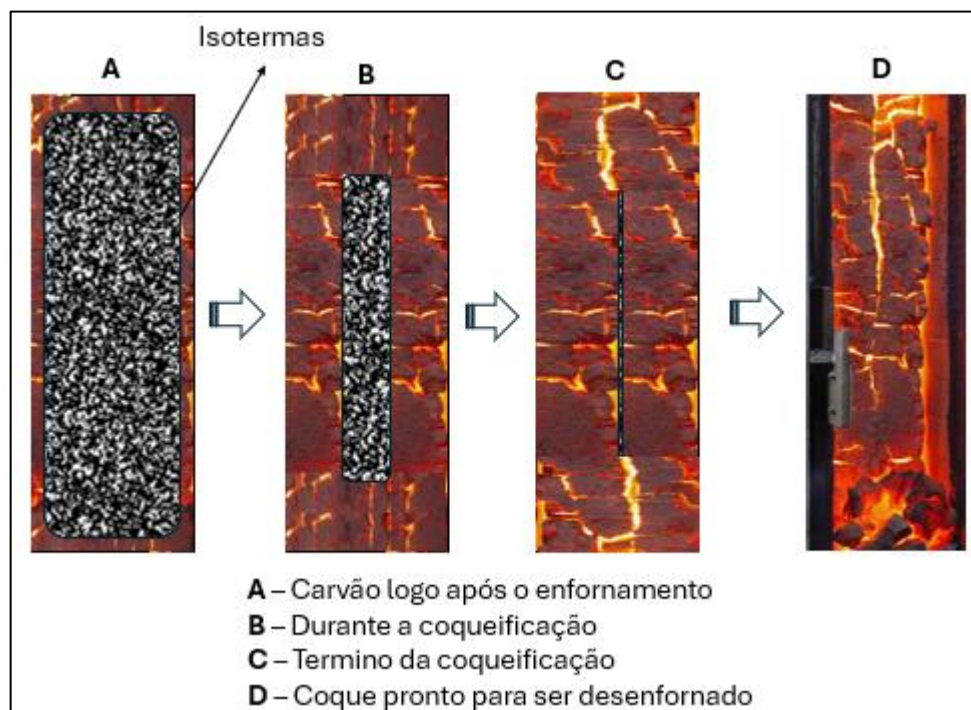
### 3.1.2. Coqueificação

A coqueificação pode ser entendida como a transformação do carvão betuminoso, também conhecido como carvão metalúrgico, em coque no interior dos fornos de coqueria. Neste processo, o carvão, após passar por operações de processamento que controlam a distribuição granulométrica e a composição da mistura, é alimentado em uma série de fornos (ALVES, 2017).

Uma câmara ou forno possui duas portas, uma em cada extremidade, cobrindo quase toda a área da secção transversal, na parte superior existem entre 3 e 5 orifícios chamado bocas de carga e uma saída de gás (tubo de ascensão). A combustão dos gases em queimadores localizados logo abaixo dos fornos fornece calor para o processo (EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, 1987).

Quando carregado dentro dos fornos, o carvão entra em contato com as paredes aquecidas, o calor é transmitido por condução para o centro da carga, da superfície de cada parede surgem duas frentes planas isotérmicas, que avançam para o centro da carga (SILVA, 2011). O “*Coking-rate*” é determinado pela velocidade de avanço destas isoterms, Figura 3, e a partir do encontro das duas frentes plásticas se dará o término do processo de coqueificação (OLIVEIRA, 2017). Em média para a coqueificação total de um a carga de carvão em fornos industriais, o tempo, varia entre 13 e 14 horas, influenciado pela largura do forno, a temperatura de operação e densidade da carga (SILVA, 2011).

Figura 3 - Esquemático do avanço das isoterms no processo de coqueificação em um forno vertical.



Fonte: Adaptado de (OLIVEIRA, 2017)

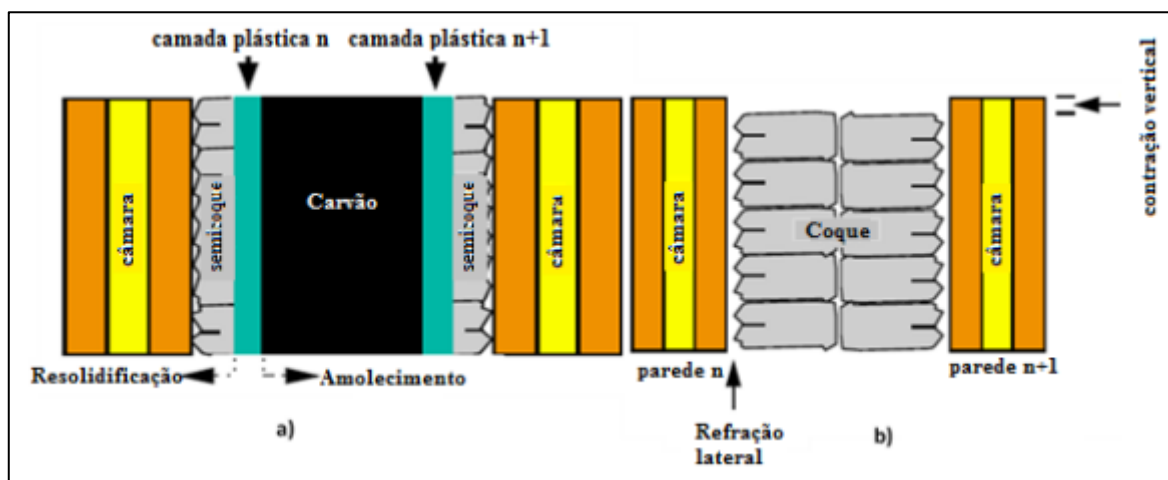
A coqueificação pode ser dividida em seis etapas distintas que são determinadas em função da temperatura de coqueificação e da fluidez do carvão (SILVA, 2008; ALVES, 2017):

- a) Primeiro estágio (desgaseificação) – Ocorre, aproximadamente, na faixa de temperatura entre 350 e 550°C, com o desprendimento de hidrocarbonetos e todo o alcatrão;
- b) Segundo estágio (amolecimento) – Este estágio se processa em temperaturas aproximadas de 550 a 900°C, esta etapa corresponde ao princípio físico de fusão de materiais termoplásticos;

- c) Terceiro estágio (zona plástica) – Ocorre a competição de duas reações a de condensação e a de craqueamento produzindo substâncias de alto peso molecular gerando baixa permeabilidade gasosa implicando em um aumento da pressão interior da zona plástica empurrando o coque entre as paredes do forno comprimindo o carvão;
- d) Quarto estágio (inchamento) – Com o aumento da quantidade de gás na zona plástica, rapidamente tem-se o inchamento do carvão e em virtude desta da plasticidade térmica dos carvões ocorre o desenvolvimento da pressão contra as paredes dos fornos durante a coqueificação causando uma deformação dos grãos sólidos e a decomposição da matéria orgânica podendo implicar na evolução dos produtos voláteis;
- e) Quinto estágio (ressolidificação) – Ocorre quando as reações de condensação superam as de craqueamento tem-se a decomposição térmica e a massa plástica se converte irreversivelmente ao estado sólido;
- f) Sexto estágio (contração) – Com os resultados das reações de condensação e liberação de hidrogênio ocorre a contração e o aparecimento de fissuras na estrutura do coque já formado.

A Figura 4 apresenta de forma esquemática os estágios de coqueificação em um forno de coqueria.

Figura 4 - Comportamento do carvão dentro de um forno de coqueria



Fonte: (ULHOA, 2003 Apud OLIVEIRA, 2017)

### 3.2. Parâmetros de qualidade do coque

Os parâmetros de qualidade do coque podem ser resumidos em composição química e resistência física, estes, avaliados pela capacidade de preencher os requisitos básicos exigidos no alto-forno a partir das funções desempenhadas no processo ou fatores que atuam sobre ele durante a passagem pelo reator. O teor de umidade e cinzas, quando elevados, do coque afeta negativamente o desempenho do alto-forno porque diminui o valor como combustível e reduz o carbono disponível para reação direta e indireta, esses dois parâmetros devem geralmente manter-se tão baixos quanto possível. O teor de umidade é uma consequência direta do processo de resfriamento, com alguma dependência do tamanho do coque (SHARMA *et al.*, 2013).

Segundo Duchene e Prudhon (1981) as características do coque dependem primordialmente da natureza do carvão que está sendo carregado e das condições de carbonização. Independentemente da mistura envolvida, também é possível ter um efeito sobre os índices de resistência mecânica convencionais, alterando os parâmetros de coqueificação ou alterando o método de carregamento. Ghosh e Chatterjee (2008) citam que as condições de carbonização incluem a densidade aparente da carga dentro dos fornos e a taxa de aquecimento usada durante a carbonização. Todos esses parâmetros influenciam a química, a resistência e o rendimento do coque de qualidade aceitável para operação em alto-forno.

#### 3.2.1. Resistência do coque

Segundo Silva (2011) a resistência do coque pode ser definida como sendo a capacidade de resistir a fragmentação quando solicitado mecanicamente por impacto ou abrasão. Essa resistência é avaliada por meio de um tambor rotativo de características padronizadas, que determina a redução granulométrica após ser submetido a um número fixo de revoluções.

Na indústria, a resistência do coque tem sido avaliada por índices de resistência, como o índice de *Micum* ( $M_{40}$ ,  $M_{10}$ ), uma vez que tais índices são medidos em condições que simulam aquelas no alto-forno. Estes índices provaram ser convenientes no controle de qualidade para a operação estável do alto-forno (SATO, 1999). A Tabela 1 apresenta os principais testes de tamboramento para coque metalúrgico e as respectivas normas que padronizam esses testes.

Tabela 1 - Testes de tamboramento, normas e parâmetros

<b>Tambor</b>	<b>MICUM</b>	<b>IRSID</b>	<b>JIS</b>	<b>ASTM</b>
<b>Norma</b>	MO3-046	MO3-046	K2151	D294-64
<b>Granulometria do Coque (mm)</b>	+ 60	+ 20	+ 25	51 - 76
<b>Peso da Amostra (kg)</b>	50	50	10	10
<b>Dimensões do Tambor (m)</b>	1,0 x 1,0	1,0 x 1,0	1,5 x 1,5	0,914 x 0,457
<b>Velocidade de Rotação (rpm)</b>	25	25	15	24
<b>Total de Revoluções</b>	100	500	30 ou 150	1400
<b>Peneiras (mm)</b>	60, 40 e 10	40, 20 e 10	50, 25 e 15	25 e 6
<b>Furo das Peneiras</b>	Redondo	Redondo	Quadrado	Quadrado
<b>Símbolos dos Índices</b>	M <sub>40</sub> M <sub>10</sub>	I <sub>40</sub> I <sub>20</sub> e I <sub>10</sub>	DI 15-30 DI 15-150	Estabilidade (+25 mm) Dureza (+6 mm)

Fonte: (SILVA, 2008)

### 3.2.2. Distribuição granulométrica de carvão e coque

O formato das partículas de coque e a distribuição de tamanho são os fatores decisivos para a permeabilidade do leito de coque, tanto para o gás ascendente quanto para os líquidos descendentes. A menor resistência ao fluxo é obtida quando se utiliza coque grande e de alta uniformidade. Embora excelentes operações de alto-forno sejam relatadas com peneiramento a 24 mm (quadrado), também há plantas em que peneiramento mesmo a 40 mm é preferível. (GEERDES *et al.*, 2009).

Andrade *et al.*, (2010) no trabalho de evolução da operação do Alto-Forno A (AF-A) da ArcelorMittal Monlevade, explica que o coque, quando recebido, é peneirado e dividido em três frações, sendo que, as frações superiores a 30 mm o Coque Metalúrgico; entre 30 e 10 mm o *Small Coque* e inferiores a 10 mm o Coque *Breeze*, as duas primeiras consumidas pelo alto forno e a última direcionada ao processo de sinterização, e cita, ainda, que para uma melhor performance a utilização de malhas de 40 mm foi o ponto ideal de corte para o coque metalúrgico. Essa prática de peneiramento e geração das três frações citadas é considerada comum entre as siderúrgicas integradas a coque, sofrendo algumas variações do tamanho do coque e abertura das malhas de peneiramento.

O *Small Coque*, produto de granulometria intermediária, é utilizado junto a carga ferrífera. Alencar *et al.*, (2013) explicam que os benefícios do uso de "*Small Coque*" na carga ferrífera, incluem, o aproveitamento dos finos de coque gerados durante seu manuseio na usina, a melhora da permeabilidade e da redutibilidade da carga metálica, devido à proximidade entre a carga ferrosa e a redutora.

Além de aprimorar a condição de redução da carga ferrífera, o "*Small Coque*" também garante uma permeabilidade adequada na zona seca do alto-forno, já que seu tamanho médio é maior que o do sinter e do minério granulado (ANDRADE *et al.*, 2010), entretanto, alguns fatores limitam sua utilização em altas proporções, como a determinação da faixa granulométrica ideal do "*Small Coque*", sua disponibilidade, o controle de seu carregamento e o tamanho das janelas de coque.

Mourão *et al.*, (2007) explicam que para materiais granulares, os princípios básicos que regem as especificações quanto ao tamanho e distribuição das partículas são:

- Permeabilidade;
- Velocidade de reação;
- Fluidização;
- Transmissão térmica;
- Segregação.

A granulometria do coque, torna-se um parâmetro importante, para a utilização em altos-fornos, uma vez que esses reatores são um processo de leito fixo ou praticamente fixo, onde há contracorrentes e passagem de gases, o alto-forno necessita que a carga apresente uma permeabilidade mais homogênea possível para que o fluxo gasoso seja eficiente. As reações topoquímicas dependem do tamanho das partículas. Em contraste, os processos de leito fluidizado exigem que os materiais da mesma natureza tenham partículas dentro de uma faixa granulométrica estreita (MOURÃO *et al.*, 2007).

Entre 1945 e 1947, uma comissão formada por produtores e distribuidores de carvão na Inglaterra buscou padronizar os tamanhos do carvão comercializado para melhorar seu aproveitamento, com o objetivo de promover a economia de guerra. Após três anos de trabalho, concluíram que a classificação já existente dos tamanhos do carvão seguia uma distribuição natural das partículas, sem necessidade de alterações significativas (SILVA, 2016).

Segundo Chaves (2002) em 1933 Rosin e Rammler descobriram que a distribuição dos finos de carvão segue uma lei exponencial, conhecida como a Lei de Rosin-Rammler. Mais tarde, em 1963, Bennet mostrou que essa lei se aplicava a todos os tamanhos de ROM (*Run of Mine*). A partir disso, constatou-se que a Lei de Rosin-Rammler pode regular a distribuição dos tamanhos de todos os produtos resultantes da cominuição de carvões.

A lei de Rosin-Rammler é expressa pela Equação (1):

$$\% \textit{ retida} = 100 * e^{-\left(\frac{d}{f}\right)^n} \quad (1)$$

Onde:

d = abertura da peneira;

f = constante de finura;

n = constante de dispersão da distribuição.

Que pode ser transformada em:  $\frac{100}{\% \textit{ retida}} = e^{\left(\frac{d}{f}\right)^n}$ , aplicando logaritmo neperiano em ambos os lados resultando nas Equações (2), (3), (4), (5) e (6):

$$\ln\left[\frac{100}{\% \textit{ retida}}\right] = \ln\left(\frac{d}{f}\right)^n$$

$$\ln\left\{\ln\left[\frac{100}{\% \textit{ retida}}\right]\right\} = n * \ln\left(\frac{d}{f}\right) = n * [\ln(d) - \ln(f)] = n * \ln(d) - n * \ln(f) \quad (2)$$

Fazendo:

$$y = \ln\left\{\ln\left[\frac{100}{\% \textit{ retida}}\right]\right\} \quad (3)$$

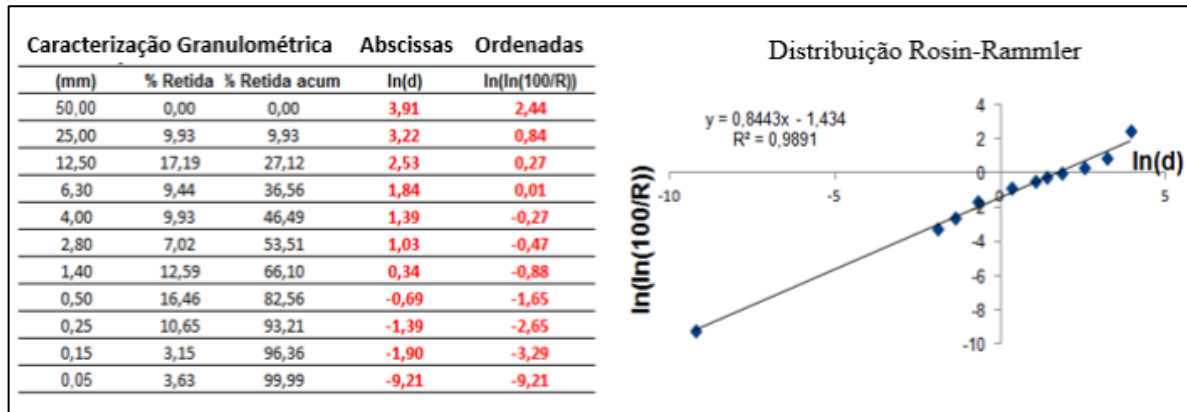
$$x = n * \ln(d) \quad (4)$$

$$c = -n * \ln(f) \quad (5)$$

$$y = n * x + c \quad (6)$$

Silva (2016), explica que a função de Rosin-Rammler quando linearizada, pode ser representada por uma reta, conforme ilustra o exemplo da Figura 5. O valor de  $n$  é obtido a partir inclinação da reta e a constante  $c$ , é obtida pela intercepção da reta no eixo Y.

Figura 5 – Exemplo de distribuição granulométrica – Rosin Rammler.



Fonte: (SILVA, 2016).

### 3.2.3. Reatividade do coque

A crescente escala e intensidade da operação moderna dos altos-fornos, combinada com uma redução simultânea na taxa de coque, levam a requisitos de qualidade cada vez mais rigorosos, com maior ênfase na sua função como espaçador de carga. Conseqüentemente, as especificações do coque limitados à composição química, classificação granulométrica inicial e estabilidade granulométrica à temperatura ambiente são insuficientes para prever o seu comportamento em uso (GOLECZKA e TUCKER, 1982).

Quando a carga de coque carregada desce no interior do alto-forno, é submetida à reação com o gás  $\text{CO}_2$ , que sobe em contracorrente, e a abrasão à medida que atritam entre si e com as paredes do forno. Esses processos ocorrendo simultaneamente, geram um enfraquecimento e conseqüentemente uma degradação mecânica do coque, produzindo um excesso de finos que diminuem a permeabilidade da carga e resultam em aumento das taxas de coque e perda de produção de metal quente (ASTM D-5341, 2014).

Muitos estudos foram realizados por pesquisadores para avaliar o potencial químico e o de degradação do coque dentro do alto-forno, em que os testes mais utilizados são os testes

*Coke Reactivity Index (CRI)* e o *Coke Strength after Reaction (CSR)*. Ambos os testes foram desenvolvidos pela *Nippon Steel Corporation (NSC)* no Japão, se tornando os métodos mais usados para avaliar o efeito da reação de Boudouard (*solution loss*) no coque (HILDING *et al.*, 2005).

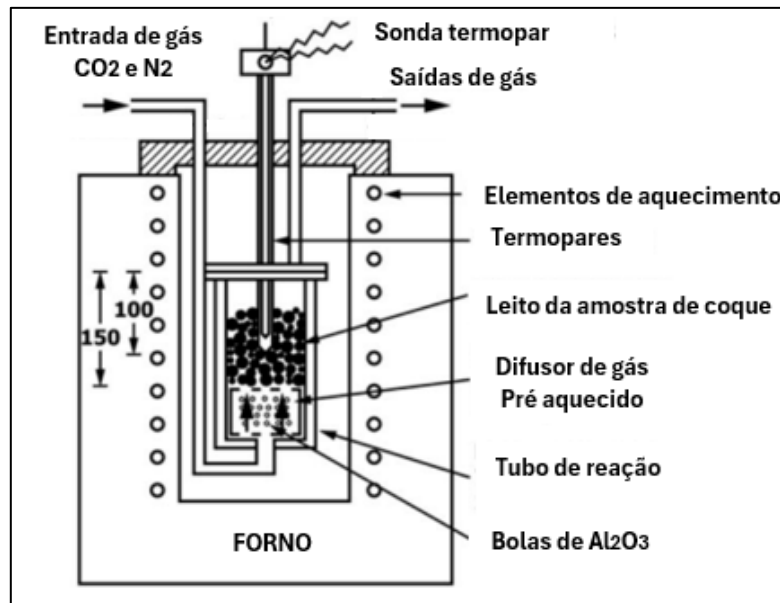
O método de análise CRI e CSR determina a reatividade do coque de acordo com a reação endotérmica de Boudouard (*solution loss*) e, também, a resistência mecânica do mesmo após a reação (LUNDGREN, 2010).

Segundo a norma ASTM D-5341 (2014), para a realização do teste de CSR é necessário:

- **Forno Elétrico**, capaz de alojar o conjunto do vaso de reação contendo a amostra de coque e fornecer uma temperatura uniforme de  $1100 \pm 5^\circ\text{C}$  no conjunto. As dimensões do forno não afetam os resultados do teste, contudo, é preferível que o forno tenha aquecimento controlado independentemente em três zonas para conseguir uniformidade de aquecimento na retorta.
- **Vaso de reação**, construído em aço resistente ao calor ou liga de níquel nas dimensões necessárias para caber perfeitamente dentro do forno elétrico. O coque a ser testado fica em uma placa porosa no recipiente de reação. Abaixo desta placa porosa, um pré-aquecedor de gás, como um leito de bolas cerâmicas de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) assentadas sobre uma segunda placa perfurada, difundindo nitrogênio ( $\text{N}_2$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) introduzidos no recipiente através do leito de coque durante o teste.
- **Medidores de vazão e termopares**, usados para monitorar a quantidade de gases  $\text{N}_2$  e  $\text{CO}_2$  usados no teste e a temperatura no centro da amostra.

A Figura 6 mostra esquematicamente um aparato de realização do teste de CRI do coque.

Figura 6 - Representação de um forno para teste de CRI em amostra de coque



Fonte: Adaptado de (ASTM D-5341, 2014)

O índice de reatividade CRI é determinado pelo percentual de perda de massa reagido com o gás  $CO_2$  durante o ensaio. Para a determinação do CSR, o coque reagido é transferido para um tambor rotativo, após 600 revoluções o coque é peneirado em uma peneira com malhas de 9,5mm, a massa retida na peneira determina o índice de resistência após reação. (CASAGRANDE, 2010).

#### 3.2.4. Química do coque

O carvão selecionado para fazer coque é uma variável importante que controla as propriedades do coque. A composição química e mineralógica do carvão determina em grande parte a química do coque (GEERDES *et al.*, 2009). A Tabela 2 apresenta a qualidade química típica e aceitável do coque para alto-forno.

Tabela 2 - Composição típica de coque para alto-forno

Composição Química	% (base seca)
Carbono Fixo	87 - 92
Nitrogênio	1,2 - 1,5
Cinzas	8 - 11
Enxofre	0,6 - 0,8
Material Volátil	0,2 - 0,5

Fonte: Adaptado de (GEERDES *et al.*, 2009)

As cinzas são determinadas pela pesagem do resíduo remanescente após a queima do coque sob condições rigidamente controladas de peso da amostra, temperatura, tempo, atmosfera e especificações do equipamento. A cinza obtida difere em composição dos constituintes inorgânicos presentes no carvão original. A incineração causa uma expulsão de toda a água, a perda de dióxido de carbono dos carbonatos, a conversão de pirita de ferro em óxido férrico e outras reações químicas (ASTM D3174, 2012).

O carbono é o elemento químico de interesse no coque, a cinza o substitui diretamente, tornando quase que obrigatório a busca por misturas de carvões que tenham baixo teor de cinzas que conseqüentemente será reduzida a quantidade no coque. Com o aumento das cinzas no coque tem-se um aumento da quantidade de escória que demandará um maior consumo energético para a fusão e mais fundentes para fornecer uma escória líquida e fluida (GEERDES *et al.*, 2009). A Tabela 3 fornece uma composição típica da química das cinzas de um coque com qualidade aceitável para o alto forno.

Tabela 3 - Composição típica das cinzas do coque

Composição Química	% (base seca)
Sílica (SiO <sub>2</sub> )	52
Alumina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	31
Ferro (Fe)	7
Calcário (CaO)	2,5
Potássio (K <sub>2</sub> O)	1,8
Magnésio (MgO)	1,2
Sódio (Na <sub>2</sub> O)	0,7
Fosforo (P)	0,3
Manganês (Mn)	0,1
Zinco (Zn)	<0,02

Fonte: Adaptado de (GEERDES *et al.*, 2009)

A umidade do coque é consequência direta da última etapa do processo de coqueificação, sendo o método de apagamento o principal determinante de umidade. Segundo Silva (2018), existem dois métodos de extinção do coque:

- Método a úmido convencional CWQ (*coke wet quenching*) a extinção é realizada pelo topo da torre e no CSQ (*coke stabilizing quenching*) é realizado pelo topo e pelo fundo da torre de extinção, ambos utilizam uma descarga de água sobre o coque incandescente, cessando o processo de queima.

- Método a seco CDQ (*coke dry quenching*), o coque incandescente é refrigerado por um gás inerte, geralmente o N<sub>2</sub>, circulante, com o intuito de inibir a sua combustão e gaseificação.

### 3.3. Funções do coque no alto-forno

O alto-forno é um reator químico de leito fluidizado que opera em contracorrente ao qual os materiais ferrosos e o coque descem e são pré-aquecidos pelos gases quentes da zona de combustão ou “*raceway*” em frente as ventaneiras, onde o coque e injetantes sofrem reações de combustão com oxigênio do sopro de ar quente (POVEROMO, 2005).

Poveromo (2005) explica que em um processo integrado de produção, o coque desempenha um papel importante sob vários pontos de vista:

- Do ponto de vista de um operador de alto-forno, o coque é um material vital e insubstituível, sendo as propriedades aceitáveis do coque um requisito crítico para a operação estável do forno.
- Do ponto de vista gerencial, o coque é um dos maiores componentes do custo do ferro gusa e isso torna-se mais importante à medida que aumentam os custos de produção e o preço de compra do coque, para reduzir o custo do ferro gusa, é importante reduzir o consumo de coque.
- Do ponto de vista energético, o coque representa aproximadamente 40% da energia total utilizada na siderurgia.

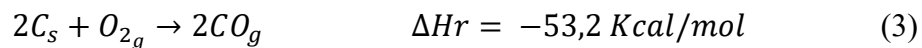
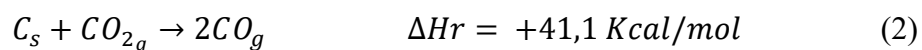
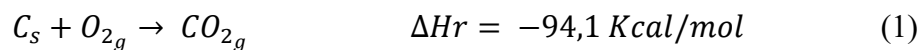
Segundo Coelho (2004), do ponto de vista físico, químico e metalúrgico, o coque desempenha três funções principais no alto-forno:

- Função térmica – fornecendo energia necessária, em forma de calor durante a combustão na ponta das ventaneiras, para reações químicas endotérmicas e para a fusão de ferro e escória.
- Função química - fornecendo o gás redutor através da reação de oxidação do carbono e pela reação de Boudouard ou *solution loss*, promovendo a redução direta e indireta no minério de ferro.

- Função física - fornecendo de estrutura de suporte para a carga sólida e estrutura permeabilizadora à passagem de líquidos e dos gases, particularmente na parte inferior do forno, descendo até o cadinho sem perder seu formato.

### 3.3.1. Funções térmica e química

Na zona de coque ativo, uma porção do coque carregado rola em direção às ventaneiras para ser queimado. Na parte superior do cadinho, com o sopro de ar quente enriquecido ou não com oxigênio (O<sub>2</sub>), o coque entra em combustão, elevando a temperatura acima dos 1900 °C, fornecendo parte do aporte térmico necessário para o processo e gerando gás redutor (CO), reações (1), (2), (3), que sobe aquecendo toda a carga (SATO, 1999; CASAGRANDE, 2010; OLIVEIRA, 2017).



Silva (2011) explica que o perfil térmico característico de um alto forno a coque é diretamente influenciado pela ocorrência da reação de Boudouard (*solution loss*), reação (2), e a reatividade do coque.

A reação (2), por ser uma reação endotérmica, consome grande quantidade de energia, em termos térmicos está é a principal reação que ocorre no alto-forno e tem ocorrência em larga escala preferencialmente com temperaturas acima de 1000 °C a depender da reatividade do coque (SILVA, 2011).

O coque produz e regenera os gases para redução dos óxidos de ferro. O coque reage com o oxigênio e a umidade no alto-forno para gerar gases redutores como CO e H<sub>2</sub> para as reações de redução indireta. Além disso, conforme necessário, o coque regenerará os gases redutores, através da reação de Boudouard, para a redução direta que ocorre na parte inferior do forno. O coque deve ter uma reatividade adequada ao dióxido de carbono e ao vapor de água. No entanto, uma reatividade excessivamente alta levará a uma perda de resistência em altas

temperaturas (POVEROMO, 2005). O coque também carbura o ferro, pois o ferro gusa produzido pelo alto-forno é saturado em carbono de acordo com as reações (4) e (5):



O carbono é absorvido pelo ferro na zona coesiva (cerca de 1% C). À medida que as gotículas de metal descem através da zona de coque ativo, ocorre maior carburação em contato com coque e monóxido de carbono. O nível de carbono no ferro gusa estabiliza em cerca de 4,5%; no entanto, as pesquisas mais recentes sugerem que este nível depende realmente das condições do reator (OLIVEIRA, 2023).

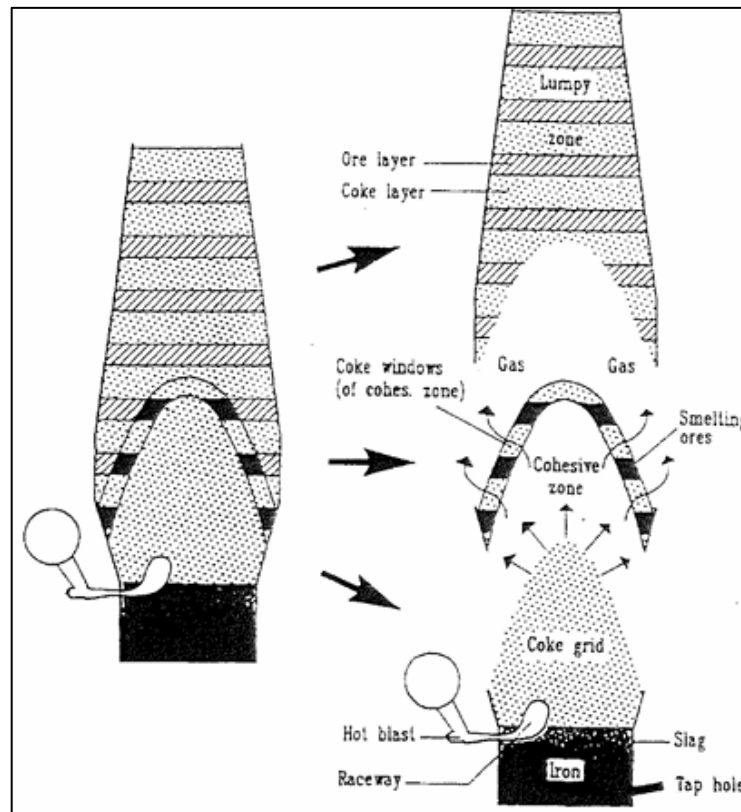
### 3.3.2. Função física

Dentre as funções do coque, o papel físico é considerado a função mais importante do coque no alto-forno, uma vez que nenhum outro material possui propriedades mecânicas para substituir essa função a um custo aceitável (SATO, 1999).

De acordo com Giglio (2016), os materiais portadores de ferro (Fe), ao passarem pela zona granular até o cadinho mudam suas propriedades físicas e químicas, sendo essas mudanças consequência da redução, amolecimento e fusão, o coque é o único que permanece sólido abaixo da zona de fusão.

Por ser o único material sólido, carregado via topo, a chegar na parte inferior do alto-forno, este fornece suporte mecânico para a carga presente, composta de minérios, fundentes e coque além de fornecer meio permeável para a passagem dos gases ascendentes gerados na zona de combustão (SILVA, 2011; OLIVEIRA, 2017; OLIVEIRA, 2023). A Figura 7 ilustra a formação das camadas de matérias primas e a formação do meio permeável para a passagem dos gases ascendentes, a partir do coque sólido na parte inferior do alto-forno.

Figura 7 - Distribuição de materiais no alto-forno.



Fonte: (SATO, 1999)

### 3.4. Manuseio do coque

Em um usina siderúrgica integrada que opera com altos-fornos, a produção de ferro gusa no reator representa maior parcela do custo de produção da usina. Dessa forma, o tratamento das matérias primas é de suma importância na estabilidade operacional do reator e sua produtividade.

Dentre as matérias primas, o coque metalúrgico, empregado no processo de redução, é o de maior custo por tonelada. Por isso a busca por melhores índices de utilização (kg/t de gusa) de coque metalúrgico são temas de debates constantes.

A Tabela 4 apresenta uma linha do tempo com os consumos específicos de coque metalúrgico (*Coke Rate*), carvão injetado via ventaneiras (PCI) e o combustível total (*Fuel Rate*) tipicamente praticados em usinas siderúrgicas brasileiras a coque, onde se observa, segundo Geerdes *et al.*, (2009), que pelos últimos anos a taxa de coque ou “*Coke Rate*” teve uma queda bastante acentuada, muito influenciada, também, pela prática de injeção de

combustível auxiliar, uma melhor qualidade da carga, maiores temperatura de ar soprado e melhores controles de processo, que tem auxiliado a obtenção destes índices.

Tabela 4 - Consumo Específico de Coque e de Finos de Carvão em Alto Forno

<b>Insumo (kg/t de gusa)</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>	<b>2020</b>	<b>2021</b>	<b>2022</b>	<b>2023</b>
<i>Coke Rate</i>	390	371	358	361	359	356
<i>PCI Rate</i>	150	173	160	176	179	184
<i>Fuel Rate</i>	541	543	518	537	538	539

Fonte: adaptado de (INSTITUTO AÇOS BRASIL, 2024)

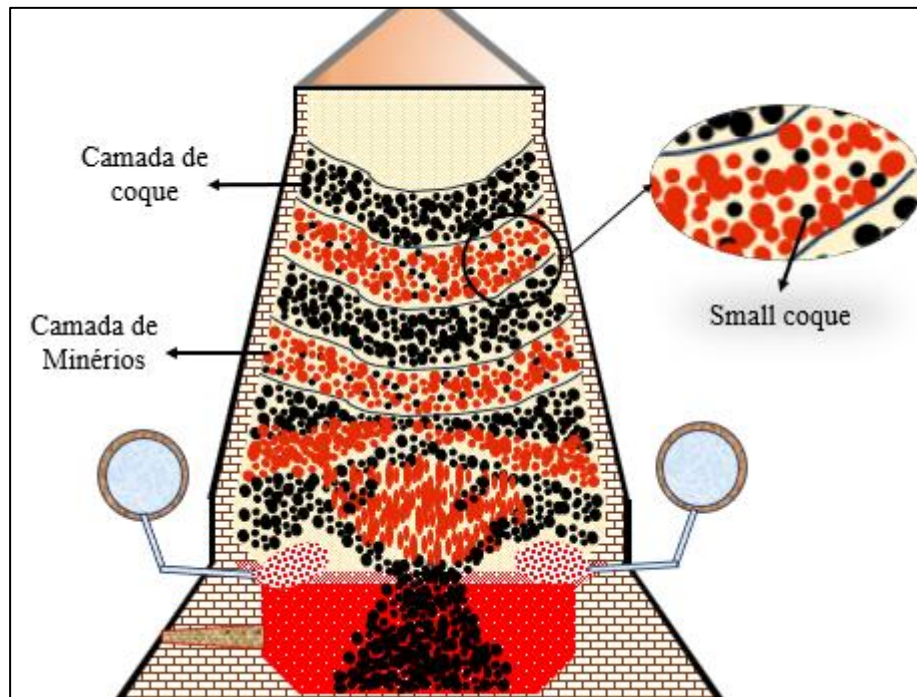
O coque, após ser desenformado e resfriado na coqueria, tem tipicamente uma faixa de tamanhos de partículas bem distintos, com frações finas, de aproximadamente 1 mm até tamanhos maiores, podendo, algumas vezes, superior a 100 mm. Na busca de melhores controles de processo e conhecimento das matérias primas carregadas no alto-forno, este coque passa por uma operação unitária de separação por tamanhos (peneiramento), com o objetivo de se obter um coque com uma faixa granulométrica bem distinta, estreita e conhecida.

A etapa de peneiramento deste coque, para a usina siderúrgica típica da região, busca-se a obtenção de três faixas granulométricas do coque:

- Coque Metalúrgico: entre 25 mm e 125 mm
- *Small Coque*: entre 11 mm e 25 mm
- Coque *Breeze*: inferiores a 11 mm

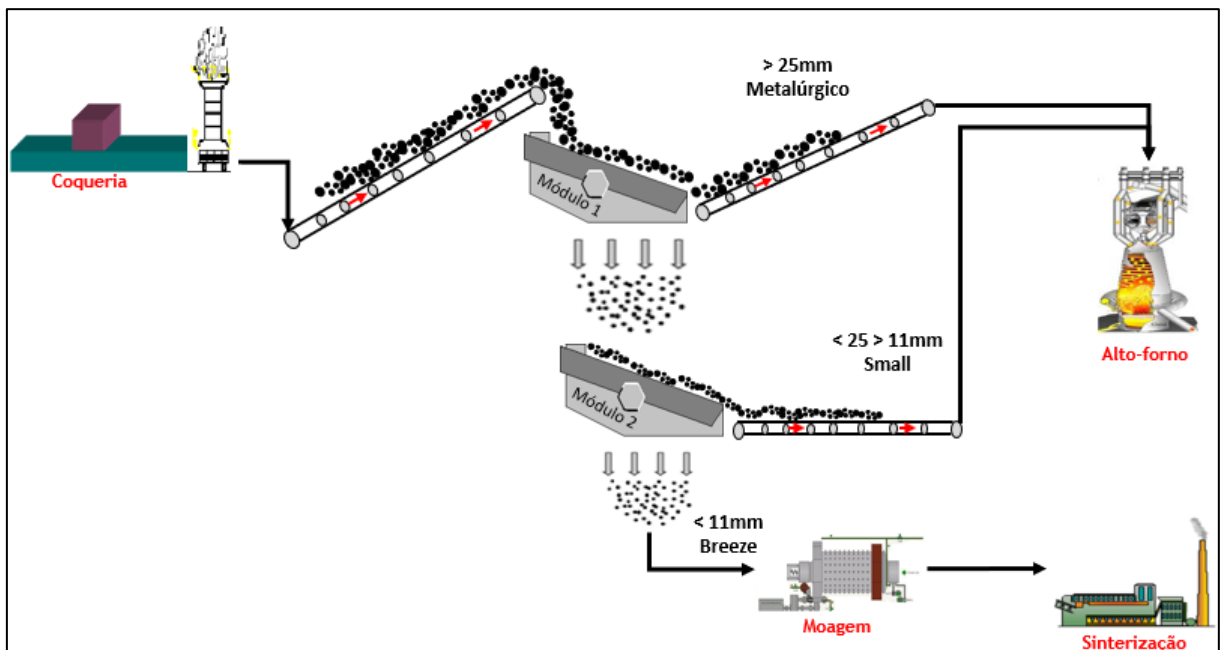
O coque metalúrgico é enviado para o alto-forno para compor a carga de combustível alimentada via topo, o *Small Coque* é carregado juntamente a carga ferrífera, ilustrado na Figura 8, auxiliando na redução da carga e, contudo, contribuindo na permeabilidade do reator, o Coque *Breeze* é destinado as sinterizações para servir como combustível junto as misturas de minérios e fundentes no processo de fabricação de sinter. A Figura 9 ilustra um fluxo esquemático desse circuito de classificação e destinação das frações granulométricas do coque de uma usina siderúrgica típica da região.

Figura 8 - Distribuição do *Small Coque* no interior do alto-forno



Fonte: Elaborado pelo autor, (2024)

Figura 9 - Fluxo esquemático das frações granulométricas do coque



Fonte: Elaborado pelo autor, (2024)

Segundo Barbosa (2018), a degradação mecânica do coque no percurso do alto-forno, acontece sobretudo nas operações de carregamento e descarregamento, empilhamento, transferências entre correias e enchimento de silos. A maneira pela qual essas matérias-primas são carregadas, afeta o fluxo e a distribuição dos gases redutores propiciando ou não o contato

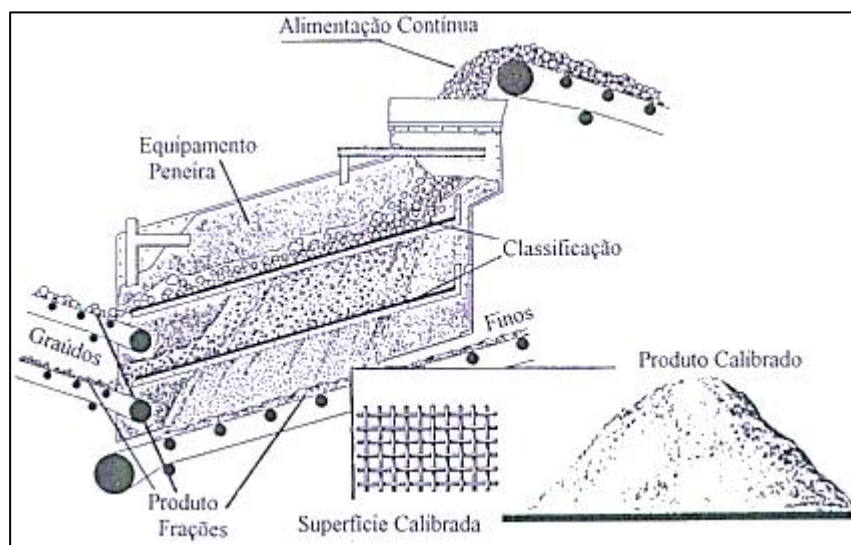
gás-sólido. É importante para a operação eficiente do alto-forno e manutenção da permeabilidade da carga, permitindo a passagem dos gases ascendentes e líquidos descendentes, um tamanho médio de coque metalúrgico próximo de 50 mm na composição da camada puramente de redutor.

### 3.5. Peneiramento

Chaves e Peres (2009) conceituam a operação de peneiramento como a separação de uma população de partículas em pelo menos duas frações de tamanhos distintos, através da sua apresentação a uma superfície com aberturas predeterminadas. As partículas que ficam retidas nas aberturas são denominadas de "*oversize*" e as que passam pelas aberturas são chamadas de "*undersize*".

Valadão e Araujo (2007) explicam, ainda, que essa separação por tamanho pode ser realizada em duas escalas, sendo elas, laboratorial e industrial, em que cada uma delas possui diferentes finalidades. A escala laboratorial está associada a análise granulométrica de materiais, com a finalidade do conhecimento da distribuição de tamanhos das partículas a serem processadas em uma amostra mineral conhecida. Por outro lado, o peneiramento em escala industrial, representado esquematicamente na Figura 10, é amplamente definido como a operação de separação por tamanho realizada em escala industrial, tem o objetivo de adequação de tamanho das partículas para determinado processo utilizando superfícies com aberturas geométricas de diversas formas.

Figura 10 – Representação esquemática do peneiramento industrial

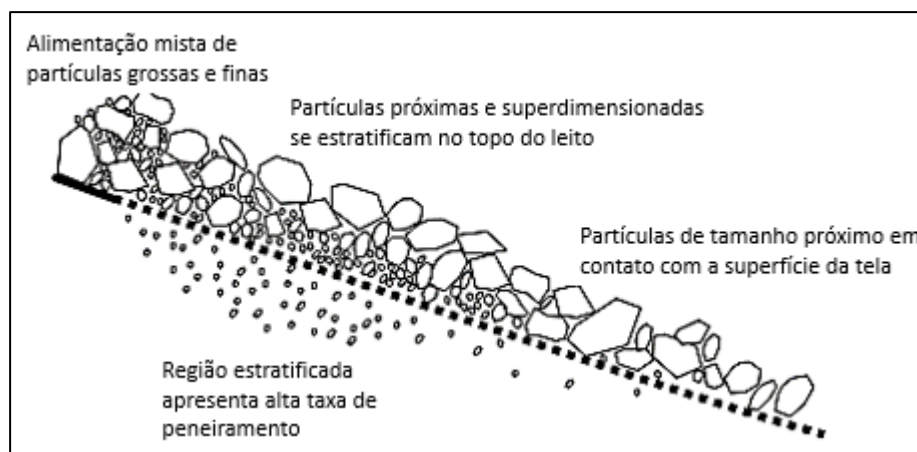


Fonte: (COSTA, 2014)

O peneiramento industrial é amplamente utilizado para separações de tamanho de 300 mm até aproximadamente 40  $\mu\text{m}$ , embora a eficiência diminua rapidamente com a finura. O peneiramento a seco é geralmente limitado a materiais acima de 5 mm de tamanho, enquanto no peneiramento a úmido até 250  $\mu\text{m}$  é comum (WILLS e FINCH, 2016).

No peneiramento industrial, devem ocorrer dois processos básicos; a estratificação e a probabilidade de separação. A estratificação é causada pela vibração das peneiras, ocorrendo um rearranjo das partículas, onde as menores se posicionam junto à tela e as maiores a parte superior do estrato, conforme ilustrado na Figura 11. Já a probabilidade de separação é determinada pelo processo em que as partículas são apresentadas às aberturas das peneiras, durante o peneiramento. Nesse processo, partículas maiores que as aberturas serão rejeitadas e as menores passam, permitindo a classificação por tamanho. É importante mencionar que a agitação durante o peneiramento desempenha um papel crucial em evitar o entupimento das peneiras, no entanto, uma agitação excessivamente vigorosa pode resultar em vários problemas, como a quebra do material peneirado, desgaste excessivo das peneiras, redução da eficiência do peneiramento e aumento na geração de poeira (COSTA, 2014).

Figura 11 – Estratificação de partículas sobre uma superfície de peneiramento



Fonte: (WILLS e FINCH, 2016).

Sendo assim, compreende-se que o tamanho das partículas é um parâmetro importante e sua definição está normalmente relacionada a um critério. A definição de maior e de menor para objetos regulares e de mesma forma, para duas esferas, por exemplo, pode ser obtida intuitivamente através do critério volume, outros critérios que podem ser utilizados são: massa, superfície, uma determinada dimensão, área de projeção, entre outros (WILLS e FINCH, 2016).

### 3.6. Análise granulométrica por peneiramento

Sampaio e Silva (2007) abordam que nas análises granulométricas por peneiramento algumas etapas devem ser consideradas para se obter resultados representativos. A amostragem, a preparação da amostra e a determinação das escalas ou séries de peneiras nas quais será feito o teste, tem sobre o universo amostrado grande influência, podendo gerar erros e falsos resultados.

#### 3.6.1. Amostragem

O processo de amostragem envolve a extração de quantidades moduladas de material, chamadas incrementos, de um total a ser amostrado, para formar a amostra primária ou global. Esta amostra deve ser representativa do material total amostrado. Após a coleta da amostra primária, ela é submetida por uma série de etapas de preparação que incluem operações como cominuição, homogeneização e quarteamento. O objetivo dessas etapas é obter a amostra final com a massa e granulometria apropriadas para realizar diversos ensaios, sejam eles químicos, físicos ou mineralógicos (GOÉS *et al.*, 2010).

Segundo Oliveira e Aquino (2007), a amostragem geralmente é composta por quatro etapas, conforme descrito no quadro 1.

Quadro 1 – Etapas de amostragem

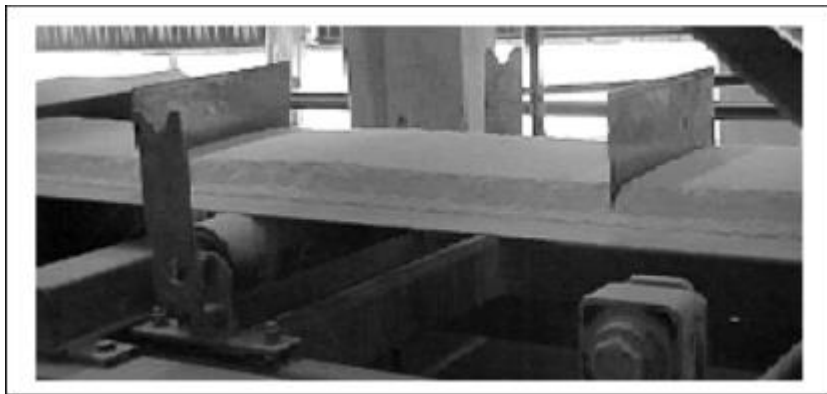
<b>Etapa</b>	<b>Descrição</b>
<b>Elaboração do plano de amostragem</b>	Determina a qualidade necessária da amostragem, definindo universo, objetivo e sequência de operações. Considera tamanho das partículas, massa específica e umidade.
<b>Obtenção da amostra</b>	Define a sequência e número de coletas, com base no tipo, precisão requerida e características dos fluxos.
<b>Preparação da amostra</b>	Inclui operações de secagem, redução de tamanho, homogeneização e quarteamento, adequando a amostra ao método de determinação do parâmetro de qualidade.
<b>Determinação de um parâmetro de qualidade</b>	Realiza a análise de parâmetros como teores de elementos, umidade e distribuição granulométrica, que determinam a qualidade do universo.

Fonte: (OLIVEIRA e AQUINO, 2007)

A amostragem pode ser automática ou manual, sendo a amostragem automática a mais confiável, a técnica manual ainda é muito utilizada, podendo ser feita com materiais em movimento ou estáticos (OLIVEIRA e AQUINO, 2007).

Oliveira e Aquino (2007) explicam que, na amostragem de materiais estáticos e em correias transportadoras — tema deste estudo —, é possível obter uma amostra precisa após a parada do transportador, utilizando um dispositivo específico de armação para amostragem. Este dispositivo, composto por placas que são pressionadas até tocarem a correia, permite isolar o material dentro da armação. O material fora da armação é removido, e o material entre as placas é coletado como amostra, a Figura 12 ilustra esse procedimento de amostragem em correia transportadora.

Figura 12 – Amostragem em correia transportadora parada



Fonte: (OLIVEIRA e AQUINO, 2007)

### 3.6.2. Preparação da amostra

Na preparação da amostra para ensaios de peneiramento, é crucial conhecer os tamanhos das amostras globais e finais para garantir a representatividade adequada. Procedimentos de amostragem apropriados são fundamentais para produzir amostras que gerem resultados consistentes em todos os ensaios e análises subsequentes. Métodos de amostragem inadequados podem comprometer a representatividade da amostra final e, conseqüentemente, os resultados obtidos (SAMPAIO e SILVA, 2007).

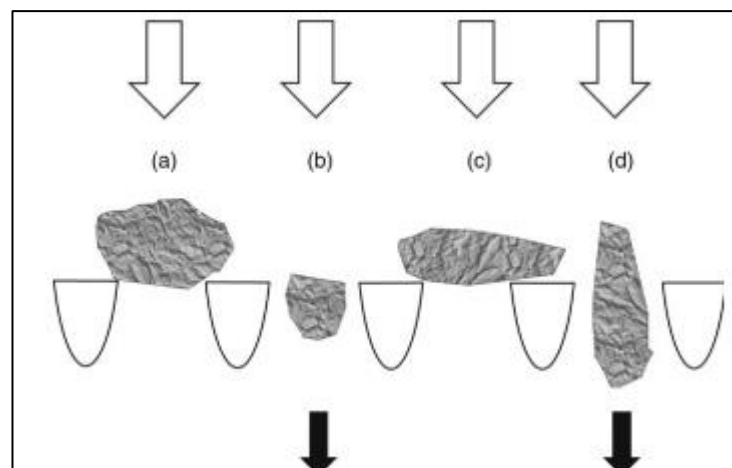
Em laboratórios e unidades piloto, a homogeneização e o quartejamento de amostras para peneiramento são comumente realizados usando pilhas cônicas ou alongadas. Essas técnicas produzem alíquotas representativas da amostra total. A amostra é misturada para garantir homogeneidade e, em seguida, uma pilha cônica é formada. Essa pilha é dividida em

quatro partes iguais, e as partes diametralmente opostas são selecionadas como amostra final ou para a construção de uma nova pilha cônica. Esse processo é repetido até que a quantidade de amostra seja adequada para o ensaio de peneiramento planejado (SAMPAIO e SILVA, 2007).

### 3.7. Eficiência de Peneiramento

A maioria dos materiais granulares processados em telas não são esféricos. Enquanto as partículas esféricas passam com igual probabilidade em qualquer orientação, as partículas próximas a abertura da malha e de formato irregular devem orientar-se numa certa direção que lhes permita passar. Partículas alongadas apresentarão uma pequena seção transversal para passagem em algumas orientações e uma grande seção transversal em outras. Os formatos extremos de partículas têm, portanto, uma baixa eficiência de peneiramento: a mica, por exemplo, é mal peneirada em telas de abertura quadrada, seus cristais planos e semelhantes a placas tendem a “passar” pelas aberturas da tela (WILLS e FINCH, 2016). A Figura 13 traz uma representação esquemática do comportamento de partículas de formato irregular sobre uma superfície de peneiramento.

Figura 13 – Comportamento do tamanho e forma das partículas.

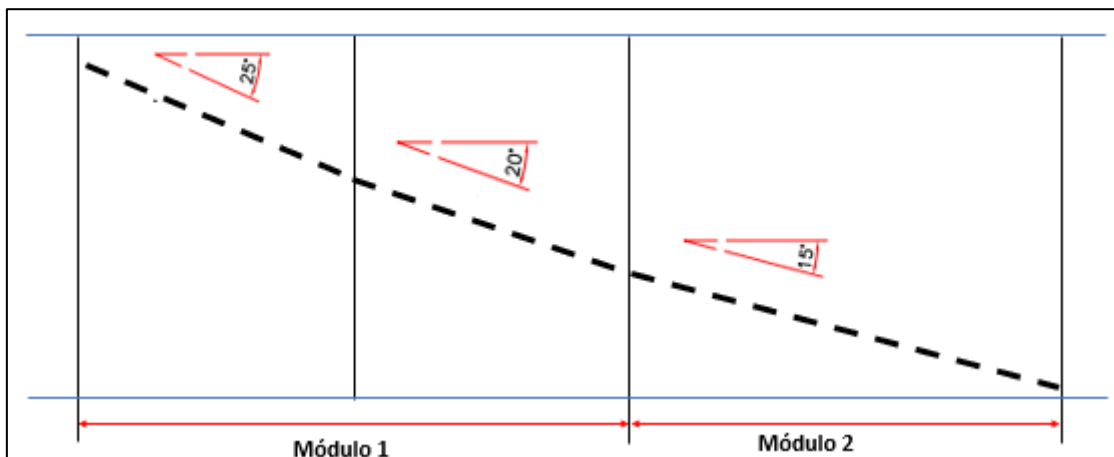


Fonte: (GUPTA e YAN, 2015).

A partícula (a) é muito grande para passar em qualquer orientação; a partícula (b) passará em qualquer orientação; partículas alongadas podem passar apenas, segundo uma orientação específica (d), mas serão rejeitadas se estiverem horizontais(c) (GUPTA e YAN, 2015).

Segundo informações da Metso (2020), o desempenho de um sistema de peneiramento é influenciado pela capacidade de processamento da peneira e sua eficiência. A manutenção de uma taxa constante de alimentação é crucial para o bom desempenho das peneiras. A distribuição da alimentação na peneira pode depender das vibrações e da angulação da própria peneira. A peneira em estudo, é uma peneira tipicamente inclinada, com a superfície de peneiramento em três angulações diferentes, como ilustrado na Figura 14.

Figura 14 – Ângulos da superfície de peneiramento em estudo



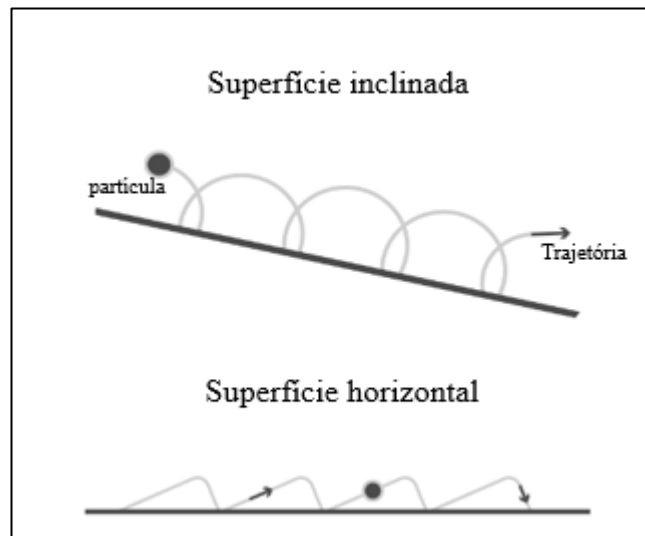
Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

Na prática de peneiramento industrial, a economia determina que taxas de alimentação relativamente altas e tempos curtos de permanência de partículas na tela devem ser usados. Em altas taxas de alimentação, um leito de material é apresentado à tela, e os finos devem atravessar o leito de partículas antes de terem a oportunidade de passar pela superfície da tela. Como resultado a eficiência do processo é reduzida. Dessa forma, alta capacidade e alta eficiência são muitas vezes requisitos opostos para qualquer operação de separação (WILLS e FINCH, 2016).

A vibração é responsável por lançar partículas para fora da superfície de peneiramento para que possam ser novamente apresentadas à tela e para transportar as partículas ao longo da peneira. O tipo certo de vibração também induz a estratificação do material de alimentação o que permite que os finos atravessem a camada de partículas até a superfície da tela, fazendo com que partículas maiores subam para o topo. A estratificação tende a aumentar a taxa de passagem na seção intermediária da peneira (SOLDINGER, 1999). Outro fator marcante é a umidade superficial presente nas partículas do material alimentado, essa tem um efeito marcante na eficiência do peneiramento, com uma influência negativa pois tende a aglomerar e "cegar" as aberturas da tela (WILLS e FINCH, 2016).

Em um comportamento coletivo de uma população de partículas, além da estratificação e o peneiramento propriamente dito, a peneira também deve ser capaz de transportar as partículas de uma extremidade a outra do deck, esse transporte é favorecido diante do movimento exercido na peneira causada pela vibração. Essa vibração em conjunto com o ângulo de inclinação, causa um movimento característico na partícula sobre a superfície de peneiramento (CHAVES e PERES, 2003), esse movimento é ilustrado na Figura 15.

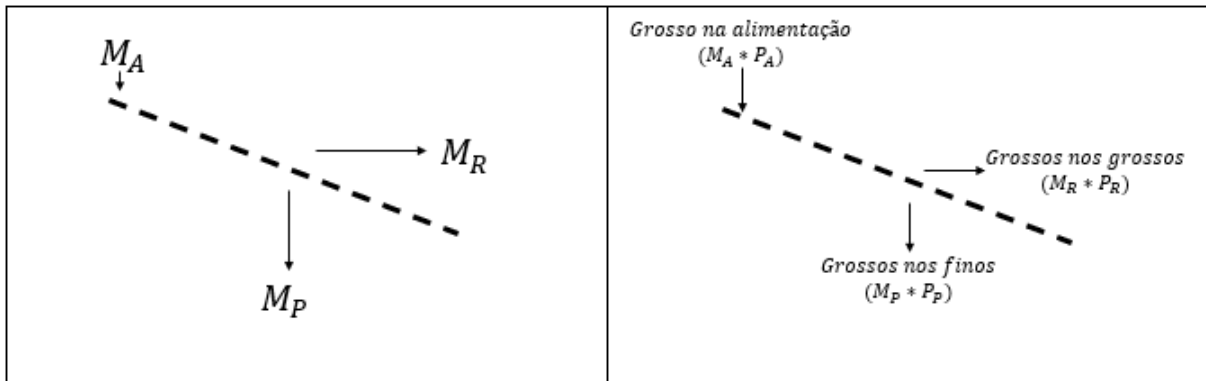
Figura 15 – Trajetórias das partículas em uma superfície de peneiramento



Fonte: adaptado de (CHAVES e PERES, 2003)

Carvalho (2004) explica que a eficiência do peneiramento é determinada pelo grau de precisão na separação de um material em frações que são maiores ou menores do que a abertura da tela. A equação da eficiência pode ser calculada com base na massa que passa pela peneira. Uma curva de eficiência ou partição para o peneiramento é criada ao se plotar o coeficiente de partição, que é a porcentagem em massa da alimentação que compõe o retido (*oversize*), em relação aos tamanhos médios das classes granulométricas. A Figura 16 traz uma ilustração esquemática de um processo de separação em uma peneira.

Figura 16 - Modelo esquemático do processo de separação em uma peneira



Fonte: adaptado de (CARVALHO, 2004)

De acordo com o modelo esquemático da Figura 16, Carvalho (2004) deduziu os seguintes cálculos para eficiência de peneiramento.

$$E_G = \frac{M_R * P_R}{M_A * P_A} \quad (7)$$

$$E_F = \frac{M_P * (1 - P_P)}{M_A * (1 - P_A)} \quad (8)$$

$$E_{GL} = E_G * E_F \quad (9)$$

Onde:

$M_A$  - Massa de material na alimentação;

$M_R$  - Massa de material retida;

$M_P$  - Massa de material passante;

$P_R$  - Proporção de material acima do tamanho da abertura no retido;

$P_A$  - Proporção de material acima do tamanho da abertura na alimentação;

$P_P$  - Proporção de material acima do tamanho da abertura no passante.

$E_G$  - Eficiência na recuperação de grossos;

$E_F$  - Eficiência na recuperação de finos;

$E_{GL}$  - Eficiência global

Essa dedução foi realizada com base em massas, porém, substituindo, nas equações, as massas ( $M_R$ ,  $M_P$ ,  $M_A$ ) pela vazão do material conhecido, obtém-se os mesmos resultados.

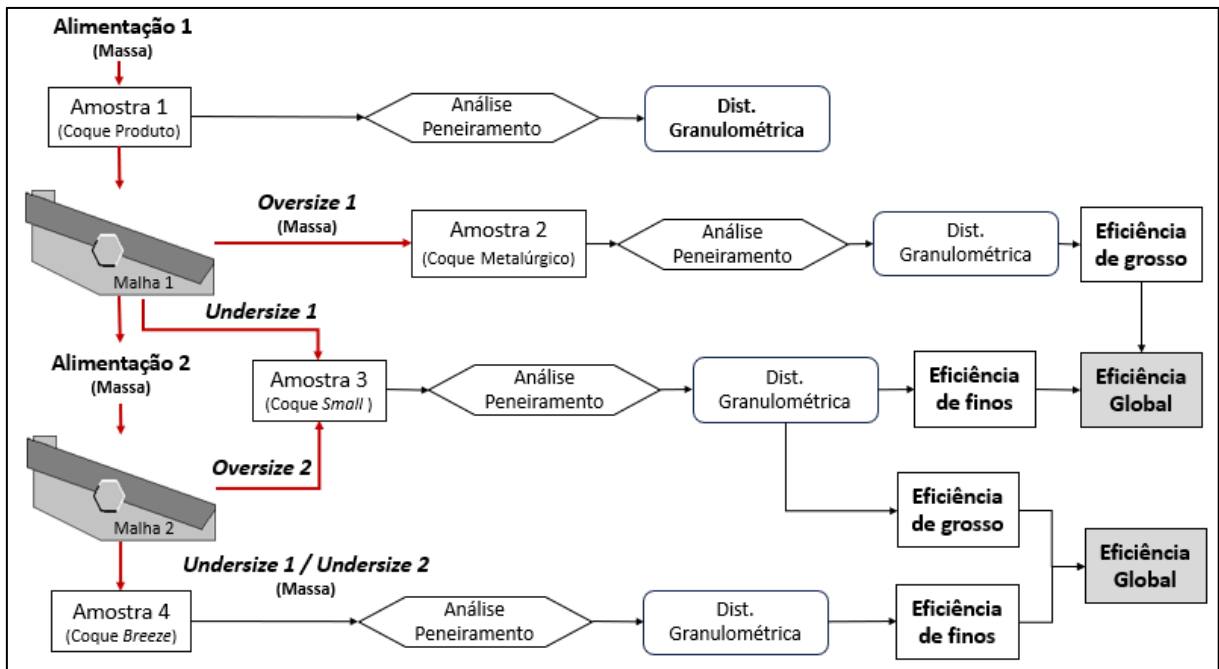
Segundo Wills e Finch (2016) a eficiência da peneira deve sempre ser combinada com a capacidade, pois muitas vezes é possível, pelo uso de uma baixa taxa de alimentação e um tempo de peneiramento muito longo, efetuar uma separação quase completa. Em uma determinada capacidade, a eficiência depende da natureza da operação de peneiramento, ou seja, dá chance geral de uma partícula passar pela tela depois de atingi-la.

Industrialmente, a eficiência de peneiramento varia entre 80% e 90%, podendo alcançar até 95% em alguns casos. Partículas com diâmetros superiores a uma vez e meia a abertura da tela, assim como aquelas menores que metade dessa abertura, não afetam significativamente o resultado do peneiramento. A eficiência e a capacidade das peneiras são fortemente influenciadas pelas partículas cujos diâmetros se situam entre esses extremos, sendo esta, a classe crítica de peneiramento (CORREIA e COUTO, 2018).

## 4. MATERIAIS E METÓDOS

A Figura 17 ilustra a sequência metodológica adotada para avaliação da eficiência de peneiramento de coque.

Figura 17 – Sequencial esquemático da metodologia adotada



Fonte: Elaborado pelo autor, (2024)

### 4.1. Plano de amostragem

Para a determinar a eficiência de peneiramento, a metodologia seguiu um plano de amostragem com representatividade do cenário real de peneiramento em estudo. Foi determinado o método de coleta, adaptado para as condições reais de peneiramento do coque produto da coqueria.

Foram coletadas um total de 20 amostras, sendo 4 amostras diárias, por um período de 5 dias, o plano de amostragem seguiu da seguinte forma:

**Amostra 1** – Alimentação – Coque Produto alimentado na peneira

**Amostra 2** – *Oversize 1* – Coque Metalúrgico retido na malha 1

**Amostra 3** – *Undersize 1 / Oversize 2* – Coque *Small*, passante na malha 1 e alimentado na malha 2.

**Amostra 4** – *Undersize 1 / Undersize 2* – Coque *Breeze*, passante e alimentação na malha 2.

#### 4.2. Método de coleta

As amostras foram coletadas em correias transportadoras com fluxo estático e enviadas ao laboratório interno da siderúrgica. Em uma dimensão de 1 metro linear, foi retirado todo o material sobre a correia transportadora e armazenadas em caixas plásticas com tampa, Figura 18, com o objetivo de preservar a umidade real da amostra.

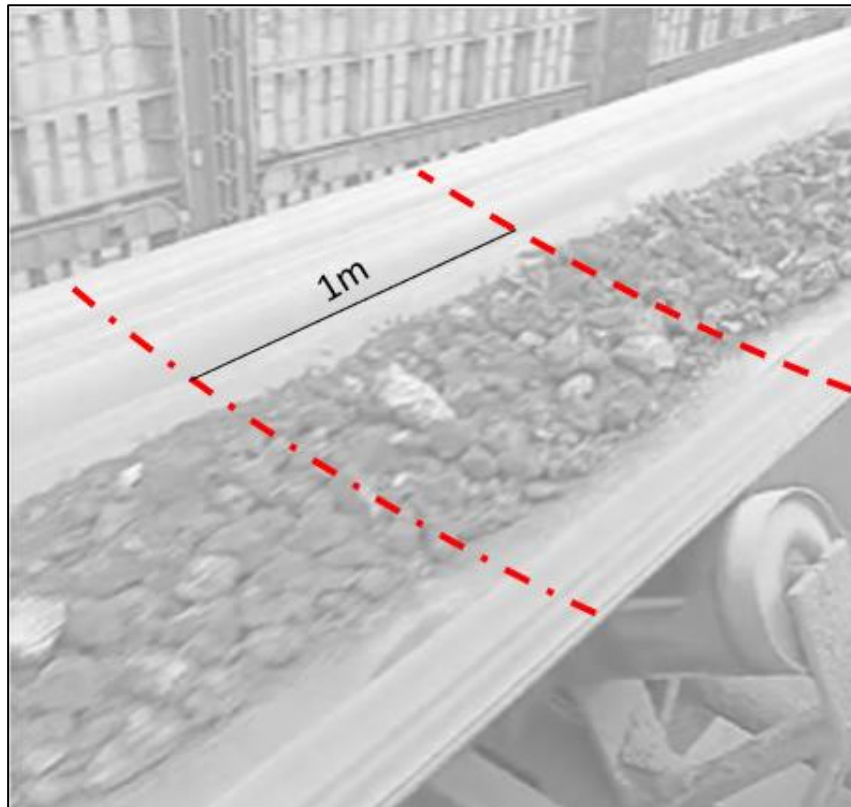
A escolha de 1 metro linear de correia foi determinada a partir de experiência prática dentro da rotina operacional, uma vez que o fluxo de material alimentado na peneira não é contínuo. Observou-se que essa dimensão permite obter uma amostra representativa de coque para análise laboratorial, resultando em aproximadamente 25 kg de material, conforme ilustrado na Figura 19.

Figura 18 – Caixa para armazenamento da amostra e amostra coletada



Fonte: Arquivo pessoal, (2024)

Figura 19- Modelo esquemático de coleta da amostra em correia



Fonte: Arquivo pessoal, (2024)

### 4.3. Análise de peneiramento

A análise das amostras foi realizada conforme a norma ASTM D-293 (1999), que descreve o método padrão para teste de uma amostra de coque em frações de tamanho definido e expressa como uma porcentagem em peso da amostra bruta.

As serie de peneiras utilizadas para a realização da análise de peneiramento estão descritas na Tabela 5.

Tabela 5 – Série de peneiras com aberturas em milímetros.

Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
125	125	37,5	37,5
100	100	25,0	25,0
75,0	75,0	19,0	19,0
63,0	63,0	16,0	16,0
50,0	50,0	12,5	12,5
37,5	37,5	9,50	9,50
25,0	25,0	6,30	6,30
19,0	19,0	4,75	4,75
13,2	13,2	4,00	4,00
12,5	12,5	3,35	3,35
9,50	9,50	2,80	2,80
6,30	6,30	- 2,80	- 2,80
4,75	4,75	--	--
4,00	4,00	--	--
- 4,00	- 4,00	--	--

Fonte: Elaborado pelo autor, (2024)

#### 4.4. Análise de umidade

A análise de umidade foi realizada de acordo com a norma ASTM D-3173 (2011), que descreve o método padrão para análise de umidade em amostras de carvão e coque.

#### 4.5. Determinação das eficiências de peneiramento

O cálculo de eficiência de peneiramento foi realizado com base nas fórmulas desenvolvidas por Carvalho (2004), Equações (7), (8) e (9).

As aberturas utilizadas para determinação das eficiências, a partir do percentual retido acumulado foi na peneira de 25mm para o coque grosso (Coque produto e Coque Metalúrgico) e 11mm para o coque fino (Coque *Small* e Coque *Breeze*), sendo que para a peneira de 11mm o percentual retido foi determinado a partir da aplicação da lei de distribuição granulométrica de Rosin-Rammler-Bennett, desenvolvida por Silva (2016), segundo a equação (1).

Para auxiliar nos cálculos foi utilizado planilhas eletrônicas, ilustrada na Figura 20, com as fórmulas e percentuais retidos em cada abertura.

Figura 20 – Representação da planilha utilizada para cálculo de eficiência

<b>Amostra 2</b>		<b>Amostra 3 + Amostra 4</b>		<b>Amostra 1</b>	
<b>Produto</b>		<b>Finos</b>		<b>Alimentação</b>	
Malha	(%) Retido	Malha	(%) Retido	Malha	(%) Retido
25,0	97,41	25,0	10,4	25,00	85,2
Massa Retida (Mr)		Massa Passante (Mp)		Massa da Alimentação (Ma)	
3.415		455		3.944	
% Produto no retido (Pr)		% Produto no passante (Pp)		% Produto na alimentação (Pa)	
97,41		10,45		85,23	
<b>Eficiências</b>					
<b>Remoção de Finos (%)</b>		<b>Recuperação de Produto (%)</b>		<b>Eficiência Global (%)</b>	
69,98		98,96		69,25	

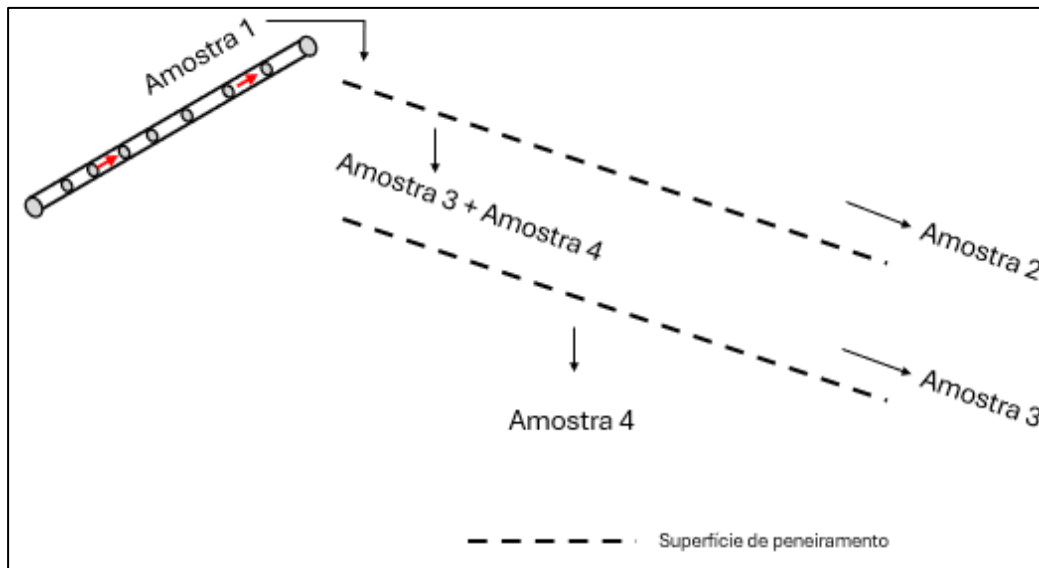
<b>Amostra 3</b>		<b>Amostra 4</b>		<b>Amostra 3 + Amostra 4</b>	
<b>Produto</b>		<b>Finos</b>		<b>Alimentação</b>	
Malha	(%) Retido	Malha	(%) Retido	Malha	(%) Retido
11,0	59,51	11,0	14,6	11,00	74,2
Massa Retida (Mr)		Massa Passante (Mp)		Massa da Alimentação (Ma)	
322,83		132,43		455,26	
% Produto no retido (Pr)		% Produto no passante (Pp)		% Produto na alimentação (Pa)	
59,51		14,64		74,15	
<b>Eficiências</b>					
<b>Remoção de Finos (%)</b>		<b>Recuperação de Produto (%)</b>		<b>Eficiência Global (%)</b>	
96,06		56,91		54,67	

Fonte: Elaborado pelo autor, (2024)

Por se tratar de uma peneira onde se tem dois decks de peneiramento e a geração de três frações distintas a partir da alimentação, a determinação da eficiência foi realizado em duas etapas.

- Etapa 1 - com os valores dos percentuais retidos em cada abertura, foi aplicado as formulações descritas, uma vez que não é possível coletar uma amostra da alimentação 2, a faixa granulométrica desta alimentação foi obtida a partir da soma dos resultados das amostras 3 e 4.
- Etapa 2 - utilizando a distribuição granulométrica da alimentação 2 e as formulações descritas, os cálculos foram realizados, além disso foi aplicado lei de distribuição granulométrica de Rosin-Rammler-Bennett para identificar o percentual retido na abertura de 11 mm, a Figura 21 ilustra esquematicamente a forma de determinação da alimentação 2 do sistema.

Figura 21 - Fluxo esquemático das amostras



Fonte: Elaborado pelo autor, (2024)

As massas de material utilizado para os cálculos foram obtidas a partir da totalização diária registradas nas balanças de processo para cada fração granulométrica gerada, as balanças são do tipo integradoras de fluxo com células de carga, da SHENK, modelo TERSUS com módulo INTECONT.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Características granulométricas

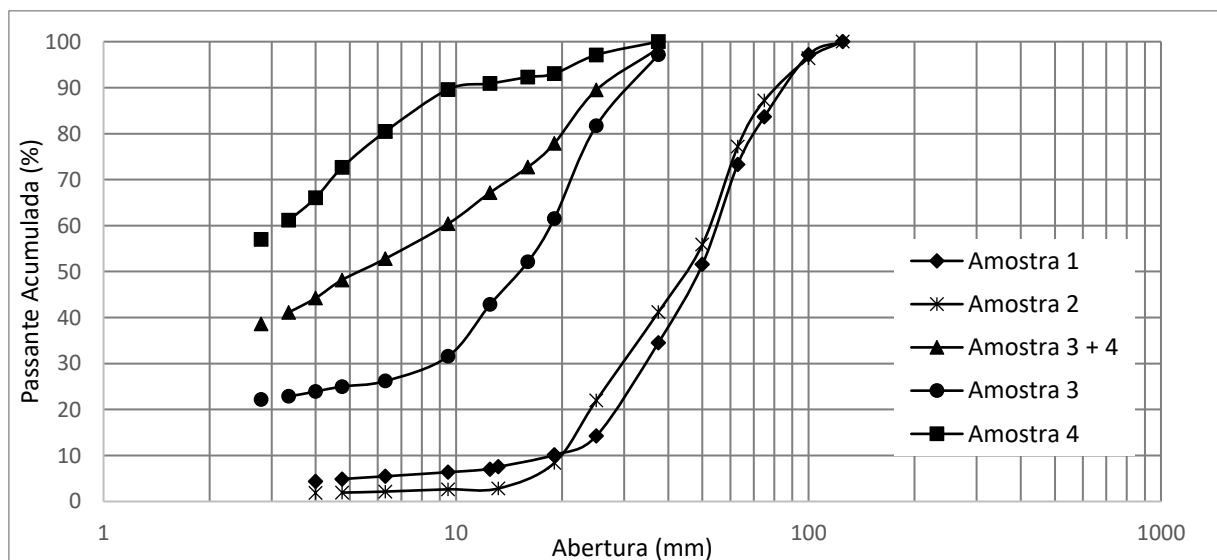
A análise de peneira (ou tela) é um dos métodos mais antigos de análise de tamanho de partículas de materiais granulados podendo ser realizada com materiais úmidos ou secos (WILLS e FINCH, 2016).

A peneira em estudo utiliza telas de abertura quadrada, confeccionadas com armação metálica (aço) e revestimento de borracha.

A literatura é muito escassa quando o material a ser trabalhado em uma superfície de peneiramento é o coque, não encontrando até a data presente, trabalhos que apresentem curvas granulométricas características para o coque.

Os resultados da análise granulométrica das amostras de coque deste estudo foram obtidos por peneiramento a seco, e a distribuição granulométrica das amostras de coque coletadas são exibidas na Figura 22.

Figura 22 – Distribuição granulométrica das amostras de coque



Fonte: Elaborado pelo autor, (2024)

As curvas exibidas na Figura 22, foram determinadas a partir do cálculo da média ponderada da massa retida em cada peneira e seu peso percentual, segundo a equação (10).

$$\frac{\sum_{i=1}^n (X_i * C_i)}{\sum_{i=1}^n C_i} \quad (10)$$

Onde:

$n$  = quantidade de amostras

$X_i$  – percentual retido na peneira

$C_i$  - massa retida na peneira

Pode-se observar na Figura 22, uma mudança nas faixas granulométricas a partir da alimentação saindo de aproximadamente 50 para 4 mm, isto é característico de um sistema de peneiramento, no qual o papel principal é distribuir a matéria prima em faixas granulométricas bem estreitas.

A amostra 1 e a amostra 2 tem uma distribuição predominante entre +25 e – 75 mm já a amostra 3 com faixa granulométrica mais dispersa entre +2,80 e – 25 mm. A amostra 4, parcela enviada para as sinterizações, com um percentual bastante acentuada em -2,80 mm.

O tamanho médio do coque metalúrgico fica tipicamente dentro da faixa de 45 a 55mm (GEERDES *et al.*, 2009). Segundo Barbosa (2018) é importante para a operação eficiente do alto-forno e manutenção da permeabilidade da carga um tamanho médio de coque metalúrgico próximo de 50mm na composição da camada puramente de redutor. A Tabela 6 apresenta os tamanhos médios estatísticos das amostras individuais.

É notado uma redução gradual no tamanho médio nas frações de coque diante dos resultados das amostras analisadas, indicando um bom funcionamento do sistema de peneiramento.

Tabela 6 – Tamanhos médios das amostras de coque

	<b>Amostra 1</b>	<b>Amostra 2</b>	<b>Amostra 3</b>	<b>Amostra 4</b>
Dia 1	52,52	56,96	16,04	5,50
Dia 2	49,23	52,96	14,00	2,81
Dia 3	48,57	48,09	13,75	2,68
Dia 4	47,86	30,11	18,30	3,80
Dia 5	44,26	55,96	18,66	3,65
<b>Média</b>	<b>48,49</b>	<b>48,82</b>	<b>16,15</b>	<b>3,69</b>

Fonte: Elaborado pelo autor, (2024)

Andrade *et al.* (2010) mostra que na operação do alto-forno A (AF-A) da ArcelorMittal Monlevade, o coque utilizado no período de 2002 a 2007, tinha tamanhos médios na faixa de 41 a 54mm, com peneiramento a 38mm o que gerou efeitos positivos no aumento da permeabilidade da carga e do cadinho.

A partir da Tabela 6, pode-se observar que o resultado da amostra 2, que é o produto de maior interesse deste sistema de peneiramento, apresenta um tamanho médio em 48 mm afirmando que o coque enviado para o alto-forno, atende aos requisitos exigidos de tamanhos médios como descrito por BARBOSA, (2018) e GEERDES *et al.*,(2009), tornando-o bastante aceitável para uma operação estável do alto-forno.

No entanto, na amostra 2 e no dia 4 é observado uma causa especial, com um tamanho médio de 30,11mm, este bem abaixo dos demais. Neste dia, em específico, não foi observado instabilidade operacional dos altos-fornos ou perda de permeabilidade, indicando uma mudança pontual na alimentação do sistema de peneiramento.

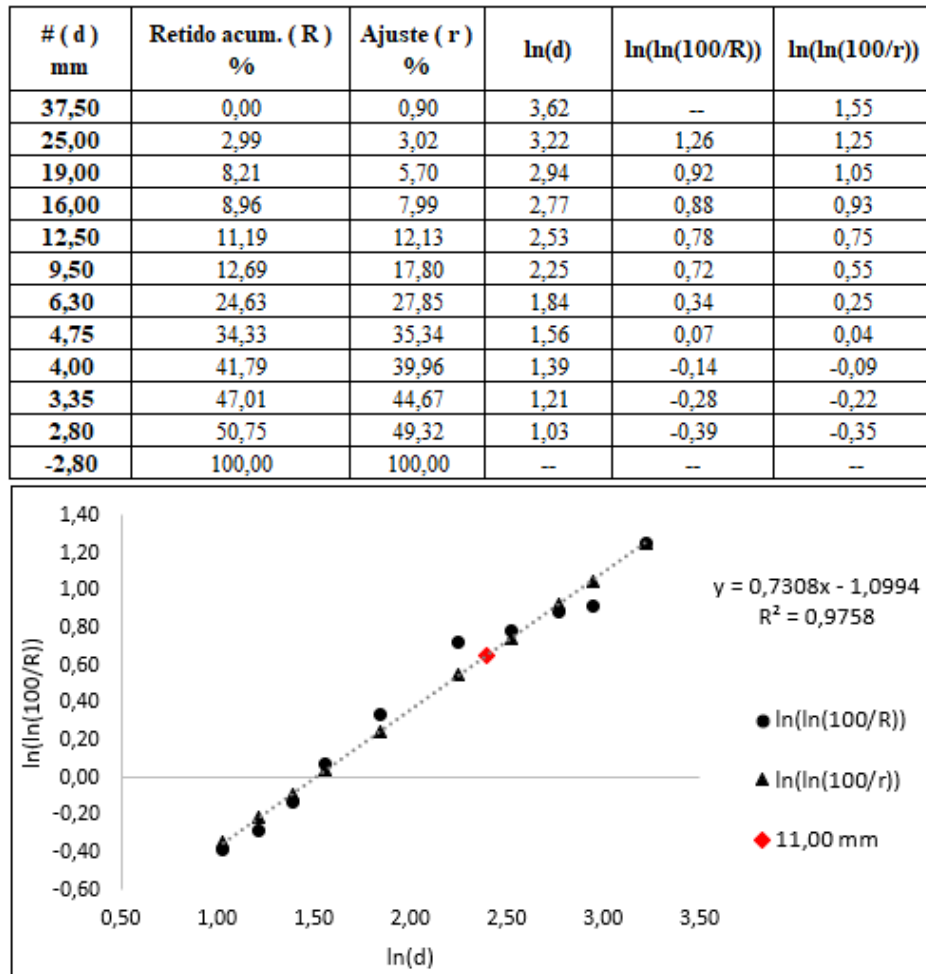
## **5.2. Aplicação da lei de distribuição de Rosin-Rammler-Bennett**

O método Rosin Rammler é um dos métodos mais comuns utilizados em aplicações de processamento mineral, foi originalmente desenvolvido e é frequentemente aplicado em estudo da cominuição e de preparação de carvão, onde, distribuições de tamanho não uniformes são obtidas, esse método é derivado de tentativas de representar curvas de distribuição de tamanho de partícula por meio de equações (WILLS e FINCH, 2016).

A aplicação do modelo RRB (Rosin-Rammler-Bennet) ajustado teve o propósito de se obter o percentual retido na abertura de 11 mm, para realizar os cálculos de eficiência do segundo deck do sistema de peneiramento. Os resultados obtidos foram satisfatórios, gerando coeficientes de ajuste  $R^2$  entre 0,90 e 0,99.

A Figura 23 mostra a curva característica a partir da aplicação da lei, Rosin-Rammler-Bennet, de distribuição para a amostra 4 do Dia 1.

Figura 23 –Aplicação da lei de Rosin-Rammler-Bennett para amostra 4, dia 1



Fonte: Elaborado pelo autor, (2024)

Os coeficientes de uniformidade ( $n$ ) e módulos de finura ( $f$ ) obtidos para as amostras a partir da equação de distribuição granulométrica de Rosin-Rammler-Bennett é apresentada na tabela 7.

Tabela 7 – Coeficientes de uniformidade e módulo de finura para as diferentes amostras de coque

	Amostra 1		Amostra 2		Amostra 3		Amostra 4	
	$n$	$f$	$n$	$f$	$n$	$f$	$n$	$f$
<b>Dia 1</b>	1,3120	67,06	2,1549	79,61	0,7308	4,50	0,9231	22,39
<b>Dia 2</b>	1,8309	57,96	2,0536	73,16	0,7910	2,19	1,0219	17,00
<b>Dia 3</b>	1,2323	70,41	1,7977	72,41	0,8106	2,11	0,7045	15,60
<b>Dia 4</b>	1,2381	57,84	1,7587	37,21	0,6802	2,67	1,7582	22,83
<b>Dia 5</b>	1,4486	59,77	1,7609	95,03	1,1282	3,79	1,9356	22,36

Fonte: Elaborado pelo autor, (2024)

Os coeficientes de Uniformidade ( $n$ ) que mede a dispersão da distribuição das partículas, indicam uma distribuição mais uniforme, vide Figura 22, nas amostras 1 e 2, ou seja, a maioria das partículas com tamanhos próximos e a curva granulométrica mais inclinada, Figura 22, enquanto as amostras 3 e 4 indicam uma distribuição mais dispersa, com partículas de tamanhos muito diferentes e uma curva granulométrica mais plana.

Modulo de finura ( $f$ ) representa o tamanho de partícula onde 63,2% do material ficou retido, nota-se que o modulo de finura cresce com o aumento do tamanho das partículas das amostras analisadas.

### 5.3. Eficiência do sistema de peneiramento

As Tabelas 8 e 9 apresentam os valores obtidos dos cálculos de eficiência das superfícies de peneiramento, nos primeiro e segundo decks desse sistema.

Tabela 8 - Resultados das eficiências do primeiro Deck (%)

	Recuperação de Finos	Recuperação de Produto	Eficiência Global
<b>Dia 1</b>	69,98	98,96	69,25
<b>Dia 2</b>	93,24	97,61	91,01
<b>Dia 3</b>	90,32	92,26	83,33
<b>Dia 4</b>	94,58	59,99	56,74
<b>Dia 5</b>	95,32	92,09	87,78

Fonte: Elaborado pelo autor, (2024)

Tabela 9 - Resultados das eficiências do segundo Deck (%)

	Recuperação de Finos	Recuperação de Produto	Eficiência Global
<b>Dia 1</b>	96,06	56,91	54,67
<b>Dia 2</b>	97,22	52,69	51,22
<b>Dia 3</b>	87,67	50,89	44,62
<b>Dia 4</b>	87,05	76,75	66,82
<b>Dia 5</b>	94,90	77,91	73,94

Fonte: Elaborado pelo autor, (2024)

Para ambas as superfícies de peneiramento é notado uma baixa eficiência global, no entanto quando são avaliados os resultados da amostra 2, a partir dos dados da Tabela 10, de

fato as análises não apresentaram um teor finos elevado, evidenciando a uma alta recuperação de produto, na amostra do dia 4, mas apresentando um elevado percentual retido em 19 mm.

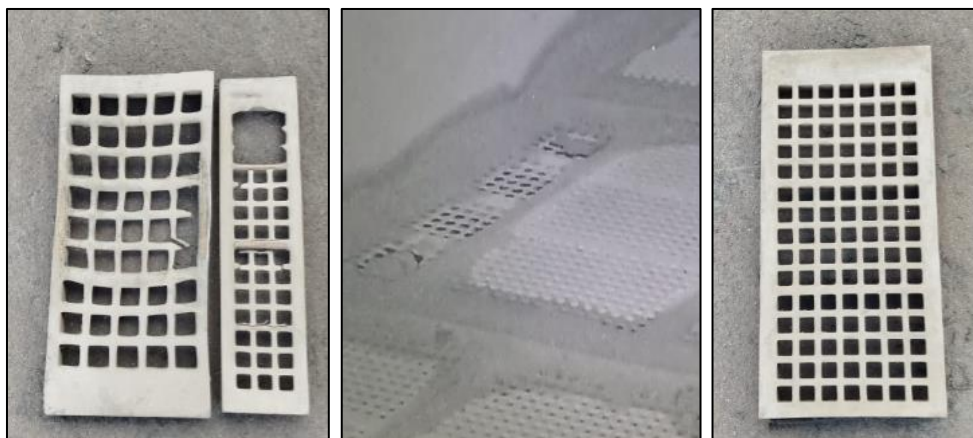
Tabela 10 - Resultados das análises granulométricas das amostras 2 - Retido acumulado (%)

# mm	Dia 1	Dia2	Dia3	Dia 4	Dia 5
<b>125</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>100</b>	4,25	3,09	0,00	0,00	0,00
<b>75,0</b>	17,75	10,48	9,31	2,08	18,80
<b>63,0</b>	30,57	22,36	15,00	4,16	39,18
<b>50,0</b>	62,52	53,51	42,07	7,73	56,40
<b>37,5</b>	79,66	78,95	68,79	18,01	76,93
<b>25,0</b>	97,41	97,29	96,55	60,95	97,60
<b>19,0</b>	99,11	98,50	97,59	84,73	98,60
<b>12,5</b>	99,27	98,88	98,10	93,85	98,74
<b>13,2</b>	99,27	98,88	98,10	93,85	98,74
<b>9,50</b>	99,31	98,88	98,10	94,17	98,74
<b>6,30</b>	99,34	98,97	98,10	95,01	98,78
<b>4,75</b>	99,38	99,06	98,28	95,50	98,82
<b>4,00</b>	99,42	99,16	98,45	95,64	98,85
<b>-4,00</b>	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Fonte: Elaborado pelo autor, (2024)

A justificativa para esse percentual retido em uma abertura superior a utilizada é representada na Figura 24, uma vez que ao avaliar a peneira, foi identificado que existiam malhas danificadas, dando assim condições de existir partículas grossas juntamente com as finas.

Figura 24 – Telas da peneira após campanha, lado esquerdo e centro com desgaste, lado direito tela nova



Fonte: Acervo pessoal, (2024)

Carvalho, (2004) explica que quando não houver nenhuma ruptura ou deformação nas aberturas das telas e as partículas não forem alongadas, a quantidade de material mais grosso que a abertura no passante é muito baixa, aproximando-se de zero, tornando a operação ideal na retenção de grossos. No entanto a ruptura das telas do primeiro deck não mostrou isso para esse sistema, e mesmo assim a eficiência de retenção de grossos atingiu valores superiores a 90%, como visto na Tabela 8.

A Tabela 11, mostra o resultado da análise granulométrica da amostra 3, onde é notado a existência de um percentual, considerável, de material retido na abertura de 25 mm o que pode ser justificado a partir do rompimento das telas do deck superior da peneira, este fato também não foi capturado pelo equacionamento de eficiência proposto por Carvalho (2004).

Tabela 11 - Resultados das análises granulométricas das amostras 3 – Retido acumulado (%)

# mm	Dia 1	Dia2	Dia3	Dia 4	Dia 5
<b>37,50</b>	0,00	0,00	2,92	0,00	0,00
<b>25,00</b>	17,91	9,70	23,36	17,00	21,26
<b>19,00</b>	41,79	29,85	40,88	47,01	48,07
<b>16,00</b>	50,75	41,04	45,99	63,01	59,16
<b>12,50</b>	61,19	54,48	52,55	73,01	70,25
<b>9,50</b>	72,39	70,15	59,12	85,02	86,89
<b>6,30</b>	78,36	76,12	62,77	93,02	94,29
<b>4,75</b>	79,85	77,61	64,23	94,02	95,21
<b>4,00</b>	80,60	79,10	65,69	95,02	96,14
<b>3,35</b>	82,09	79,85	67,15	96,02	97,06
<b>2,80</b>	82,84	80,60	67,88	97,02	97,98
<b>-2,80</b>	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Fonte: Elaborado pelo autor, (2024)

Correia e Couto (2018) citam que industrialmente, a eficiência de peneiramento varia entre 80% e 90%, podendo alcançar até 95% em alguns casos, diante do exposto, fica claro que mesmo com a ruptura de algumas telas, no geral a eficiência de recuperação de finos se mostrou, de certa forma adequada, gerando um valor médio aproximadamente 88 %.

A eficiência global do sistema se mostrou inadequada, com um valor médio de aproximadamente 77 % no primeiro deck e 58% no segundo, indicando a necessidade de intervenção e adequação de rotinas periódicas de manutenção e operação.

O percentual de finos observado nas análises da amostra 3, na Tabela 11, é bastante elevado nas aberturas inferiores a 12,5 mm, como esta peneira tem uma separação do segundo

deck em + 11 e -25 mm, é notado uma baixa recuperação de finos, com estes indo para o produto resultante do segundo deck de peneiramento.

Um rompimento das telas do primeiro deck gera uma sobrecarga no segundo, ocasionando um volume superior ao que deveria ser de fato alimentado, essa condição potencializa uma baixa estratificação das partículas, ocasionado por uma elevação na camada sobre o deck, essa condição é bem ilustrada na Figura 11.

A Tabela 12 apresenta os resultados da amostra 4, o maior volume de partículas está concentrado em tamanhos inferiores a 2,80 mm, porém nota-se grande quantidade retida nas aberturas acima das praticadas no sistema.

Tabela 12 - Resultados das análises granulométricas das amostras 4 – Retido acumulado (%)

# mm	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5
37,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25,00	2,99	0,00	0,00	2,88	0,00
19,00	8,21	0,76	0,78	2,88	0,00
16,00	8,96	0,76	0,78	2,88	0,98
12,50	11,19	1,53	0,78	3,60	1,96
9,50	12,69	3,05	1,55	4,32	3,92
6,30	24,63	9,16	7,75	14,39	16,67
4,75	34,33	14,50	13,95	22,30	28,43
4,00	41,79	20,61	20,16	29,50	37,25
3,35	47,01	25,95	25,58	34,53	43,14
2,80	50,75	31,30	30,23	38,85	47,06
-2,80	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Fonte: Elaborado pelo autor, (2024)

#### 5.4. Umidades

O teor de umidade é uma consequência direta do processo de resfriamento, com alguma dependência do tamanho do coque (SHARMA *et al.*, 2013).

O coque utilizado nesse trabalho foi resfriado pelo método a úmido convencional CWQ (*coke wet quenching*) onde a extinção é realizada pelo topo da torre, utilizando uma descarga de água sobre o coque incandescente, cessando o processo de queima.

Dos resultados observa-se que com a redução dos tamanhos das partículas ocorre um aumento da umidade, esse fenômeno é explicado pelo fato que com a redução de tamanho ocorre o aumento da sua superfície específica resultando em uma maior retenção de água superficial. Os resultados são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Resultado das análises de umidades

	<b>Amostra 1</b>	<b>Amostra 2</b>	<b>Amostra 3</b>	<b>Amostra 4</b>
<b>Dia 1</b>	3,20	4,00	16,25	16,25
<b>Dia 2</b>	4,60	6,90	8,22	12,67
<b>Dia 3</b>	3,80	6,18	9,87	16,23
<b>Dia 4</b>	4,00	5,20	13,08	15,34
<b>Dia 5</b>	4,00	1,20	12,59	15,83

Fonte: Elaborado pelo autor, (2024)

As especificações de umidade para o coque da amostra 2, alimentação do sistema, é de 4,0% para controle interno, no dia 2, foi observado uma elevação da umidade, superior ao limite de especificação.

A correlação de PEARSON entre a umidade da alimentação e as eficiências, Tabela 14, mesmo se mostrando fraca, sugere que com um aumento na umidade da alimentação é possível obter um aumento na eficiência de recuperação de produto no primeiro deck.

Tabela 14 – Correlação entre umidade da alimentação e as eficiências globais do sistema

	<i>Umidade Alimentação</i>	<i>Eficiência 1</i>	<i>Eficiência 2</i>
<b>Umidade da Alimentação</b>	1		
<b>Eficiência 1</b>	0,472	1	
<b>Eficiência 2</b>	0,058	-0,236	1

Fonte: Elaborado pelo autor, (2024)

Tabela 15 – Correlação entre umidade dos finos e as eficiências globais do sistema

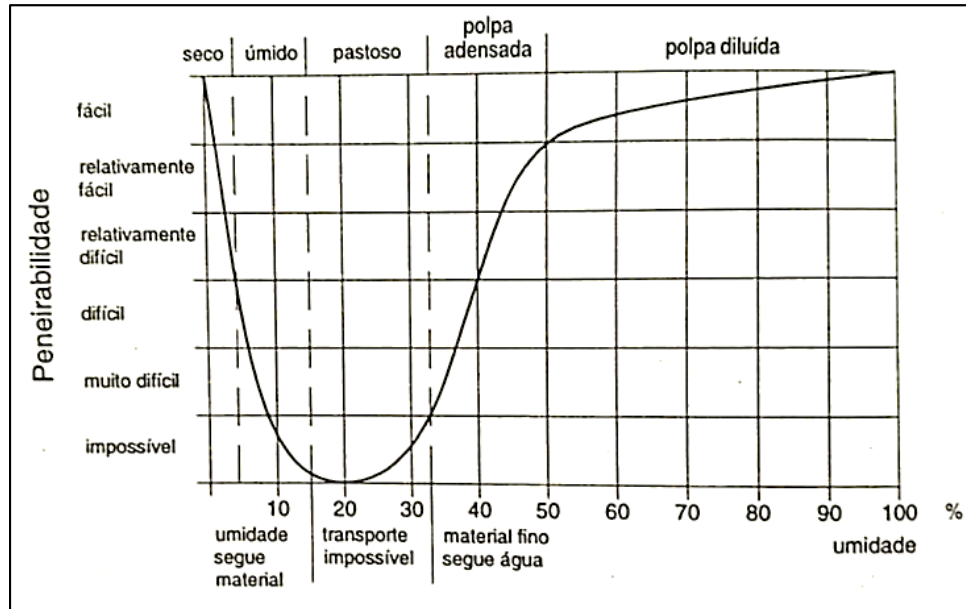
	<i>Umidade dos finos</i>	<i>Eficiência 1</i>	<i>Eficiência 2</i>
<b>Umidade dos finos</b>	1		
<b>Eficiência 1</b>	-0,388	1	
<b>Eficiência 2</b>	0,155	-0,236	1

Fonte: Elaborado pelo autor, (2024)

Diante do exposto por Chaves e Peres (2009) e observado na Figura 25, que com o aumento da umidade do material, para sistemas projetados para peneiramento a seco, o

peneiramento vai se tornando cada vez mais difícil, uma vez que umidades na faixa de 10 a 30% o peneiramento torna-se impossível.

Figura 25 – Efeito da umidade sobre o peneiramento



Fonte: (CHAVES e PERES, 2009)

O contrário pode ser observado na Tabela 15, onde a elevação na umidade dos finos sugere uma redução das eficiências 1 (primeiro Deck) e 2 (segundo Deck). Essa correlação tem significado físico, ilustrado na Figura 26, onde apresentou uma quantidade de finos aderidos a superfície das telas com certa umidade visualmente perceptível, reforçando o efeito de maior quantidade de finos na amostra 3, apresentada na Tabela 15.

Figura 26 – Finos aderidos na superfície de peneiramento do segundo deck



Fonte: Acervo pessoal, (2024)

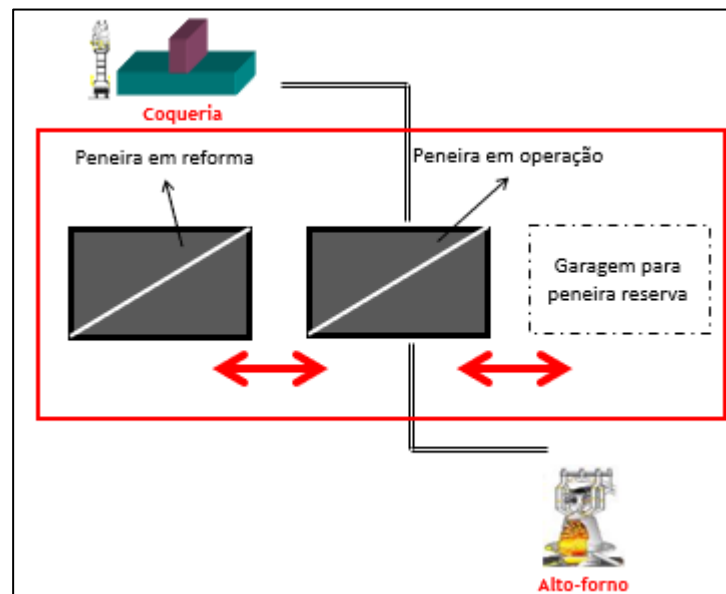
A peneira analisada neste estudo está localizada no interior de um galpão coberto. No entanto, as correias que fazem o transporte do coque, entre as coqueiras e a peneira, não são em sua totalidade cobertas, podendo ter influências diretas de chuvas. Entretanto, nos dias em

que as amostras foram coletadas, não houve chuva, eliminando esse fator como responsável pela umidade observada nas amostras.

### 5.5. Overview do sistema

O sistema de peneiramento em estudo é responsável por beneficiar todo o coque produzido pelas coquerias onde foram geradas as amostras, realizando a separação granulométrica e destinando os produtos aos clientes internos. Para o beneficiamento do coque o sistema, atualmente, é composto por duas peneiras, de igual formato e capacidades. Enquanto uma peneira está em operação a outra passa por processo de reforma para substituição de componentes estruturais, motores de acionamento e elementos rotativos do sistema de vibração bem como a aplicação de revestimentos para reduzir o processo de corrosão e desgaste por abrasão das estruturas metálicas, a Figura 27 ilustra esquematicamente essa configuração.

Figura 27 – Configuração atual do sistema de peneiramento



Fonte : Elaborado pelo autor, (2024)

Após uma análise de todo o sistema de peneiramento verificando as principais práticas realizadas dentro das rotinas de manutenção e operação alguns pontos de atenção foram identificados:

- Foi observado que as telas da peneira chegavam ao seu limite de uso, acarretando ruptura nas aberturas ou desprendimento por danos estruturais nas vigas de sustentação.

- O tempo de vida útil das telas utilizadas no peneiramento não é conhecida pelos técnicos de processo e de manutenção, ficando a cargo dos operadores identificar visualmente quando a granulometria do material estava acima do tamanho das aberturas das telas utilizadas e solicitar ou realizar a substituição por telas novas.
- O tempo de campanha de cada peneira não é bem definido, já ocorreu períodos de operação iguais ou superiores a 9 meses bem como tempos menores próximo a 5 meses. Essa referência não é bastante clara e várias foram as ocorrências registradas de paradas emergenciais para realizar correções estruturais e substituição de componentes como vigas de sustentação telas e elementos rotativos.

O coque como sendo a matéria prima que ocupa a maior parcela do custo de produção de gusa, a realização de troca das telas no período correto gera ganhos significativos no rendimento granulométrico do coque produzido, como já citado anteriormente, o principal objetivo deste sistema de peneiramento é a separação do coque de interesse para uso no alto-forno (Metalúrgico e Small) e a perda deste para os finos gera uma elevação considerável no custo final de produção.

O processo de coqueria é conhecido por ser um processo que não permite paradas na produção, o fato de apenas uma das peneiras operar por vez, durante o período de substituição da peneira todo o coque produzido é desviado para os pátios e manuseado com caminhão basculado e pá carregadeira, essa atividade gera uma degradação excessiva e afinamento do coque ao final do processo de transporte, além de gerar custos adicionais de transporte pesado para o manuseio e estocagem.

- A substituição de uma peneira por outra, acarreta uma parada de aproximadamente 18 horas de todo o sistema de peneiramento e transporte do coque, o trabalho para substituição da peneira em operação pela que estava em reforma, é bastante manual, visto que não existe um sistema automático motorizado para o movimento de traslado das peneiras, esta atividade gera uma grande demanda de mão de obra.

Diante do contexto descrito e atual cenário de automação industrial cabe comentários quanto a Indústria 4.0 que representa a digitalização dos processos industriais por meio da integração de tecnologias como inteligência artificial, robótica, internet das coisas e automação. Essa transformação permite a tomada de decisões em tempo real, aumentando a produtividade, a flexibilidade e a agilidade na fabricação, melhoria e distribuição de produtos (IBM, 2025).

Ainda:

- Foi verificado que na peneira não existe nenhum sistema de monitoramento, sendo desconhecidos os parâmetros de operação como amplitude, vibração, lubrificação, essa falta de monitoramento ocasiona falhas que não são identificadas pelo técnico de manutenção, tornando o trabalho de manutenção preditiva moroso e sem atuação preventiva nas causas de falhas de componentes.

No peneiramento industrial, a eficiência é utilizada para avaliar o desempenho do processo em relação à separação granulométrica ideal. Essa eficiência é determinada pela relação entre a quantidade de partículas finas que atravessam a tela de peneiramento e a quantidade total dessas partículas na alimentação (CORREIA e COUTO, 2018).

- A análise de eficiência do sistema de peneiramento, dentro da rotina operacional, é inexistente, essa condição gera atuações somente quando o alto-forno, principal cliente do produto gerado no peneiramento (amostra 2), sofre com problemas de permeabilidade por aumento na entrada de finos vindo da matéria prima.

## **5.6. Propostas de melhoria do sistema**

### **5.6.1. Recuperação de produto**

A perda de produto por malhas danificadas ou a falta delas é um problema comum em sistemas de peneiramento e pode impactar significativamente a eficiência e a rentabilidade do processo, diante do exposto e das observações relatadas no tópico anterior as seguintes ações, descritas no Quadro 2, foram propostas.

Quadro 2 – Ações propostas para aumento da recuperação de produto

O Que?	Como?	Por quê?
<b>Utilizar telas de poliuretano (PU) no primeiro deck.</b>	Desenvolvendo o modelo de telas utilizado atualmente com fornecedores de telas para peneiramento.	Maior resistência o desgaste por abrasão
<b>Instalar reforço adicional na alimentação da peneira</b>	Utilizando malhas sem aberturas com reforço adicional.	Reduzir desgaste localizado e maior proteção contra impactos de partículas grandes
<b>Planejamento de substituição das telas</b>	Realizando medições periódicas do desgaste das telas	Redução de custos por paradas não planejadas
<b>Plano de substituição de componentes estruturais</b>	Realizando Inspeções semanais com ensaios não destrutivos ou inspeção visual	Reduzir interrupções não planejadas e definir tempo máximo de campanha
<b>Implantar sistema de monitoramento do sistema</b>	Existe no mercado vários fornecedores de equipamentos de monitoramento, coleta e análise de dados	O acompanhamento online do comportamento da peneira auxilia na tomada de decisão e controles de processo.
<b>Rotina de análise de eficiência</b>	A partir de coleta de amostras e análise de peneiramento, aplicando os cálculos disponíveis neste trabalho.	O conhecimento da eficiência de uma peneira, auxilia o técnico de processo nos controles operacionais, com ganho em performance e produtividade

Fonte: : Elaborado pelo autor, (2024)

### 5.6.2. Remoção de finos

Com o aumento da umidade superficial, as partículas não estão livres para se moverem sozinhas, dificultando o transporte do oversize sobre o deck e reduzindo a capacidade da peneira (CHAVES e PERES, 2009). O coque com alta umidade causa aglomeração das partículas, especialmente as partículas de menor diâmetro, causando entupimento das telas e redução da eficiência do peneiramento.

Partindo do suposto que o ideal é que a umidade do coque seja a menor possível ou zero, a seguinte ação, descritas no Quadro 3, foram propostas:

Quadro 3 – Ações propostas para aumento da remoção de finos

O Que?	Como?	Por quê?
<b>Extinção a seco do coque</b>	Realizando um estudo de viabilidade abordando a relação custo-benefício para o processo.	Melhor desempenho dos altos-fornos, bem como eliminação quase que por completa da umidade melhorando a condição de recuperação de finos.
<b>Instalar cobertura no sistema de transporte.</b>	Implantar projeto com cobertura simples metálica com revestimento anticorrosivo.	Controle da umidade gerada por chuvas intensas, que é uma característica da região. Essa ação reduzirá o entupimento de telas do segundo deck, aumentando a eficiência de recuperação de produto e uma melhor remoção de finos.

Fonte: : Elaborado pelo autor, (2024)

## 6. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, este trabalho permitiu uma análise detalhada sobre a eficiência de separação de partículas de um sistema de peneiramento de coque de uma siderúrgica da região, destacando a importância de se conhecer o material alimentado na peneira no âmbito das características granulométricas umidades e controles necessários para a melhor performance do sistema no contexto de preparação de carga de redutor para o alto-forno.

A partir da avaliação dos dados das 20 amostras coletadas foi possível conhecer a real distribuição granulométrica da alimentação e das frações geradas após o peneiramento, o oversize 1, produto principal do sistema de peneiramento apresentou tamanho médio em 48mm, de acordo com a literatura buscada, apresentou-se com característica adequada para a operação estável do alto-forno. No entanto a eficiência global do peneiramento no primeiro deck demonstrou resultados muito baixos com valor médio de 77%, os resultados do segundo deck foram ainda menores com um valor médio de 58%, ficando abaixo da faixa esperada de 80 a 95%.

A análise individual das amostras demonstrou claramente a necessidade de criar rotinas periódicas de manutenção e utilização de tecnologias para dar previsibilidade e ganho em produtividade no processo. Observado que o segundo deck sofreu grande influência do rompimento das telas do primeiro deck, causando uma elevação de coque alimento dificultando a estratificação e reduzindo a probabilidade da partícula se apresentar a abertura. Isso foi visto pelo percentual de finos nos grossos da segunda superfície de peneiramento nos resultados da amostra 3 dos dias 1, 2 e 3.

A umidade não demonstrou correlação significativa que influenciasse negativamente na eficiência do primeiro deck, porém apresentou uma tendência de redução no segundo deck sugerindo que com a elevação da umidade dos finos uma redução da eficiência será notada, com a ocorrência de entupimento das telas.

O modelo de distribuição granulométrica de Rosin-Rammler-Bennet (RRB), demonstrou satisfatório apresentando coeficientes de ajuste  $R^2$  entre 0,9 e 0,99, evidenciando que o modelo se adapta bem a qualquer tipo de ROM (Run of Mine), como descrito por (CHAVES, 2002). Os resultados geram base para aplicação dentro das rotinas operacionais para conhecer e caracterizar o percentual retido em qualquer abertura, nesse estudo foi abordado a abertura de 11 mm, mas para uma necessidade de alteração é possível calcular os devidos

impactos nos volumes de materiais gerados a partir da alimentação mesmo antes de realizar a modificação do tamanho da abertura das telas dando melhor embasamento para tomadas de decisões.

Por fim, a partir dos resultados obtidos, foi possível gerar ações de práticas simples não existentes atualmente, que tem grande impacto nos resultados obtidos, uma delas que gerou maior discrepância é a falta de uma rotina estruturada de substituição de telas. Que partindo do pressuposto que para uma separação adequada de partículas, a condição dessas telas é fator crucial e que tem grande influência no custo e resultado de produção, essa deve ser uma rotina básica e de conhecimento dos técnicos de processo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALENCAR, J. P. S. G., PARREIRA, Â. G. OLIVEIRA, V. M., WAGNER, D. T., RICARDO, M. A. **PROPRIEDADES A ALTAS TEMPERATURAS DE CARGAS MISTAS: MINÉRIO – SMALL COKE E MINÉRIO – HBI**, p. 728-737. *In*: 43º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas e o 14º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro, São Paulo, 2013. ISSN: 2594-357X , DOI 10.5151/2594-357X-23919.

ALVES, F. I. C. **Produção de Coque Metalúrgico a Partir de Carvão Densificado por Vibrocompactação em Forno de Soleira Aquecida**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, - 2017. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/jspui/handle/123456789/7432>. Acesso em: 23 mar. 2024.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL, **ASTM D 293**, Standard Test Method for the Sieve Analysis of Coke, 1999.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL, **ASTM D 3173**, Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke, (2011).

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL, **ASTM D 3174**, Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal, 2012

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL, **ASTM D 5341**, Standard Test Method for Measuring Coke Reactivity Index (CRI) and Coke Strength After Reaction (CSR), 2014.

ANDRADE, F. C., SANTOS, R. J., OLIVEIRA, W B. **EVOLUÇÃO DA OPERAÇÃO DO ALTO-FORNO “A” DA ARCELORMITTAL MONLEVADE COM ELEVADA PARTICIPAÇÃO DE “SMALL COKE” NA CARGA REDUTORA**. ABM - Tecnol. Metal. Mater. Min., vol. 7, n. 1-2, p.1-5, 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4322/tmm.00701001>. Acesso em: 20 jul. 2024

BARBOSA, F. L. L. **Degradação Mecânica De Coque Metalúrgico e Sínter**, 2018, Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - UFRJ/ Escola Politécnica,- 2018. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/18035/1/monopoli10026730.pdf>. Acesso em : 30 abr. 2024

CARVALHO, S. C. **SIMULAÇÃO PROBABILÍSTICA DE PENEIRAMENTO VIBRATÓRIO**, 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, - 2004.

CASAGRANDE, C. M. **Avaliação Dos Parâmetros De Cri E Csr Do Coque Produzido Em Forno Industrial, Forno De Soleira Aquecida Box Test**, 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, - 2010. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/2642>. Acesso em: 09 abr. 2024

CHAVES, A. P.; PERES, A. E. C., **Teoria e Prática do Tratamento de minérios - Britagem, Peneiramento e Moagem**, v. 3, n. 4, Signus, São Paulo, 2009.

CHAVES, A. P.; PERES, A. E. C., **Teoria e Prática do Tratamento de minérios - Britagem, Peneiramento e Moagem**, v. 3, n. 2, Signus, São Paulo, 2003.

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

COELHO, R. J. *et al.* Modelos de Previsão de Qualidade Metalúrgica do Coque a Partir da Qualidade dos Carvões Individuais e do coque Obtido no Forno Piloto de Coqueificação. **REM - Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 57, n. 1, p. 27 – 32, mar. 2004. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0370-44672004000100006 &script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0370-44672004000100006 &script=sci_arttext). Acesso em: 23 mar. 2024

CORREIA, J. C. G.; COUTO, H. J. B. **Classificação e peneiramento**. *In*: Tratamento de minérios. 6.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2018. Cap.5, p 225-272. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/2177>. Acesso em 21 jul. 2024

COSTA, E. N. **Peneiramento De Partículas Finas E Ultrafinas Com Adição De Dispersantes**. 2014, Monografia (Especialização Em Tratamento De Minérios) - Universidade Federal De Goiás,- 2014. Disponível em: [https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/596/o/Evair\\_Nunes\\_da\\_Costa.pdf](https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/596/o/Evair_Nunes_da_Costa.pdf). Acesso em: 28 jul. 2024.

DUCHENE, J. M., PRUDHON, G., **CHARACTERIZATION OF COAL AND COKE**, *In*: Coke Oven Techniques, v. 1, cap. 10, p. 125 - 138, graham & Trotman Limited, Luxemburgo, 1982. Disponível em: DOI: 10.1007/978-94-009-7367-1. Acesso em: 10 jun. 2024

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, **Emission Inventory Guidebook – 2006**, Combustion in energy and transformation industries, solid fuel transformation plants, coke oven furnaces, cap. B146, EMEP/CORINAR, 2007. Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/publications/EMEPCORINAIR4/page010.html>. Acesso em: 13/07/2024

IBM. **O que é Indústria 4.0?** Disponível em: <https://www.ibm.com/br-pt/topics/industry-4-0> . Acesso em: 14 fev. 2025

GEERDES, M., VLIET, C., TOXOPEUS, H. **Modern Blast Furnace Ironmaking an introduction**, p. 38 – 52, IOS Press BV, Holanda, 2009.

GHOSH, A., CHATTERJEE, A., **IRONMAKING AND STEELMAKING**, Theory and Practice, v. 1, p. 146 – 156, PHI Learning Private Limited, Nova Deli, 2008.

GIGLIO, A. M. **Modelo de Previsão de Qualidade de Coque Metalúrgico para Utilização em Altos-Fornos Utilizando Produção em Escala Piloto**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Pontifícia Universidade Católica Do Rio De Janeiro, 2016. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/29703/29703.PDF> Acesso em: 23 mar. 2024.

GÓES, M. A. C.; LUZ, A. B.; POSSA, M. V. **Amostragem**. *In*: Tratamento de minérios, 5.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. Cap.2. p.23-44. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/721>. Acesso em: 06 ago. 2024.

GOLECZKA J., TUCKER J., **High Temperature Stability Of Coke In Relation To Its Bulk Permeability**, *In*: Coke Oven Techniques, v. 1, cap. 9, p. 109 - 124, graham & Trotman Limited, Luxemburgo, 1982. Disponível em: DOI: 10.1007/978-94-009-7367-1. Acesso em: 10 jun. 2024

GUPTA, A., YAN, D. **Mineral Processing Design and Operations**, An Introduction. 2º ed. Elsevier Science & Technology Books, 2015. ISBN: 978-0-444-63589-1.

HILDING, T., KAZUBERNS, K., GUPTA, S., SAHAJWALLA, V., SAKUROVS, R., BJORKMAN, B., *et al*. Effect of temperature on coke properties and CO<sub>2</sub> reactivity under laboratory conditions and in an experimental blast furnace. *In*: **AISTech - Iron and Steel**

**Technology Conference Proceedings**, v.1, p. 497 - 505, 2005. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/264416249>. Acesso em: 10 abr. 2024.

INSTITUTO AÇOS BRASIL, **Anuário Estatístico 2024**, Rio de Janeiro, Julho/2024. Disponível em: [https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2024/07/Anuario\\_Completo\\_2024.pdf](https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2024/07/Anuario_Completo_2024.pdf). Acesso em: 14 jul. 2024.

LUNDGREN, M. **Blast Furnace Coke Properties and the Influence on Off-gas Dust**, 2010. Tese (Licenciatura em metalurgia extrativa) - Luleå University of Technology, - Luleå, 2010. Disponível em: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:991013/FULLTEXT01.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2024.

LUZ, J. A. M., CARVALHO, S. C. Modelamento matemático de peneiramento vibratório (parte 1): dimensionamento clássico. **REM - Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 58, n 1, p. 57 - 60, mar. 2005. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0370-44672005000100010&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0370-44672005000100010&script=sci_arttext). Acesso em: 03 mar. 2024.

LUZ, J. A. M., CARVALHO, S. C. Modelamento matemático de peneiramento vibratório (parte 2): simulação. **REM - Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 58, n. 2, p.121 – 125, Jun. 2005. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0370-44672005000200005&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0370-44672005000200005&script=sci_arttext). Acesso em: 03 mar. 2024

METSO. **Tudo o que você precisa saber sobre peneiramento**. Metso, 2020. Disponível em: <https://www.metso.com/pt/insights/blog/mineracao-e-metals/tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-peneiramento/>. Acesso em: 20 jun. 2024.

MOURÃO, M. B.; YOKOJI, A.; MALYNOWSKYJ, A.; LEANDRO, C. A. S.; TAKANO, C., *et al.* **Introdução a Siderurgia**, ABM, São Paulo , 2007.

OLIVEIRA, D. S., **Avaliação De Modelos De Previsão Da Qualidade De Coque Baseado Em Abordagem De Mineração De Dados E Aprendizado De Máquina**, 2023. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, – Porto Alegre, 2023. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/267714>. Acesso em: 09 abr. 2024.

OLIVEIRA, M. L. M.; AQUINO, J. A. **Amostragem**. *In: Tratamento de Minérios: práticas laboratoriais*. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2007. p. 3-34. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/544>. Acesso em: 07 ago. 2024.

OLIVEIRA, R. S., **Produção de Coque Metalúrgico Através da Utilização Parcial de Briquetes de Carvão Mineral**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, - 2017. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/jspui/handle/123456789/9089>. Acesso em: 03 abr. 2024.

POVEROMO, J. J. **Coke In The Blast Furnace** *In: Cokemaking Course, Principles, Raw Materials And Design*, v. 1, cap. 2, p. 1 - 57. , Canada, 2005

SAMPAIO, J. A.; SILVA, F. A. N. G. **Análise granulométrica por peneiramento**. *In: Tratamento de Minérios: práticas laboratoriais*. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2007. p. 55-72. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/1020>. Acesso em: 21 jul. 2024

SATO, H. **Strength Of Metallurgical Coke In Relation To Fissure Formation**, 1999. Tese (Doutorado em Filosofia) - Loughborough University, - 1999. Disponível em: <https://hdl.handle.net/2134/8350>. Acesso em: 23 mar. 2024

SHARMA, R., DHARMENDRAB, K., TIWARIA, H. P., BANERJEE, P. K., **Study on Coke Size Degradation from Coke Plant Wharf to Blast Furnaces Stock House**, *In: Coke and Chemistry*, 2013, v. 56, n. 11, p. 412 – 418, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.3103/S1068364X13110057>, Acesso em: 10 abr. 2024

SILVA, G. L. R. **Otimização da mistura de carvões na produção de coque metalúrgico**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, - Ouro Preto, 2011. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/2548>. Acesso em: 23 mar. 2024.

SILVA, G. L. R. **Utilização de Moinha de Biorredutor e Pneu Inservível na Produção de Coque Metalúrgico**, 2016 - Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, - Ouro Preto, 2016. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/7317>. Acesso em: 09 ago. 2024.

SILVA, M. B. S. **PROJETO DE UM SISTEMA DE EXTINÇÃO A SECO DE COQUE PARA UMA PLANTA PILOTO DE COQUERIA DE UMA INDÚSTRIA**

**SIDERÚRGICA**. 2018, Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Ouro Preto,- 2018. Disponível em: <http://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/1583>. Acesso em: 11 abr. 2024.

**SILVA, O. J. Caracterização Tecnológica de Carvões para Coqueria**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, - 2008. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/jspui/handle/123456789/3005>. Acesso em: 24 mar. 2024.

**SOLDINGER, M. Interrelation of stratification and passage in the screening process**. Minerals Engineering. v. 12, n. 5, p. 497-516, 1999. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(99\)00033-3](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(99)00033-3). Acesso em: 4 ago. 2024.

**UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, Coke Oven Emissions from Wet-Coal Charged By-Product Coke Oven Batteries – Background Information for Proposed Standard**, (Emission Standards and Engineering Division), Estados Unidos, 1987. Disponível em: <https://nepis.epa.gov/Exe/tiff2png.cgi/2000JEDU.PNG?-r+75+-g+7+D%3A%5CZYFILES%5CINDEX%20DATA%5C81THRU85%5CTIFF%5C00000877%5C2000JEDU.TIF>. Acesso em: 15/06/2024

**VALADÃO, G. E. S.; ARAUJO, A. C. INTRODUÇÃO AO TRATAMENTO DE MINÉRIOS**, UFMG, Belo Horizonte, 2007.

**WILLS, B. A. FINCH, J. A. Wills' Mineral Processing Technology**, An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery. 8° ed. Elsevier Science & Technology Books, 2016. ISBN: 978-0-08-097053-0