

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS
GERAIS – *CAMPUS* OURO BRANCO

BACHARELADO EM ENGENHARIA METALÚRGICA

Daiane Aparecida de Oliveira

**DESENVOLVIMENTO DE UMA CARGA TERMORREDUTORA PARA USO COMO
COMPLEMENTO AO *SMALL COKE* NO ALTO-FORNO DE UMA USINA
INTEGRADA A COQUE**

OURO BRANCO – MG

2025

DAIANE APARECIDA DE OLIVEIRA

**DESENVOLVIMENTO DE UMA CARGA TERMORREDUTORA PARA USO COMO
COMPLEMENTO AO *SMALL COKE* NO ALTO-FORNO DE UMA USINA
INTEGRADA A COQUE**

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

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Liziero Ruggio da Silva

Coorientador: Prof. Dr. Antonio Marlon Barros Silva

Ouro Branco - MG

2025

FICHA CATALOGRÁFICA

O48d Oliveira, Daiane Aparecida de

Desenvolvimento de uma carga termorreductora para uso como complemento ao small coke no alto-forno de uma usina integrada a coque / Daiane Aparecida de Oliveira. – 2024.

78f.: il.col.

Orientador: Guilherme Liziero Ruggio da Silva.

Coorientador: Antônio Marlon Barros Silva

Trabalho de Conclusão de Curso (bacharelado) – Instituto Federal de Minas Gerais. *Campus* Ouro Branco, 2024.

1. Carga termorreductora. 2. Small coke. 3. GEE's. 4. CO2. I. Oliveira, Daiane Aparecida de. II. Silva, Guilherme Liziero Ruggio da. III. Silva, Antônio Marlon Barros IV. Instituto Federal de Minas Gerais. *Campus* Ouro Branco. V. Título.

CDU: 669

FOLHA DE APROVAÇÃO



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 17:30 horas, o aluno DAIANE APARECIDA DE OLIVEIRA do curso de ENG. METALÚRGICA turma 2020 do IFMG – Campus Ouro Branco defendeu o () TCC I (X) 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, Daiane Aparecida de Oliveira, estudante do curso Eng. 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: Daiane

NOME COMPLETO E ASSINATURA DOS COMPONENTES DA BANCA E DO ORIENTADO

Orientador(a): Nome: Guilherme Lázaro R. de A. Assinatura: Guilherme
Membro 2: Nome: Antonio Marlon Barros Silva Assinatura: Antonio
Membro 3: Nome: HENRI MENRIQUE SOUZA E SILVA Assinatura: Henri
Membro 4: Nome: _____ Assinatura: _____
Membro 5: Nome: _____ Assinatura: _____
Aluno: Nome: Daiane Aparecida de Oliveira Assinatura: Daiane

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, José Guilherme e Silvia, por todos os ensinamentos e amor incondicional.

Aos meus irmãos, Ana Cristina, Silvano, Adriano e Rodrigo, por todo o companheirismo e cumplicidade.

Aos meus sobrinhos, Brunno Henrique, Cecília, Arthur e Miguel, por toda a alegria e momentos de distração.

Às minhas cunhadas, Ana Paula e Gabriella, por todo o apoio e incentivo.

Aos meus amigos e demais familiares, por todo o carinho e compreensão.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Guilherme Liziero, pelo direcionamento, paciência e dedicação.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Antonio Marlon, pelos ensinamentos, empenho e disponibilidade.

À Prof^a. Dr^a. Letícia Cheloni, por toda a gentileza e clareza nos ensinamentos transmitidos.

Ao técnico de laboratório, Msc. Alex Rodrigues, por todo o apoio durante a execução dos ensaios mecânicos.

Aos membros das bancas examinadoras, Prof. Msc. David Vieira e Prof. Msc. Heric Silva, por todas as contribuições e enriquecimento do trabalho.

Aos colegas e amigos de curso, pela parceria e fraternidade.

Ao IFMG e corpo docente, pela oportunidade e conhecimentos partilhados.

EPÍGRAFE

“Se te apetece esforçar, esforça-te; se te apetece repousar, repousa; se te apetece fugir, fuja; se te apetece resistir, resista; mas saiba bem o que te apetece, e não recue ante nenhum pretexto, porque o universo se organizará para te dissuadir.”

(Friedrich Nietzsche)

RESUMO

A fim de se garantir eficiência energética e produtividade, o fluxo em contracorrente e a utilização de diversas formas de combustíveis são imprescindíveis para o alto-forno. Dentre os combustíveis habituais, o *small coke*, carregado junto à carga metálica, destaca-se por possuir como principal função a capacidade de acelerar a reação de redução e, por consequência, reduzir custos e tempo de processo. Porém, devido à sua origem fóssil, tal combustível apresenta ligação direta com a elevada emissão de CO₂ no âmbito siderúrgico. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi desenvolver uma carga termorreductora capaz de substituir parcialmente o *small coke* e, com isso, reduzir impactos ambientais e/ou financeiros. Dessa forma, carvão vegetal, coque verde de petróleo e antracito foram avaliados, do ponto de vista físico-químico, quando carregados sob a forma de *small* no alto-forno. A caracterização física destacou as amostras CV-50 e CV/CVP-50, caracterizadas por alta resistência à queda (95,25% e 90,75%, respectivamente) e a frio (96,30% e 94,00%, respectivamente), tendo indicado, ainda, a possibilidade de correlacionar os resultados obtidos nos ensaios físicos, uma vez que as equações de predição geradas demonstraram-se capazes de permitir que os parâmetros utilizados sejam estimados com considerável precisão. Além disso, observou-se que *shatter test* e *drum index* podem ser definidos como ensaios que manifestam as características individuais de cada matéria-prima utilizada nas amostras ensaiadas (propriedade aditiva). A caracterização química, por sua vez, apontou a amostra CVP-50 como a de melhor desempenho, caracterizada por baixo teor de cinzas (3,93%), alto teor de carbono fixo (90,91%) e teor de enxofre (0,71%) compatível com a referência. Assim, concluiu-se que a amostra CVP-50 apresentou o melhor desempenho (combinação entre as duas caracterizações), de maneira geral e, por isso, esta amostra possui maior potencial para ser utilizada sob a forma de *small* no alto-forno, tendo sido demonstrado pelos resultados a viabilidade técnica da substituição. Além disso, a utilização da carga termorreductora CVP-50 representa menor percentual de cinzas no alto-forno, o que ocasiona menor geração de escória e menor consumo de coque metalúrgico, levando à redução nos impactos financeiros e ambientais na rota integrada a coque.

Palavras-chave: carga termorreductora. *small coke*. GEE's. CO₂.

ABSTRACT

In order to ensure energy efficiency and productivity, countercurrent flow and the use of various forms of fuels are essential for the blast furnace. Among the usual fuels, small coke, loaded with the metallic charge, stands out for having as its main function the ability to accelerate the reduction reaction and, consequently, reduce costs and process time. However, due to its fossil origin, it has a direct link with the high CO₂ emission in the steel industry. In this context, the objective of this work was to develop a thermoreducing load capable of partially replacing small coke and, thus, reducing environmental and/or financial impacts. Thus, charcoal, green petroleum coke and anthracite were evaluated, from the physicochemical point of view, when loaded in the form of small in the blast furnace. The physical characterization highlighted the CV-50 and CV/CVP-50 samples, characterized by high drop strength (95.25% and 90.75%, respectively) and cold strength (96.30% and 94.00%, respectively), and also indicated the possibility of correlating the results obtained in the physical tests, since the prediction equations generated proved to be capable of allowing the parameters used to be estimated with considerable precision. In addition, it was observed that shatter test and drum index can be defined as tests that manifest the individual characteristics of each raw material used in the tested samples (additive property). The chemical characterization, in turn, indicated the CVP-50 sample as the best performance, characterized by low ash content (3.93%), high fixed carbon content (90.91%) and sulfur content (0.71%) compatible with the reference. Thus, it was concluded that the CVP-50 sample presented the best performance (combination between the two characterizations), in general and, therefore, this sample has greater potential to be used in the form of small in the blast furnace, having been demonstrated by the results the technical feasibility of the replacement. In addition, the use of the CVP-50 thermoreducing load represents a lower percentage of ash in the blast furnace, which causes lower slag generation and lower consumption of metallurgical coke, leading to a reduction in the financial and environmental impacts of the integrated coke route.

Keywords: thermoreducing load. small coke. GHG's. CO₂.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1 – Recebimento e preparação de carvão em usina siderúrgica a coque.....	20
Figura 3.2 – Bateria de fornos de coque (convencional).....	21
Figura 3.3 – Desenho esquemático de uma coqueria <i>heat recovery</i>	21
Figura 3.4 – Diagrama MOF – <i>Miyazu, Okuyama e Fukuyama</i>	22
Figura 3.5 – Processo de coqueificação mostrado esquematicamente num corte do forno carregado e o perfil de temperatura nesse momento da coqueificação.....	23
Figura 3.6 – Carro de apagamento.....	24
Figura 3.7 – Torre de extinção.....	24
Figura 3.8 – Processo de utilização de carvão mineral na produção de coque.....	24
Figura 3.9 – Criação de vazios no alto-forno.....	28
Figura 3.10 – As zonas em um alto-forno.....	32
Figura 3.11 – Permeabilidade na zona coesiva do alto-forno.....	34
Figura 3.12 – <i>Small coke</i>	35
Figura 3.13 – Coque metalúrgico.....	35
Figura 3.14 - Carvão vegetal granulado.....	38
Figura 3.15 – CVP após recebimento no pátio.....	39
Figura 3.16 – Carvão antracito.....	40
Figura 3.17 – a) <i>small coke</i> sem adição; b) <i>small coke</i> com 3% de cal virgem; c) <i>small coke</i> com 3% de <i>pellet feed</i>	41
Figura 4.1 – Fluxograma geral do estudo.....	43

Figura 4.2 – Amostras: a) SC; b) CV; c) CVP; d) AN; e) CV/CVP; f) CV/AN; g) CVP/AN.....	44
Figura 4.3 – a) moinho de bolas; b) Corpos moedores.....	47
Figura 4.4 – Máquina universal de ensaios.....	48
Figura 5.1 – Resultados do <i>shatter test</i>	51
Figura 5.2 – Resultados do <i>drum index</i>	53
Figura 5.3 – Resultados do ensaio de resistência à compressão (N).....	55
Figura 5.4 – Resultados do ensaio de resistência à compressão (MPa).....	55
Figura 5.5 – Resultados da análise de enxofre x Gandra, Reis e Fernandes (2015).....	59
Figura 5.6 – Resultados da análise de enxofre x Carvalhido (2019).....	59
Figura 5.7 – Curva <i>shatter test</i> x DI > 8.....	62
Figura 5.8 – Curva <i>shatter test</i> x resistência à compressão.....	63
Figura 5.9 – Curva DI > 8 x resistência à compressão.....	63
Figura 5.10 – % de carvão vegetal x resistência.....	64
Figura 5.11 – % de CVP x resistência.....	65
Figura 5.12 – % de antracito x resistência.....	65
Figura 5.13 – Verificação de propriedade aditiva.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Composição química da madeira e dos combustíveis fósseis sólidos....	19
Tabela 3.2 – Testes de tamboramento.....	25
Tabela 3.3 – Estado da arte na utilização de <i>small coke</i>	29
Quadro 3.1 – Comparação entre possíveis alternativas ao <i>small coke</i> no AF.....	42
Tabela 4.1 – Composição das amostras.....	44
Quadro 4.1 - Resumo dos ensaios realizados.....	45
Tabela 5.1 – Resultados da análise imediata das amostras comparados a trabalhos semelhantes.....	57
Tabela 5.2 – Resumo das curvas plotadas.....	62
Tabela 5.3 – Pontos plotados em cada curva.....	64
Tabela 5.4 – Resistências individuais dos combustíveis.....	66
Tabela 5.5 – Resistências medidas x resistências estimadas.....	66
Quadro 5.1 – Comparação entre as cargas termorreduzidas avaliadas neste trabalho.....	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AF – Alto-forno

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

Ca – Cálcio

C – Carbono

CRI – Índice de reatividade do coque

CSR – Resistência do coque após reação

CH₄ - Metano

CO – Monóxido de carbono

CO₂ – Dióxido de carbono

CVP – Coque verde de petróleo

DI - *Drum Index*

Fe – Ferro

GEE's – Gases de Efeito Estufa

H – Hidrogênio

ln – Logaritmo natural

MDL – Mecanismo de Desenvolvimento Limpo

Mn - Manganês

N – Nitrogênio

NH₃ - Amônia

O – Oxigênio

P - Fósforo

PTG – Pré-tratamento de gusa

S – Enxofre

Si – Silício

LISTA DE SÍMBOLOS

mm	milímetros
kg	quilograma
%	por cento
<	menor que
°C	graus celsius
MJ/Nm ³	Megajoule por normal metro cúbico
=	igual a
-	menos
>	maior que
+	mais
kcal/mol	quilocal por mol
ΔH_r	variação de entalpia da reação
kcal/kg	quilocal por quilograma
Cal/g	cal por grama
kg/t	quilograma por tonelada
kgf	quilograma-força
μm	micrômetros
mm/min	milímetro por minuto

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
2. OBJETIVOS.....	17
2.1 Objetivo geral.....	17
2.2 Objetivos específicos.....	17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
3.1 Carvão mineral.....	18
3.1.1 Origem e formação.....	18
3.2 Coqueria.....	19
3.2.1 Visão geral.....	19
3.2.2 Coqueificação.....	22
3.2.3 Caracterização físico-química metalúrgica do coque.....	25
3.3 Alto-forno a coque.....	28
3.3.1 Visão geral.....	28
3.3.2 Funções do coque no alto-forno.....	32
3.3.3 Funções do small coke no alto-forno.....	34
3.4 Alternativas ao small coke no alto-forno.....	36
3.4.1 Carvão vegetal.....	37
3.4.2 Coque verde de petróleo.....	38
3.4.3 Antracito.....	40
3.4.4 Ferro-coque.....	41
3.4.5 Comparação entre alternativas ao small coke no alto-forno.....	42
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	43
4.1 Obtenção e preparação das matérias-primas.....	43
4.2 Caracterização do small coke e cargas termorreduzidoras.....	45
4.2.1 Caracterização física.....	45
4.2.1.1 Shatter Test.....	46
4.2.1.2 Drum Index.....	46
4.2.1.3 Resistência à compressão.....	47

4.2.2	Caracterização química.....	48
4.2.2.1	Análise imediata.....	48
4.2.2.2	Análise de enxofre.....	50
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	51
5.1	Caracterização física.....	51
5.1.1	Shatter test.....	51
5.1.2	Drum index.....	52
5.1.3	Resistência à compressão.....	54
5.2	Caracterização química.....	56
5.2.1	Análise imediata.....	56
5.2.2	Análise de enxofre.....	59
5.3	Visão geral.....	61
5.3.1	Correlações entre os ensaios físicos.....	61
5.3.2	Verificação de propriedade aditiva nos ensaios físicos.....	64
5.3.3	Comparação entre as cargas termorreduzidas avaliadas.....	67
6.	CONCLUSÕES.....	69
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	71
	REFERÊNCIAS.....	72

1. INTRODUÇÃO

A siderurgia, assim como outros segmentos industriais, apresenta uma alta demanda por combustíveis, a fim de se gerar a energia necessária para que as temperaturas requeridas no processo sejam alcançadas. Dentre eles, o carvão mineral destaca-se por ser o principal (CARVALHO; MESQUITA; MELO, 2016), devido à sua grande importância e contribuição no alto-forno (AF). Seja na forma de finos, para injeção via ventaneiras (CAVALIERO; JANNUZZI, 1999); seja na forma de coque, para carregamento pelo topo do forno (MACHADO, 2011).

O coque metalúrgico, proveniente do carvão betuminoso, é produto de um processo denominado coqueificação, no qual uma mistura de carvões é destilada por pirólise em ausência de ar, obtendo-se, ao final do processo, um material sólido, resistente, poroso e infusível (SILVA, 2016). Devido a essas características e sua granulometria média entre 45 e 55 mm, pode-se afirmar que este exerce funções extremamente importantes e determinantes durante a produção do ferro gusa (GEERDES; TOXOPEUS; VILET, 2004). Segundo Viana Filho (2007), além de fornecer a energia necessária para a fusão da carga metálica, o coque metalúrgico atua como agente redutor e carburante, através da geração do gás redutor monóxido de carbono (CO) e do fornecimento de carbono (C) ao gusa, respectivamente. O autor ressalta, ainda, as suas funções físicas, por meio da sustentação do peso da coluna de carga metálica e da geração de janelas de coque, que são espaços vazios que favorecem a passagem dos gases em meio à carga fundida, favorecendo, também, a permeabilidade do leito.

O *small coke*, por sua vez, apresenta granulometria entre 18 e 30 mm (GUPTA, 2016) e é carregado junto à carga metálica. Com isso, desempenha todas as funções descritas para o coque metalúrgico e, conforme Carvalhido (2019), demonstra-se capaz de melhorar a redução da carga, sendo esta definida como a sua principal função no AF. Além disso, possui o papel de prover uma certa permeabilidade na zona coesiva (apenas coque e *small coke* estão sólidos nesta região), uma vez que, segundo Song (2013), apenas 40% do *small coke* carregado é consumido e, por isso, este é capaz de auxiliar o coque metalúrgico na zona de coque ativo.

Entretanto, devido à sua origem fóssil, o carvão mineral traz consigo uma considerável pegada ambiental, caracterizando a rota integrada a coque como responsável por emitir entre 1.510 e 1.950 kg de dióxido de carbono (CO₂) por tonelada de aço bruto (CGEE, 2010). Assim, contribui diretamente com o efeito estufa e mudanças climáticas. Além disso, como todo o carvão mineral utilizado no Brasil é proveniente de importação (BARBIERI, 2013), problemas adicionais como armazenamento, transporte e manuseio são gerados.

Nesse contexto, alguns materiais, por questões de disponibilidade e características gerais (tanto do combustível, quanto do seu processo de obtenção), são apontados como potenciais cargas termorreduzidoras, sendo o carvão vegetal, o coque verde de petróleo (CVP) e o antracito os de maior destaque. Dessa forma, neste trabalho, tais combustíveis foram avaliados, do ponto de vista físico-químico, a fim de se comparar (com o *small coke*) e definir o de melhor desempenho sob a forma de *small* no AF. Para tanto, as amostras foram submetidas à análise imediata e de enxofre, *shatter test* e *drum index* (DI) adaptados, além de testes de resistência à compressão.

Como principais resultados, obteve-se, para a caracterização física, um melhor desempenho associado às amostras CV-50 e CV/CVP-50, destacando-se por alta resistência a frio e à queda, o que foi relacionado à presença de carvão vegetal nas amostras. Notou-se, para tal caracterização, a possibilidade de correlacionar os resultados obtidos nos ensaios físicos, uma vez que as equações de predição geradas demonstraram-se capazes de permitir que os parâmetros utilizados sejam estimados com considerável precisão. Além disso, observou-se que *shatter test* e *drum index* podem ser definidos como ensaios que manifestam as características individuais de cada matéria-prima utilizada nas amostras (confirmou-se a ocorrência de propriedade aditiva). A caracterização química, por sua vez, apontou a amostra CVP-50 como a de melhor desempenho, caracterizando-se por baixo teor de cinzas, alto teor de carbono fixo e teor de enxofre compatível com a referência utilizada. Assim, concluiu-se que, de maneira geral, a amostra CVP-50 foi a responsável por apresentar o melhor desempenho (combinação entre as duas caracterizações), tendo sido demonstrado pelos resultados a viabilidade técnica da substituição (matéria volátil deve ser avaliada, contudo), bem como a possibilidade de redução nos impactos ambientais e financeiros na rota integrada a coque.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Desenvolver uma carga termorreductora para uso como complemento ao *small coke* no alto-forno de uma usina integrada a coque. Busca-se, com isso, reduzir a emissão de gases de efeito estufa (GEE's), custos e/ou tempo de processo.

2.2 Objetivos específicos

- a) Propor misturas envolvendo *small coke*, carvão vegetal, coque verde de petróleo e antracito;
- b) Avaliar as propriedades termoquímicas do *small coke*;
- c) Realizar a caracterização física das amostras por meio de ensaios de resistência à compressão, *shatter test* e *drum index*;
- d) Realizar a caracterização química das amostras por meio de análise imediata e análise de enxofre;
- e) Analisar os resultados a fim de se definir a carga termorreductora de melhor desempenho;
- f) Julgar a possibilidade de substituição do *small coke* pela carga termorreductora de melhor desempenho.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Carvão mineral

3.1.1 Origem e formação

Segundo Silva (2016), o carvão mineral é o resultado da ação do tempo, da temperatura e da pressão, em ambiente anaeróbico, sobre matérias orgânicas, que sofrem ataques biológicos. Ainda segundo o autor, esses ataques facilitam a liberação de gases como CO₂, vapor de água, amônia (NH₃) e metano (CH₄), levando à concentração de carbono. Dessa forma, com o passar do tempo, obtém-se estágios distintos do carvão mineral.

Ainda que não exista comprovação quanto à transformação de um estágio do carvão mineral em outro, (devido ao longo tempo de formação - milhões de anos), estes podem ser considerados pertencentes a uma série de combustíveis fósseis sólidos, que se inicia na turfa e termina no antracito (VIANA FILHO, 2007). Conforme Corá (2006), os estágios de carbonificação (*rank*) são apresentados pela seguinte relação: turfa < sapropelito < linhito < carvão sub-betuminoso < carvão betuminoso < antracito. Da relação, tem-se que a turfa é o primeiro estágio de carbonificação, ou seja, o de menor percentual de carbono fixo. De maneira análoga, tem-se que o antracito é o estágio de maior grau de carbonificação (maior percentual de carbono fixo).

De acordo com Viana Filho (2007), a formação de tais estágios depende da intensidade de pressão e temperatura e de quanto tempo o material vegetal for submetido a essas condições. Dentre os fatores que influenciam a formação dos estágios do carvão mineral, a temperatura é o de maior relevância, uma vez que a cada 100 metros de profundidade há, em média, um acréscimo de 3 a 5 °C na temperatura. Com isso, as camadas de carvão podem ter atingido 200 °C, temperatura suficiente para formação de antracito. Por outro lado, ainda conforme o autor, o tempo pode ser considerado o aspecto de menor relevância, uma vez que podem ser encontrados diferentes estágios de carvão mineral num mesmo período geológico.

A Tabela 3.1 apresenta a concentração de carbono na madeira e em alguns destes estágios. A partir desta, observa-se que à medida que o teor de carbono

umenta, ocorre a diminuição do teor de oxigênio (O) e hidrogênio (H). Tal efeito é uma consequência do processo de carbonificação (enriquecimento em carbono).

Tabela 3.1 – Composição química da madeira e dos combustíveis fósseis sólidos

Combustível	Madeira	Turfa	Linhito	Carvão Betuminoso	Antracito	Grafite
Composição						
Carbono (%)	44 – 52	50 – 68	55 – 75	74 – 96	90 - 96	100
Oxigênio (%)	43 – 42	35 – 28	28 – 19	20 – 3	3 – 0	0
Hidrogênio (%)	5 – 6	7 - 5	6 – 9	5 – 1	3 – 1	0

Fonte: Viana Filho (2007)

Quanto à disponibilidade, o carvão mineral não possui uma distribuição homogênea de ocorrência pelo mundo, contudo pode ser encontrado em todos os continentes (SILVA, 2016). De acordo com Castro (2016), as principais reservas de carvão mineral que apresentam qualidade para uso e viabilidade econômica para exploração situam-se em países como Estados Unidos, China, Rússia, Índia e África do Sul. Segundo Viana Filho (2007), a formação de carvão no hemisfério norte começou a ocorrer no período carbonífero, o que explica a predominância deste combustível em tal hemisfério, uma vez que o hemisfério sul estava coberto de gelo e sem florestas neste período. Sendo assim, o carvão presente na porção sul do mundo, de maneira geral, não apresenta qualidade para uso siderúrgico.

3.2 Coqueria

3.2.1 Visão geral

A coqueria é o setor de uma usina siderúrgica integrada responsável pela transformação de uma mistura adequada de carvões em coque. Tal produto é de fundamental importância na fabricação do ferro gusa e sua presença no AF é indispensável.

A fim de se compreender o fluxograma geral de produção e destinação do coque, a Figura 3.1 ilustra as etapas de recebimento e preparação de carvão mineral em uma usina siderúrgica a coque, desde a formação de pilhas para estocagem, até à entrega do coque ao alto forno.

Figura 3.1 – Recebimento e preparação de carvão em usina siderúrgica a coque



Fonte: Silva (2016)

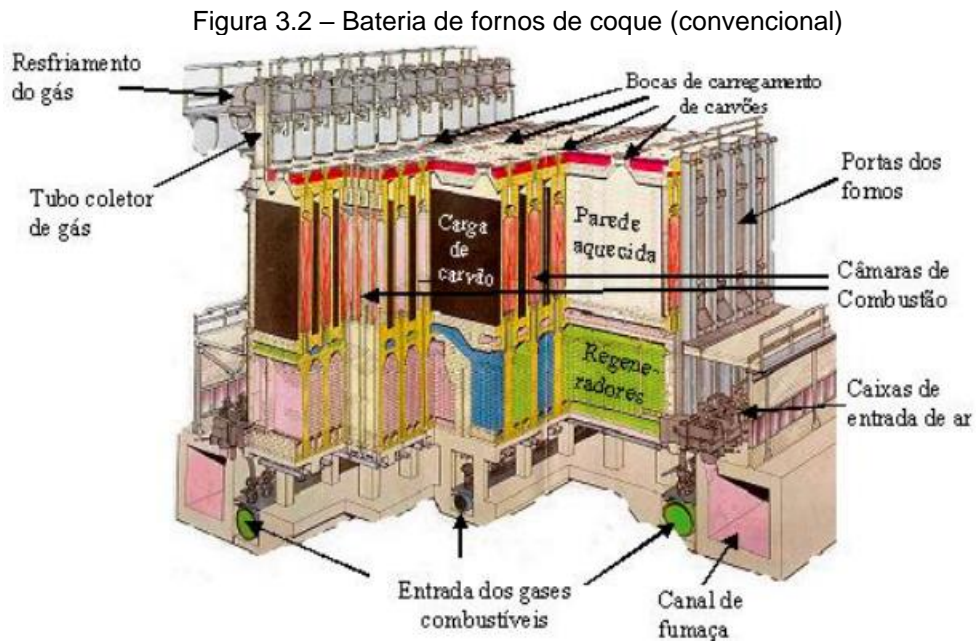
A partir da Figura 3.1 é possível observar que etapas de transporte, estocagem e manuseio apresentam-se como de extrema importância para o processo. Este controle é necessário para a execução de cálculos logísticos relacionados à compra e tempo de recebimento do carvão mineral, que conforme Barbieri (2013), para uso nacional, provém 100% de importação. Isso porque o carvão mineral disponível no Brasil apresenta um certo grau de impurezas, cinzas e enxofre, o que inviabiliza o seu uso industrial (BRITO, 1990).

Segundo Fernandes (2019), para a produção em grande escala, há, essencialmente, dois tipos de coquerias:

- a) coqueria convencional (*by products*): além de produzir o coque, este tipo de coqueria gera importantes co-produtos. Segundo Mourão *et al.* (2007), os hidrocarbonetos gerados na destilação do carvão constituem o chamado gás de coqueria, conhecido por apresentar um alto poder calorífico (cerca de 18 MJ/Nm^3), uma vez que é composto principalmente por CH_4 , H_2 e CO . Ainda conforme o autor, tal combustível é utilizado em outras áreas da usina como fonte de energia e, desse modo, pode ser entendido como uma maneira de complementar o balanço energético;
- b) coqueria *heat recovery*: neste tipo de coqueria há a recuperação de calor, mas os gases não são reaproveitados. Conforme Silva (2008), nestas

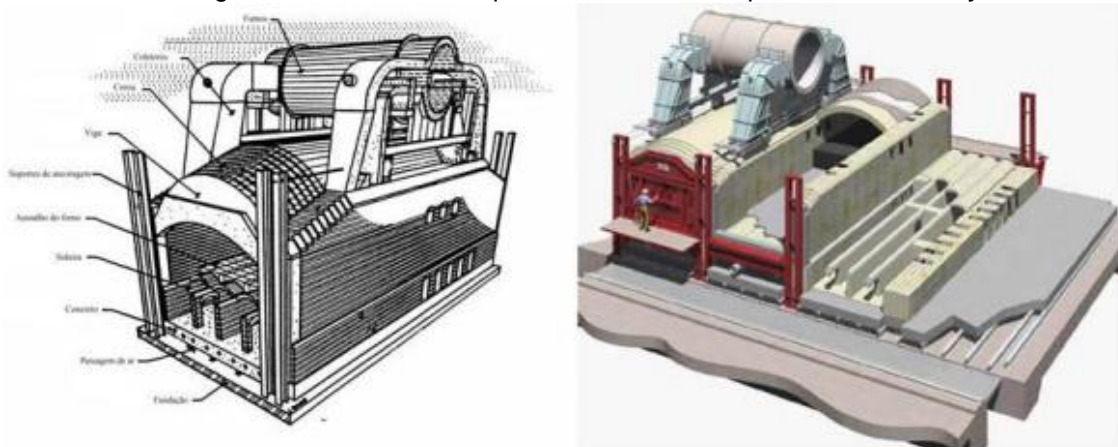
plantas, o gás gerado é oxidado acima do coque/carvão, que fornece e consome a energia necessária para que a coqueificação possa ocorrer.

Os dois tipos de coqueiras descritos estão representados nas Figuras 3.2 e 3.3, respectivamente, de forma esquemática, a fim de se ilustrar suas principais características físicas.



Fonte: Costa (2008)

Figura 3.3 – Desenho esquemático de uma coqueira *heat recovery*



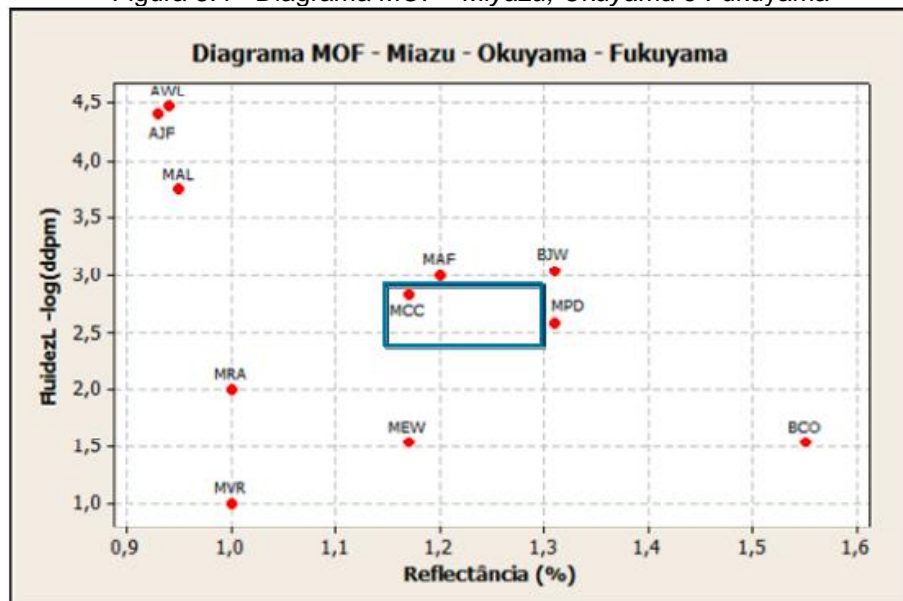
Fonte: Silva (2008) *apud* Valia (2008)

3.2.2 Coqueificação

O carvão betuminoso faz parte do penúltimo grau de carbonificação do carvão mineral e, por isso, apresenta entre 74 e 96% de carbono fixo (VIANA FILHO, 2007). Sendo assim, possui carbono suficiente para ser utilizado como combustível siderúrgico. Além disso, é o único estágio do carvão mineral que possui propriedades coqueificantes, ou seja, é o único que pode se tornar coque (SILVA, 2011). Para tanto, porém, deve ser submetido a um processo denominado coqueificação, no qual uma mistura de carvões é destilada por pirólise em ausência de ar, obtendo-se, ao final do processo, um material sólido, resistente, poroso e infusível, denominado coque (SILVA, 2016).

Esta mistura de carvões, conforme Alves (2017), visa atingir dois objetivos: qualidade e baixo custo. Ainda segundo o autor, uma das formas mais comuns de se adequá-la é por meio da janela de *Miyazu* (diagrama MOF), que relaciona a fluidez do carvão com a sua refletância. Segundo Silva (2011), a janela (retângulo) observada no diagrama representa um ponto ótimo, ou seja, se a mistura de carvões estiver compreendida nesse intervalo, o coque formado será de boa qualidade. Para ilustrar o exposto, um exemplo de diagrama MOF, para 11 carvões típicos, é apresentado na Figura 3.4.

Figura 3.4 - Diagrama MOF - *Miyazu*, *Okuyama* e *Fukuyama*



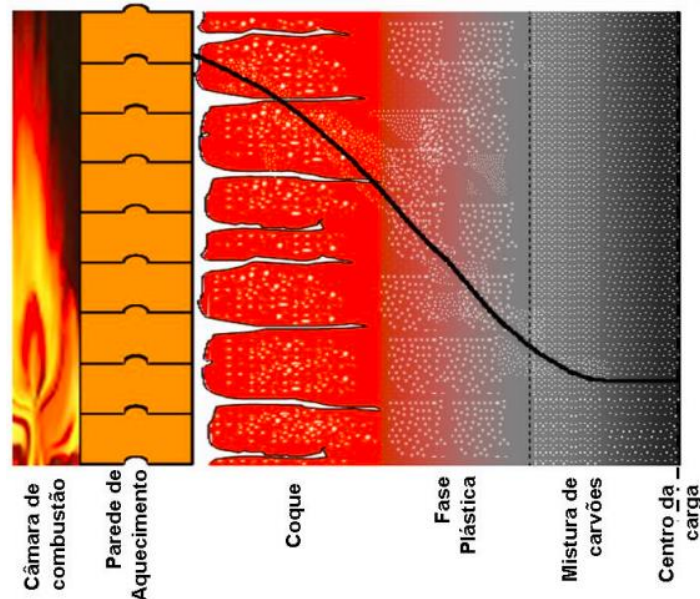
Fonte: Silva (2011)

Conforme Silva (2008), a transformação de carvão em coque pode ser definida como a soma de dois fenômenos que ocorrem parcialmente:

- a) Primeiro estágio de coqueificação: Tal fase ocorre em temperaturas entre 350 e 550 °C e apresenta como característica principal o desprendimento de hidrocarbonetos e de todo o alcatrão;
- b) Segundo estágio de coqueificação: Tal fase ocorre entre 550 e 900 °C. Sendo esta a fase de transformação do semicoque em coque, não apresenta desprendimento de alcatrão e é caracterizada por conter muito hidrogênio no gás.

A Figura 3.5 ilustra o processo de coqueificação, na qual é possível observar o perfil de temperatura e as principais etapas do processo, além dos poros e fissuras, destinados à passagem de gases e transferência de calor por radiação (COSTA, 2008).

Figura 3.5 – Processo de coqueificação mostrado esquematicamente num corte do forno carregado e o perfil de temperatura nesse momento da coqueificação



Fonte: Costa (2008)

De acordo com Alves (2016), ao final do processo de coqueificação, o coque sai incandescente dos fornos de bateria de coque e logo é transferido para a etapa de extinção, que tem a função de apagá-lo, tornando sua temperatura inferior a 180°C. Ainda segundo o autor, tal etapa pode ser a seco ou a úmido: extinção a úmido

utiliza água para realizar o resfriamento; extinção a seco utiliza um fluxo gasoso de nitrogênio para realizar o resfriamento.

As Figuras 3.6 e 3.7 ilustram o carro de apagamento e a torre de extinção, respectivamente, equipamentos fundamentais nesta etapa.

Figura 3.6 – Carro de apagamento



Fonte: Alves (2016)

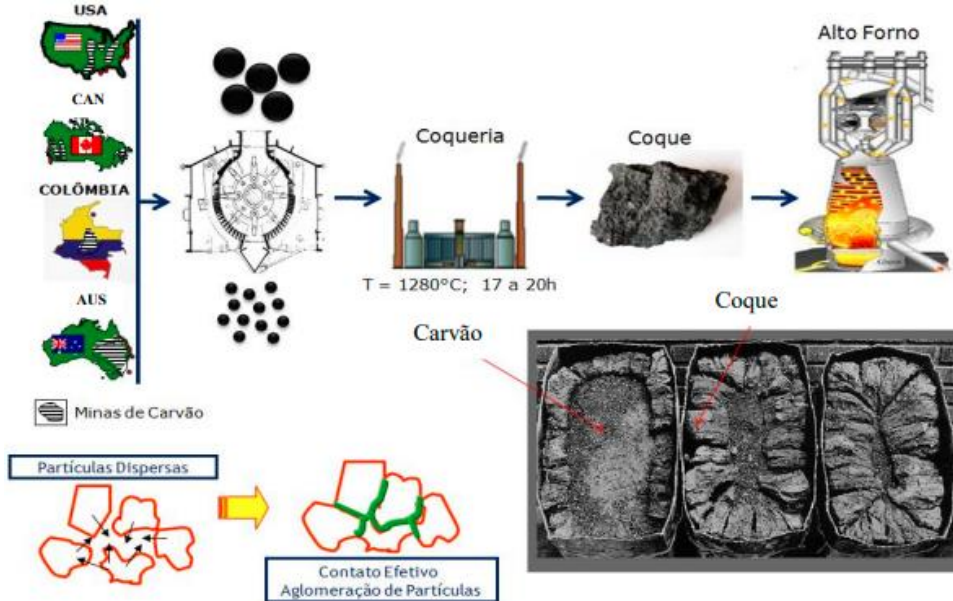
Figura 3.7 – Torre de extinção



Fonte: Alves (2016)

Após a extinção, conforme a Figura 3.8, o coque é transferido da coqueria para o AF. Antes, porém, deve ser levado a uma área de descarga, a fim de ser manuseado e adequado às especificações (ALVES, 2016). Na Figura 3.8 é possível observar, ainda, uma nova representação das etapas do processo de coqueificação.

Figura 3.8 - Processo de utilização de carvão mineral na produção do coque



Fonte: Silva (2016)

3.2.3 Caracterização físico-química metalúrgica do coque

A fim de se entregar qualidade e bons resultados no exercício de suas funções, coque e *small coke* devem ser submetidos a testes, que visam avaliar suas características físicas, químicas e metalúrgicas. Silva (2011) define, em seu trabalho, alguns parâmetros de qualidade do coque:

a) resistência de coque: tal parâmetro é definido como a habilidade apresentada pelo coque de suportar solicitações mecânicas (impacto e/ou abrasão) quando em um tambor rotativo. Denominado teste de tamboramento, este consiste em adicionar o coque em um tambor padronizado e aplicar uma quantidade fixa de revoluções. Ao final do teste, para catalogar o resultado, pode ser considerado a geração de finos ou a quantidade de coques de maior granulometria que resistiram ao processo. A Tabela 3.2 apresenta parâmetros do teste de tamboramento segundo algumas normas.

Tabela 3.2 – Testes de tamboramento

Tambor	MICUM	IRSID	JIS	ASTM
Norma	M03-046	M03-046	K2151	D294-64
Granulometria do Coque (mm)	+60	+20	+25	51-76
Peso da amostra (kg)	50	50	10	10
Dimensões do tambor (m)	1,0 x 1,0	1,0 x 1,0	1,5 x 1,5	0914 x 0457
Velocidade de rotação (rpm)	25	25	15	24
Total de revoluções	100	500	30 ou 150	1400
Peneiras (mm)	60, 40, 10	40, 20, 10	50, 25, 15	25, 6
Furo das peneiras	Redondo	Redondo	Quadrado	Quadrado
Símbolo dos índices	M40 M10	I ₄₀ I ₂₀ e I ₁₀	DI 15-30 DI 15-150	Estabilidade (+25mm) Dureza (+6mm)

Fonte: Adaptado de Silva (2008)

Os símbolos M10, I20 e I10 são obtidos a partir da consideração de finos gerados, e se relacionam com a resistência à abrasão; os símbolos M40, I40, DI 15-30, DI 15-150 e estabilidade ASTM são obtidos a partir da consideração de coques de maior granulometria remanescentes, e se relacionam com a resistência à abrasão e ao impacto (SILVA, 2008);

b) Reatividade de coque ao CO₂ e resistência de coque pós reação: podendo ser definidos como parâmetros complementares, conforme Geerdes, Toxopeus e Vilet (2004), um coque metalúrgico que apresenta um maior valor de índice de resistência do coque após reação (CSR) combinado com um menor valor de índice de reatividade do coque (CRI) pode ser entendido como propício para o AF, uma vez que estes são indicativos de boa resistência mecânica na parte inferior do forno.

Tais parâmetros podem ser determinados através da introdução de uma amostra de 200 g (± 2 g) de coque seco e com granulometria entre 19 e 21 mm em um forno elétrico a 1100 °C. Esta amostra está contida em um reator (sob fluxo de N₂), que após ter sua temperatura interna estabilizada em 1100 °C, é submetido a um fluxo de CO₂ durante 120 min. Após o resfriamento do reator (até cerca de 40 °C), através da perda de peso sofrida pela amostra durante a reação de *Boudouard* ($C_{(s)} + CO_{2(g)} = 2CO_{(g)}$), é originado o CRI (equação 3.1).

$$CRI = \frac{100 \times (\text{Peso inicial} - \text{Peso pós reação})}{\text{Peso inicial}} \quad (3.1)$$

O coque que resistiu aos ataques de CO₂ durante a reação são adicionados a um tambor do tipo I, que será submetido a 600 voltas (20 rpm). Após esta etapa, através da quantidade retida na peneira de 10 mm, é originado o CSR (equação 3.2).

$$CSR = \frac{100 \times (\text{Peso da fração} > 10 \text{ mm pós tamboramento})}{\text{Peso pós reação}} \quad (3.2)$$

Em relação aos testes de resistência, é importante ressaltar que devido à realização em temperatura ambiente, estes não levam em consideração outros mecanismos de degradação que afetam o coque no AF, como os de natureza termoquímica, que favorecem a perda de massa e diminuição da integridade estrutural do coque;

c) umidade: sendo este um aspecto ligado à extinção do coque e não às suas propriedades, apresenta uma certa relação com a granulometria, de modo que quanto maior a partícula, menor a umidade. Para uma boa sequência do processo de produção do aço, é importante que este parâmetro seja o menor possível e esteja bem controlado, a fim de se evitar a geração de pós durante o manuseio e a consequente entrada de finos no AF. Dessa forma, a extinção a seco pode ser entendida como uma maneira de contornar esta situação;

d) cinzas: tal parâmetro, por representar um material inerte dentro do forno, é responsável por consumir calor do sistema (aquecimento até a temperatura de escorificação). Além disso, afeta o volume de escória gerada e, por consequência, todos os dados de eficiência do AF. Dessa forma, coques com maiores teores de cinzas devem ser evitados, a fim de se buscar otimização do processo;

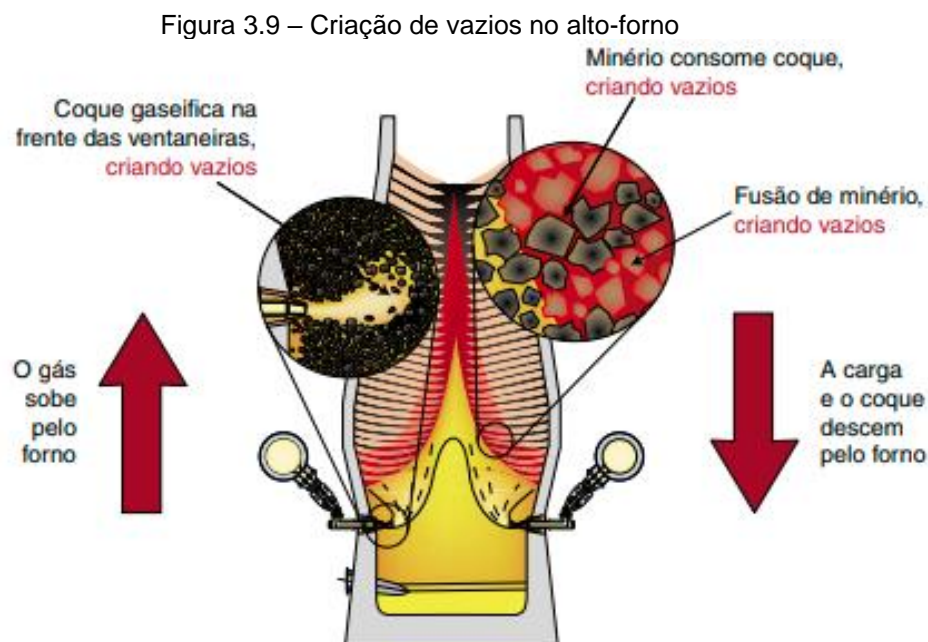
e) matéria volátil: normalmente, coques produzidos em fornos horizontais de coqueria são constituídos de 1% de voláteis, aproximadamente. Estas matérias voláteis são compostas essencialmente por oxigênio e dióxido de carbono, gases que foram adsorvidos durante o processo de coqueificação;

f) enxofre: sabe-se que o enxofre é um importante deletério do aço, logo, sua presença no gusa deve ser controlada. Para tanto, é primordial que sua entrada, que se dá através do coque, principalmente, seja limitada. Isso porque um gusa com maior participação de enxofre necessita de uma maior quantidade de aditivos e/ou dessulfuração adicional, o que resulta em elevação de custos. A exemplo da presença de cinzas, as consequências de um maior teor de enxofre no AF devem ser avaliadas de maneira particular.

3.3 Alto-forno a coque

3.3.1 Visão geral

De acordo com Geerdes, Toxopeus e Vilet (2004), o AF é um reator que atua em contracorrente, de modo a ter-se líquidos e sólidos descendentes, ao mesmo tempo em que gases estão ascendendo. Ainda conforme os autores, nesse processo há uma transferência de calor do gás para a carga e uma transferência de oxigênio da carga para o gás. Sendo assim, para um bom funcionamento do forno, além da existência de caminhos para a passagem desses gases, é importante que a geração de finos seja mitigada (CASTRO, 2006). A Figura 3.9 ilustra como a eficiência do AF é influenciada pelo fluxo em contracorrente.



Fonte: Adaptado de Geerdes; Toxopeus; Vilet (2004)

Buscando-se atingir boas condições de trabalho, o carregamento de materiais sólidos no AF é feito de modo a ter-se camadas de minério independentes e alternadas com camadas de coque (GEERDES; TOXOPEUS; VILET, 2004). Com o mesmo propósito, além da injeção de cerca de 170 kg de fonte carbonosa (por tonelada de gusa) via ventaneiras (ASSIS, 2008), o que favorece a cinética da redução, há a introdução de *small coke* junto à carga metálica, o que também acelera

o processo de redução (CARVALHIDO, 2019) e contribui, ainda, com a diminuição do uso de coque metalúrgico, impactando nos custos.

De acordo com Gavel (2017), devido a variações (de região para região) nas características da carga ferrosa e do coque, bem como a variações na filosofia de operação do AF (de empresa para empresa), a proporção ideal de utilização de *small coke* (em relação ao coque metalúrgico) não é bem definida. Dessa forma, tal valor costuma variar entre 6 e 140 kg por tonelada de gusa, conforme apresentado na Tabela 3.3, que ilustra o estado da arte na utilização de *small coke* em altos-fornos pelo mundo.

Tabela 3.3 – Estado da arte na utilização de *small coke*

Região	Empresa	Alto-forno/local	Consumo de <i>small coke</i> (kg/t gusa)	Consumo de coque metalúrgico (kg/t gusa)
Bélgica	ArcelorMittal	Gent	66,5	262
China	Baosteel Magang	Xangai	26,0	300
		---	83,0	278
França	ArcelorMittal	Dunkirk	47,8	266
Finlândia	Ruukki	Raahe	39,0	319
Alemanha	Thyssenkrupp HKM	Hamborn	70,9	262
		S2/Schwelgen	53,5	290
		Duisburg	66,8	289
Índia	Neco	Raipur	40-60	---
Japão	Kobe Steel	Kakogawa	17-30	---
Holanda	Tata Steel	BF6/IJmuiden	35,3	246
		BF7/IJmuiden	32,1	271
América do Norte	---	---	30,0	380
Rússia	---	---	6-24	---
Ucrânia	Konstantin-vovka	Donetsk	120-140	880
Reino Unido	Tata Steel	Scunthorpe	52,0	276

Fonte: Adaptado de Gavel (2017)

No contexto de uma usina siderúrgica integrada, o AF assume um papel de extrema importância, uma vez que este possui a função de reduzir a carga metálica carregada, fornecendo, assim, o ferro gusa dentro das especificações exigidas para as etapas subsequentes do processo (CASTRO, 2006). Segundo Mourão *et al.*, (2007), para uma boa continuidade da rota, é importante que o gusa seja submetido a processos de refino, conhecidos como pré-tratamento do gusa (PTG). Tais processos, denominados dessiliciação, desfosforação e dessulfuração, têm o objetivo de retirar silício (Si), fósforo (P) e enxofre (S), respectivamente. Após essa etapa,

ainda conforme os autores, é esperado que o ferro gusa apresente, em sua composição, entre 92 e 95% de ferro (Fe), entre 3,5 e 5% de C, bem como alguns elementos residuais, como Si e manganês (Mn), por exemplo.

Além de produzir o ferro gusa dentro das especificações de composição química e a 1.500 °C, o AF é responsável, ainda, pela produção de escória (entre 200 e 350 kg por tonelada de gusa) e gás de alto-forno (entre 1.750 e 2.300 Nm³ por tonelada de gusa) (MOURÃO *et al.*, 2007).

Para entender o funcionamento de tal reator, é importante conhecer o funcionamento e objetivos principais de suas zonas internas e externas. De acordo com Mourão *et al.*, 2007, o AF pode ser dividido em:

a) zonas internas,

- zona granular: zona na qual o minério e o coque mantêm sua disposição original, conforme foram carregados. Devido à existência de somente fase sólida e gasosa, a redução dos óxidos, ocorre no estado sólido,

- zona coesiva: zona na qual o coque e uma camada de minério semifundido (camada coesiva) aparecem de maneira alternada. Dessa forma, o fluxo gasoso através da camada de minério é muito dificultado e, por isso, a camada de coque é imprescindível nessa região do forno,

- zona de gotejamento: zona na qual o coque permanece sólido e, entre seus interstícios, permite o gotejamento de gusa e escória líquidos (em direção ao cadinho). Durante este gotejamento ocorrem reações responsáveis por incorporar elementos de liga ao gusa e, assim, sua composição química esperada é atingida. Tal zona pode ser dividida em duas subzonas: coque ativo e “homem morto”. Conforme Geerdes, Toxopeus e Vilet (2004), a subzona denominada coque ativo representa a área na qual ocorre somente a existência de coque sólido, em meio a gusa e escória líquidos; e a subzona “homem morto” representa a pilha de coque sólido formada no cadinho,

- zona de combustão: zona na qual a alta energia cinética do sopro de ar quente (via ventaneiras) é responsável por criar uma área parcialmente vazia. Nesta região, partículas de coque circulantes são queimadas, gerando-se a energia e o gás redutor,

- cadinho: zona na qual há a presença de coque granulado, que permite a passagem de gusa e escória entre seus interstícios. Logo após, devido à diferença de densidade, escória e gusa são separados, formando uma camada sobrenadante de escória, uma vez que esta possui menor densidade. Nesta zona do forno há, ainda, a ocorrência de algumas reações entre fases metálicas e escória, como a dessulfuração, por exemplo.;

b) zonas externas,

- goela: região cilíndrica, localizada na parte superior do AF, pela qual é feito o carregamento dos materiais sólidos (coque e minério). Nesta região, são posicionados sensores responsáveis por fazer a medição do nível e perfil da carga, medição da temperatura e indicação da composição dos gases gerados. Os equipamentos responsáveis pelo carregamento do forno também são posicionados nesta região,

- cuba: região que apresenta formato tronco-cônico e que pode ser descrita como a de maior volume do AF. Tal região possui o diâmetro inferior maior, uma vez que precisa comportar a expansão da carga, que ocorre em decorrência do aumento de temperatura naquela região. Além disso, esse aumento de diâmetro é importante para a descida da carga que, sendo suavizada, consegue impedir a formação de cascões nas paredes do forno,

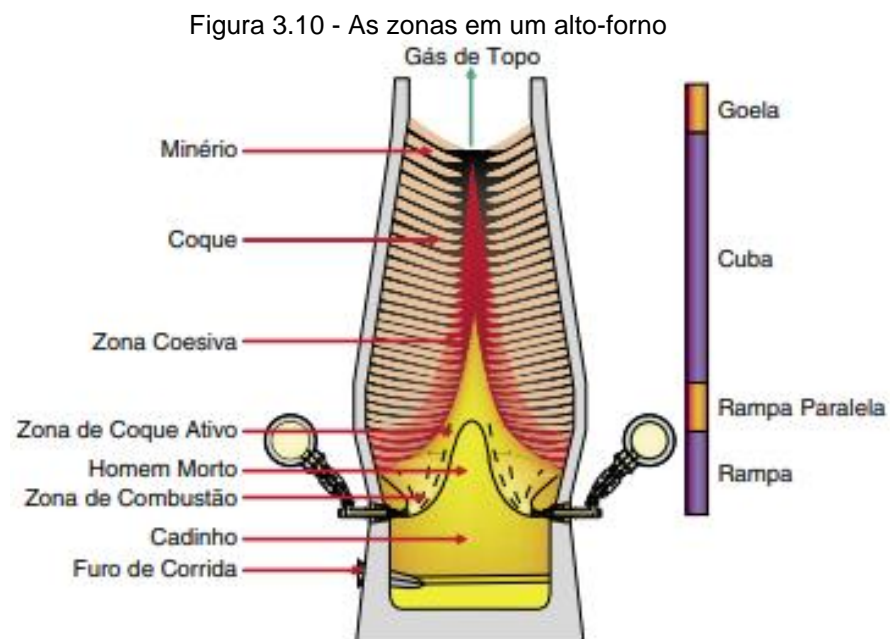
- ventre (rampa paralela): sendo uma região cilíndrica, localizada entre a cuba e a rampa, esta é uma das partes de maior solicitação do forno. Isso porque há uma forte oscilação da temperatura, que ocorre em decorrência da variação de posição da zona coesiva,

- rampa: região que apresenta formato tronco-cônico, sendo o diâmetro superior maior. Tal configuração ajuda na sustentação da carga e favorece o gotejamento de gusa e escória (líquidos) através dos interstícios do coque,

- cadinho: região cilíndrica, localizada na parte inferior do forno, na qual ficam armazenados gusa e escória (por tempo determinado). Em sua parte superior, localizam-se as chamadas ventaneiras, através das quais há a

injeção de finos de carbono e ar aquecido (pelos regeneradores). Em sua parte inferior, localizam-se os chamados furos de corrida, que são responsáveis pelo vazamento de gusa e escória.

A Figura 3.10 apresenta, de forma esquemática, as zonas internas e externas de um alto-forno. A partir desta, pode-se observar, ainda, uma indicação de como coque e minério são carregados (camadas alternadas).



Fonte: Adaptado de Geerdes; Toxopeus; Vilet (2004)

3.3.2 Funções do coque no alto-forno

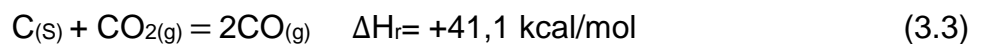
Como exposto, para conseguir entregar produtividade, o AF opera em um sistema no qual a carga metálica e o coque metalúrgico são dispostos em camadas alternadas (GEERDES; TOXOPEUS; VILET, 2004). Com isso, busca-se melhorar o desempenho do coque em suas atribuições e, conseqüentemente, reduzir tempo de processo e custos.

Durante a produção do ferro gusa, o coque metalúrgico apresenta-se como peça fundamental e determinante. Segundo Viana Filho (2007), além de fornecer a energia necessária à fusão da carga, o coque metalúrgico destaca-se por atuar como

agente redutor e carburante, através da geração do gás redutor CO e do fornecimento de C ao gusa, respectivamente. O autor ressalta, ainda, a sua contribuição física, através da sustentação do peso da coluna de carga metálica e da geração de janelas de coque, que são espaços vazios que favorecem a passagem dos gases em meio à carga fundida. Assim, contribui diretamente com o bom funcionamento do forno, uma vez que favorece a permeabilidade do leito.

Silva (2011) define as funções do coque no AF como sendo três principais:

a) Funções química e térmica: para que os objetivos do AF sejam alcançados, é necessário que algumas reações químicas ocorram em seu interior. Dentre elas, a reação de *Boudouard* (*solution loss*) (equação 3.3) é entendida como a mais importante (em termos térmicos), visto que esta é a principal responsável por fornecer o gás redutor CO ao processo.



Essa reação apresenta como principais características o seu caráter altamente endotérmico (alta absorção de energia), a ocorrência em larga escala e a alta energia de ativação. Devido a esta última característica, para o coque, tal reação só ocorre a temperaturas acima de 1.000 °C (dependente da reatividade do coque).

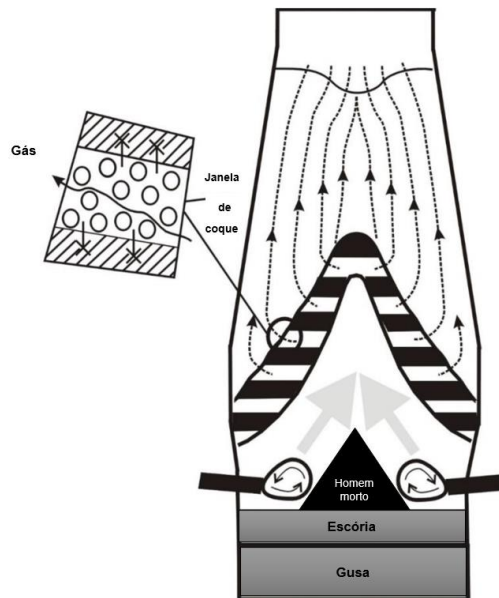
Além da reação de *Boudouard*, devido ao sopro de ar quente (1.100 °C), que encontra somente o coque sólido nesta região, algumas reações de combustão também ocorrem. Tais reações, apresentadas nas equações 3.4 e 3.5, são responsáveis por gerar todo o calor e gases necessários.



A partir do exposto, nota-se que as reações apresentadas nas equações 3.4 e 3.5 apresentam caráter exotérmico (liberação de energia);

b) Função física: sendo esta considerada a principal função do coque metalúrgico no AF, conforme a Figura 3.11, apresenta como característica fundamental o fornecimento de caminhos para a ascensão dos gases e descida dos líquidos. Além disso, em termos físicos, o coque é responsável por sustentar o peso da coluna de carga e promover a separação das camadas mais densas e menos permeáveis de sinter, fundentes, minério granulado e pelotas.

Figura 3.11 – Permeabilidade na zona coesiva do alto-forno



Fonte: Adaptado de Bernasowski; Klimczyk; Stachura (2021)

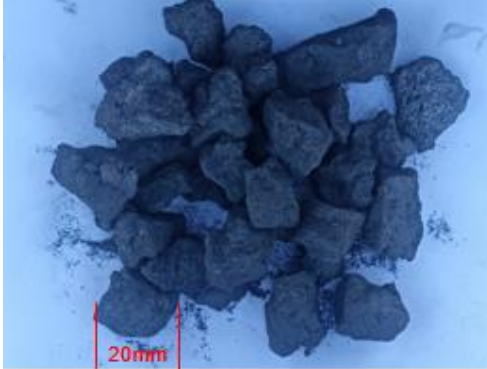
3.3.3 Funções do *small coke* no alto-forno

O *small coke*, definido como um material sólido, poroso, resistente e infusível, é obtido a partir da coqueificação do carvão mineral betuminoso, a exemplo do coque metalúrgico (SILVA, 2016). Ambos os combustíveis são essencialmente o mesmo material e, dessa forma, as principais diferenças entre eles são granulometria e forma de carregamento no alto-forno. Assim, o coque metalúrgico apresenta granulometria compreendida entre 45 e 55 mm e é carregado sob a forma de camadas independentes e alternadas com as camadas de minério (GEERDES; TOXOPEUS; VILET, 2004). O *small coke*, gerado naturalmente no processo e classificado no peneiramento do coque produzido, apresenta granulometria compreendida entre 18 e 30 mm (GUPTA, 2016) e é carregado junto à carga metálica.

Devido às diferenças apontadas, as principais funções exercidas por *small coke* (Figura 3.12) e coque metalúrgico (Figura 3.13) no AF são diferentes, ainda que

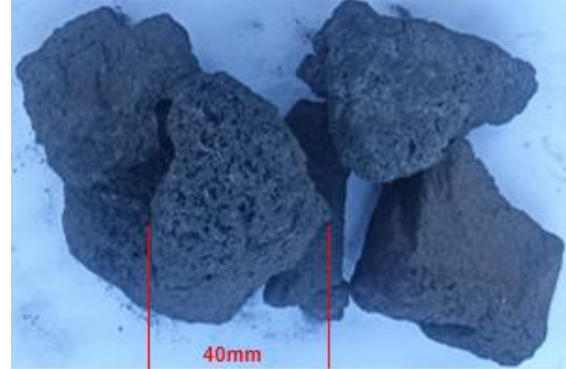
algumas possam ser comuns a ambos. Como exemplo de funções compartilhadas, cita-se a capacidade de prover carbono ao gusa e gás redutor ao sistema, além da permeabilidade, mesmo que as janelas de coque formadas pelo *small coke* sejam menos eficazes.

Figura 3.12 – *Small coke*



Fonte: Próprio autor (2024)

Figura 3.13 – Coque metalúrgico



Fonte: Próprio autor (2024)

Gavel (2017) realizou, em seu trabalho, um levantamento bibliográfico, a fim de se entender os efeitos do uso de *small coke* sobre a permeabilidade, zona de reserva térmica, cinética de redução e no comportamento de amolecimento e fusão. Ao final, o autor concluiu que o carregamento de *small coke* junto à carga metálica leva a efeitos positivos em todos esses quesitos.

Conforme Song (2013), o uso de *small coke* junto à carga metálica é uma prática benéfica, visto que além de favorecer a permeabilidade, este desempenha um papel estrutural em relação à carga ferrosa e, com isso, ocorrem menos deslocamentos e perda de pressão (em relação a casos em que não há o uso de *small coke*). Apesar disso, Carvalhido (2019) destaca o poder de acelerar a cinética da reação de redução como a principal função do *small coke* no AF, o que é confirmado por Agra (2023), que elege as funções químicas como as principais, uma vez que o coque metalúrgico apresenta melhores resultados no desempenho de funções estruturais e de permeabilidade do leito.

Segundo Alencar *et al.* (2014), os benefícios de se utilizar *small coke* vão desde o aproveitamento dos finos de coque gerados internamente até uma melhora do processo de redução da carga ferrosa, uma vez que a permeabilidade é favorecida e a velocidade da reação é aumentada (devido à proximidade entre a carga metálica e a redutora). Após testes relacionados aos parâmetros de redução, os autores concluíram que cargas com maior participação de *small coke* apresentaram uma

redução significativamente mais intensa, principalmente no início do amolecimento, o que foi relacionado a um retardamento desta etapa (ocasionado pela presença do *small coke*), provocando um maior contato da carga metálica com os agentes redutores e, por isso, maior velocidade de redução.

3.4 Alternativas ao *small coke* no alto-forno

Devido à sua origem fóssil, derivados de carvão mineral trazem consigo questões ambientais associadas, caracterizando a rota integrada a coque como responsável por emitir entre 1.510 e 1.950 kg de CO₂ por tonelada de aço bruto produzido (CGEE, 2010). Contribuindo, assim, com o efeito estufa e mudanças climáticas.

Nesse sentido, a substituição, mesmo que parcial, apresenta-se como uma boa alternativa para contornar esta situação. Dessa forma, diversos estudos são feitos, a fim de se encontrar uma solução para este problema, que além de ambiental, passa a ser financeiro. Isso porque, segundo Eibel e Pinheiro (2016), o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), uma flexibilização do tratado de *Kyoto* (2011), gerou a chamada política dos créditos de carbono, que prevê que a empresa que deixar de emitir ou realizar a captura de uma tonelada de CO₂ da atmosfera ganhará um crédito de carbono. Tal bonificação pode ser definida como uma espécie de documento que confere aos seus detentores o direito a emissões. Sendo esses créditos comercializáveis, ainda conforme os autores, empresas que não conseguirem atingir suas metas de redução de emissão de GEE's poderão comprá-los de outras empresas. Nesse contexto, a introdução de outras fontes energéticas no processo produtivo do aço, em detrimento do carvão mineral, apresenta-se como uma prática duplamente positiva.

Sendo assim, alternativas ao uso de *small coke* no AF vêm sendo estudadas ao longo dos anos, com o intuito de se reduzir emissões de GEE's e, conseqüentemente, atingir objetivos ambientais e/ou financeiros. Tais estudos passam pela elaboração de materiais capazes de desempenhar os papéis do *small coke* a custos e/ou impactos ambientais inferiores. Maior eficiência e menor tempo de processo podem ser objetivados também.

3.4.1 Carvão vegetal

Segundo Assis (2008), o carvão vegetal (Figura 3.14) é proveniente principalmente de madeira, podendo ser ela nativa ou de reflorestamento:

- a) Madeira nativa – proveniente do desmatamento, pode ser de diversas espécies, dependendo da região;
- b) Madeira de reflorestamento: proveniente do plantio visando a produção de carvão vegetal, sendo o eucalipto a mais utilizada.

Para se tornar carvão, a madeira deve ser submetida a um processo de aquecimento denominado carbonização que, de acordo com Assis (2008), ocorre quando a madeira é aquecida em temperaturas acima de 280°C. Ainda segundo o autor, tal processo trabalha com oxigênio controlado, liberação de água, liberação de líquidos orgânicos e liberação de gases não-condensáveis. Como resultado, tem-se o carvão vegetal, que pode ser entendido como um material que concentrou carbono e expulsou oxigênio, apresentando capacidade de reter 57% do carbono contido na lenha (o restante estará presente nos gases e líquido condensado) (ASSIS, 2008).

O carvão vegetal, por ser proveniente de madeira, é considerado um combustível de emissão zero de GEE's. Isso porque o eucalipto, por meio da fotossíntese, retira CO₂ da atmosfera durante toda a sua vida (BARBIERI, 2013). Além disso, por apresentar baixos teores de enxofre (S) e nitrogênio (N), o carvão vegetal também não contribui ativamente com emissões de compostos desses elementos (BARBIERI, 2013). Assim, não se caracteriza como um agente causador de outros problemas, como a chuva ácida, por exemplo. Somado a este fato, o Brasil destaca-se por ser o maior produtor de carvão vegetal do mundo (PEREIRA, 2009). Sendo assim, pode-se concluir que disponibilidade e questões ambientais não se caracterizam como problemas recorrentes relacionados ao uso deste combustível em território nacional. É importante ressaltar, porém, que para aumentar-se o consumo de carvão vegetal (em usinas integradas a coque) faz-se necessário campanhas de reflorestamento, a fim de suprir a possível nova demanda apresentada, principalmente pensando-se em garantir disponibilidade do combustível em questão e, por consequência, a viabilidade e continuidade do processo.

Figura 3.14 – Carvão vegetal granulado



Fonte: Assis (2008)

Gandra, Reis e Fernandes (2015) avaliaram o efeito de diferentes combustíveis sob a forma de *small* no AF, dentre eles, o carvão vegetal. Segundo os autores, apesar do baixo teor de carbono fixo (74,04%), baixo poder calorífico (6891 cal/g) e relativo alto teor de cinzas (2,06%) encontrados, tal combustível apresentou a maior porosidade (>60%), baixíssimo teor de enxofre (0,2%), menor temperatura necessária para reagir (alta reatividade) e maior efeito na temperatura de amolecimento e fusão (indício de melhoria na permeabilidade do leito). Dessa forma, sobretudo quando utilizado em granulometria similar ou superior à granulometria da carga metálica, o carvão vegetal foi o responsável por apresentar o melhor desempenho dentre os materiais testados.

3.4.2 Coque verde de petróleo

Conforme Petrobrás (2019), sendo muito semelhante ao carvão mineral, o coque verde de petróleo (Figura 3.15) é um combustível sólido e poroso, composto basicamente por carbono e hidrocarbonetos. Dessa forma, tal combustível é caracterizado por possuir alto teor de carbono fixo, alto poder calorífico e baixos teores de cinzas e enxofre, possuindo, assim, um maior valor agregado e possíveis aplicações energéticas e metalúrgicas. Ainda segundo o autor, devido aos menores impactos ambientais (o CVP nacional, sobretudo), o coque verde de petróleo apresenta-se como um forte possível substituto do carvão mineral e do carvão vegetal. Além disso, devido a não necessidade de ser submetido a processos prévios (como a

coqueificação, por exemplo), quando comparado ao coque, tal combustível, no balanço geral, pode ser entendido como um combustível de menor emissão de GEE's.

Figura 3.15 – CVP após recebimento no pátio



Fonte: Carvalhido (2019)

Gandra, Reis e Fernandes (2015) estudaram o efeito de diferentes combustíveis sob a forma de *small* no AF, dentre eles, o coque verde de petróleo. Segundo os autores, tal combustível destacou-se devido ao seu baixo teor de cinzas (0,12%) e maior poder calorífico em relação aos combustíveis testados (8705 cal/g). Além disso, apesar da relativa baixa porosidade (cerca de 15%), apresentou alto teor de carbono fixo (87,78%), segunda menor temperatura necessária para reagir e relativa influência no aumento da temperatura de início de amolecimento. Dessa forma, principalmente quando utilizado com granulometria similar à granulometria da carga metálica, o coque verde de petróleo demonstrou-se capaz de entregar um dos melhores desempenhos.

Carvalhido (2019) analisou, em seu trabalho, o efeito da substituição de *small coke* por coque verde de petróleo, com o intuito de avaliar as implicações relacionadas ao consumo de combustível e estabilidade operacional do AF. Segundo o autor, o coque verde de petróleo apresentou baixo teor de cinzas (0,77%) e alto teor de carbono fixo (88,33%). Com base nos resultados obtidos, concluiu-se que a substituição é tecnicamente viável em reatores de pequeno porte, uma vez que o teste industrial realizado no AF indicou a possibilidade de substituição de até 45 kg/t de gusa (sem causar alteração no consumo de combustível, permeabilidade do leito e produtividade). Apesar disso, a necessidade de uma avaliação relacionada à parte financeira, a fim de se julgar a viabilidade econômica da substituição do *small coke* por coque verde de petróleo, foi apontada pelo autor.

3.4.3 Antracito

O Antracito (Figura 3.16) é o último estágio de carbonificação do carvão mineral e, por isso, possui entre 90 e 96% de carbono fixo, podendo ser entendido como uma excelente fonte carbonosa (VIANA FILHO, 2007). Entretanto, somente o carvão betuminoso possui propriedades coqueificantes, logo, é o único estágio que pode se tornar coque (SILVA, 2011). Dessa forma, o uso de antracito na siderurgia deve ser direcionado para outros setores, como a sinterização, por exemplo, destinação na qual este combustível não apresenta um alto valor agregado.

Nesse contexto, o uso de antracito no AF, sob a forma de *small*, apresenta-se como uma possível destinação para este combustível sólido, devido ao seu alto percentual de carbono e a sua impossibilidade de coqueificação. Além disso, a exemplo do CVP, devido a não necessidade de ser submetido a processos prévios, quando comparado ao coque, o antracito (de maneira geral) pode ser entendido como um combustível de menor emissão de GEE's.

Figura 3.16 – Carvão antracito



Fonte: Vasconcelos (2021)

Gandra, Reis e Fernandes (2015) avaliaram o efeito de diferentes combustíveis sob a forma de *small* no AF, dentre eles, o antracito, que não apresentou bons resultados. Segundo os autores, apesar do alto teor de carbono fixo (89,52%) e segundo maior poder calorífico (7344 cal/g), tal combustível apresentou alto teor de cinzas (6,15%), baixa porosidade (<5%), segunda maior temperatura necessária para reagir e pouco efeito na temperatura de início de amolecimento. Sendo assim, o antracito foi eleito o combustível de pior desempenho dentre todos os combustíveis

testados, principalmente quando utilizado em granulometrias diferentes da granulometria da carga metálica.

3.4.4 Ferro-coque

Conforme Nomura *et al.* (2007), melhorar a eficiência das reações que ocorrem no AF é um fator de extrema importância, uma vez que favorece a redução de consumo de coque metalúrgico. De acordo com Flores *et al.* (2014), uma forma de se alcançar tal feito é por meio da redução da temperatura de reserva térmica, o que pode ser atingido fazendo-se o uso de um coque altamente reativo. Ainda segundo os autores, esta alta reatividade pode ser alcançada por meio da adição de cálcio (Ca) ou Fe ao carvão destinado à produção de coque, originando o chamado ferro-coque.

Nomura *et al.* (2007) produziram ferro-coque através da adição de Fe ao carvão antes da coqueificação, com o intuito de se avaliar alguns aspectos da produção de coque altamente reativo. Ao final do processo, apesar de um inicial baixo índice de tambor, os autores notaram um significativo aumento da reatividade e que cerca de 70% do minério de ferro adicionado teria se transformado em ferro metálico durante a coqueificação. Após ajustes na temperatura do forno e na composição da mistura de carvões, obteve-se uma boa resistência associada a uma alta reatividade.

Braga *et al.* (2019) estudaram a viabilidade técnica da produção de um *small coke* altamente reativo (Figura 3.17) através da adição de cal virgem e *pellet feed* (3% em massa, em sua superfície) após a coqueificação. Ao final do trabalho, os autores notaram que tais catalisadores ocasionaram um aumento de cerca de 2% na reatividade, levando-se à conclusão de que *pellet feed* e cal virgem são alternativas capazes de favorecer a diminuição da temperatura da zona de reserva térmica, o que contribui diretamente com a diminuição de custos relacionados a combustível, além da diminuição de emissões de GEE's.

Figura 3.17 – a) *Small coke* sem adições; b) *small coke* com 3% de cal virgem; c) *small coke* com 3% de *pellet feed*



Fonte: Braga *et al.* (2019)

3.4.5 Comparação entre alternativas ao *small coke* no alto-forno

O Quadro 3.1 apresenta os principais pontos observados por autores que estudaram e avaliaram a possibilidade de se utilizar carvão vegetal, coque verde de petróleo, antracito e/ou ferro-coque sob a forma de *small* no AF. Com isso, busca-se resumir e comparar estas quatro tecnologias, bem como ressaltar as principais características de cada uma delas.

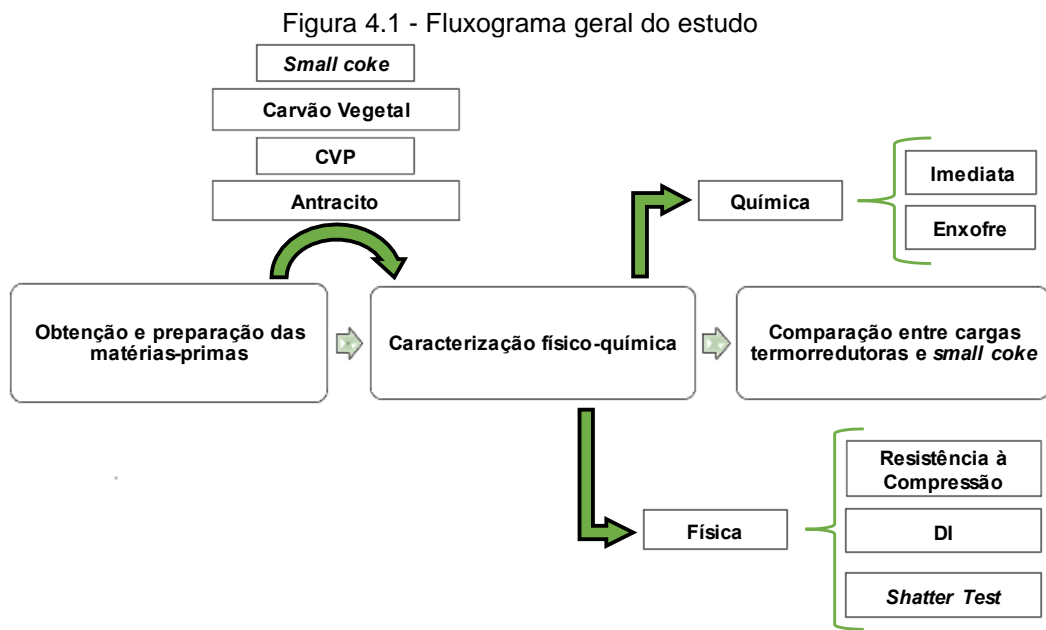
Quadro 3.1 – Comparação entre possíveis alternativas ao *small coke* no AF

Combustíveis	Autores	O que foi feito	Principais Resultados	Conclusão
Carvão vegetal	Gandra, Reis e Fernandes (2015)	Adição de carvão vegetal no AF, sob a forma de <i>small</i> e em diferentes granulometrias.	Baixo teor de C fixo (74,04%); baixo poder calorífico (6891 cal/g); a maior porosidade (>60%), baixíssimo teor de enxofre (0,2%), relativo alto teor de cinzas (2,06%), menor temperatura necessária para reagir; maior efeito na temperatura de amolecimento e fusão.	Dentre os combustíveis testados, apresentou o melhor desempenho, sobretudo quando testado em granulometrias similares ou superiores à da carga metálica.
Coque verde de petróleo	Gandra, Reis e Fernandes (2015)	Adição de coque verde de petróleo no AF, sob a forma de <i>small</i> e em diferentes granulometrias.	Alto teor de C fixo (87,58%); alto poder calorífico (8705 cal/g); baixo teor de cinzas (0,12%); baixa porosidade (15%); segunda menor temperatura necessária para reagir; relativo efeito na temperatura de amolecimento.	Dentre os combustíveis testados, apresentou um dos melhores desempenhos, sobretudo quando testado em granulometrias similares à da carga metálica.
	Carvalhido (2019)	Adição de coque verde de petróleo no AF, sob a forma de <i>small</i> .	Baixo teor de cinzas (0,77%); alto teor de C fixo (88,33%).	A substituição é tecnicamente viável em reatores de pequeno porte (45 kg/t gusa); Faz-se necessária uma avaliação quanto à viabilidade financeira.
Antracito	Gandra, Reis e Fernandes (2015)	Adição de antracito no AF, sob a forma de <i>small</i> e em diferentes granulometrias.	Alto teor de C fixo (89,52%); alto poder calorífico (7344 cal/g); alto teor de cinzas (6,15%); baixa porosidade (<5%); segunda maior temperatura necessária para reagir; pouco efeito na temperatura de amolecimento	Dentre os combustíveis testados, foi o de pior desempenho, sobretudo quando testado em granulometrias diferentes à da carga metálica.
Ferro-coque	Nomura <i>et al.</i> (2007)	Adição de Fe ao carvão antes da coqueificação.	Inicial baixo índice de tambor; relevante aumento da reatividade; 70% do minério de Fe foi reduzido a Fe metálico.	Através de ajustes na temperatura do forno e na composição dos carvões é possível obter boa resistência combinada com alta reatividade.
	Braga <i>et al.</i> (2019)	Adição de cal virgem e <i>pellet feed</i> ao <i>small coke</i> após a coqueificação (3% em massa, na superfície).	Aumento de cerca de 2% na reatividade.	<i>Pellet feed</i> e cal virgem são capazes de reduzir a temperatura da zona de reserva térmica (redução no consumo de combustível e nas emissões de GEE's).

Fonte: Próprio autor (2024)

4. MATERIAIS E MÉTODOS

As etapas metodológicas deste trabalho foram realizadas conforme a Figura 4.1, que descreve, de maneira geral, os caminhos percorridos durante o desenvolvimento deste. Desde a obtenção e preparação das matérias-primas, até à realização de testes e comparação entre as potenciais cargas termorreductoras propostas e o *small coke*, que também foi caracterizado neste trabalho.



Fonte: Próprio autor (2024)

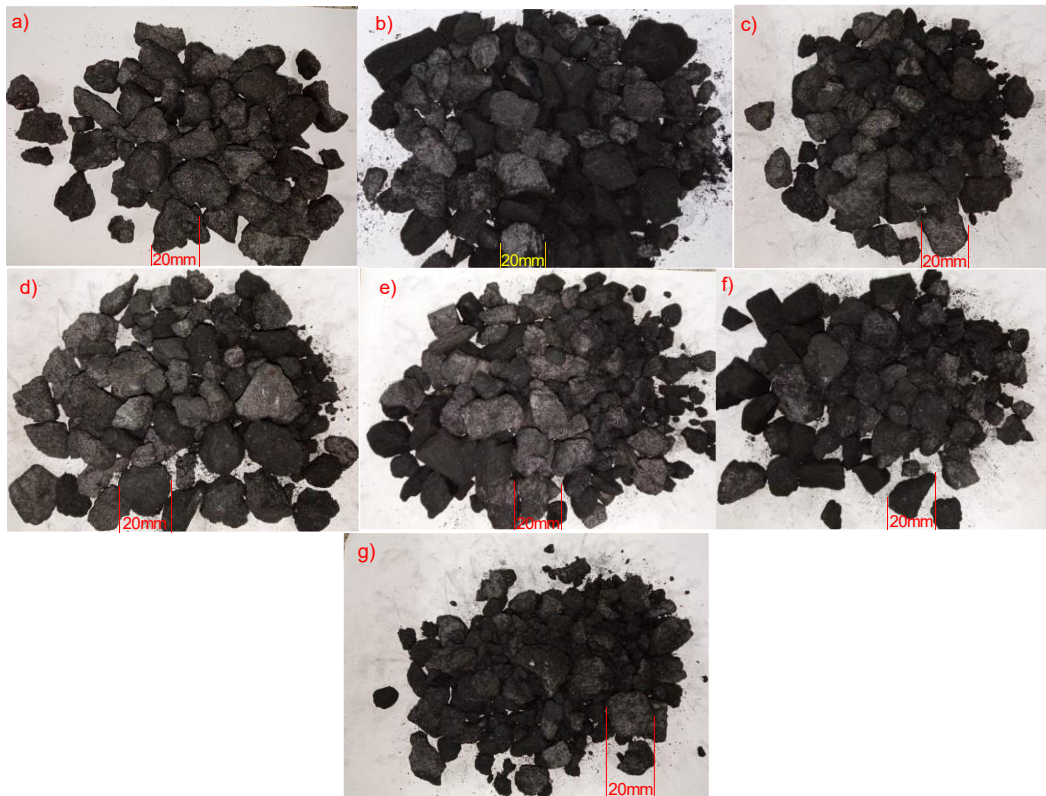
4.1 Obtenção e preparação das matérias-primas

O carvão vegetal, o CVP, o antracito e o *small coke*, matérias-primas utilizadas neste trabalho, foram fornecidas (na granulometria especificada e necessária para a execução dos ensaios) por uma empresa siderúrgica nacional, sendo todas advindas de processos realizados pela própria empresa.

A fim de que os testes propostos e a caracterização físico-química fossem bem executados, após a adequação granulométrica, utilizou-se cerca de 10 kg de *small coke*, além de cerca de 2,5 kg de cada uma das demais matérias-primas (todas com granulometria entre 10 e 25 mm). Com isso, buscou-se obter, na faixa granulométrica desejada, a massa suficiente e necessária para a realização dos testes.

As amostras utilizadas neste trabalho (Figura 4.2), conforme apresentado na Tabela 4.1, originaram-se de combinações entre as matérias-primas selecionadas, mantendo-se a proporção de 50% de *small coke* (em massa), com exceção apenas da amostra SC, composta por 100% de *small coke* (para ser utilizada como referência). Buscou-se, assim, encontrar a melhor configuração de proposta de complemento ao *small coke* no AF.

Figura 4.2 – Amostras: a) SC; b) CV-50; c) CVP-50; d) AN-50; e) CV/CVP-50; f) CV/AN-50; g) CVP/AN-50



Fonte: Próprio autor (2024)

Tabela 4.1 – Composição das amostras

Amostras	Composição das Amostras
SC	100% <i>small coke</i>
CV-50	50% <i>small coke</i> ; 50% carvão vegetal
CVP-50	50% <i>small coke</i> ; 50% CVP
AN-50	50% <i>small coke</i> ; 50% antracito
CV/CVP-50	50% <i>small coke</i> ; 25% carvão vegetal; 25% CVP
CV/AN-50	50% <i>small coke</i> ; 25% carvão vegetal; 25% antracito
CVP/AN-50	50% <i>small coke</i> ; 25% CVP; 25% antracito

Fonte: Próprio autor (2024)

4.2 Caracterização do *small coke* e cargas termorreduzidas

A caracterização do *small coke* e das cargas termorreduzidas foi realizada em conformidade com a caracterização típica do coque, a fim de se julgar a possibilidade de utilização de tais cargas sob a forma de *small* no AF. Sendo assim, as amostras foram submetidas à análise imediata e de enxofre, *shatter test* e *drum index* (DI) adaptados, além de testes de resistência à compressão, que foram realizados individualmente em cada um dos combustíveis estudados. Os ensaios propostos, por questões de disponibilidade de tempo e de matérias-primas, foram realizados somente uma vez em cada amostra, com exceção do ensaio de resistência à compressão, que foi realizado em triplicata. O Quadro 4.1 apresenta um resumo dos ensaios realizados.

Quadro 4.1 - Resumo dos ensaios realizados

Caracterização	Ensaio	Norma	Procedimento Geral
Física	<i>Shatter Test</i>	Adaptado da norma técnica JIS M8711/87	Três quedas livres (consecutivas) de uma altura de 1,8m + peneiramento durante 10 min.
	<i>Drum Index</i>	Adaptado da norma técnica JIS K2151/04	Moinho de bolas (4 corpos moedores) durante 10 min + peneiramento durante 10 min.
	Resistência à Compressão	-----	Realizado individualmente nos combustíveis testados (triplicata).
Química	Matéria Volátil	Norma técnica ASTM-D-3175/07	Aquecimento das amostras para liberar gases.
	Cinzas	Norma técnica ASTM-D-3177/02	Queima das amostras.
	Carbono Fixo	Norma técnica ASTM-D-3172/13	Calculado pela diferença.
	Enxofre	Norma técnica ASTM-D-3177/02	Incineração e oxidação a 800°C.

Fonte: Próprio autor (2024)

4.2.1 Caracterização física

Para a realização da caracterização física, as amostras foram submetidas a três ensaios diferentes: DI, *shatter test* e resistência à compressão.

4.2.1.1 *Shatter Test*

O ensaio *shatter test*, adaptado da norma técnica JIS M8711/87, foi realizado no laboratório de ensaios mecânicos do IFMG – *campus* Ouro Branco. Dessa forma, submeteu-se cerca de 400 g de cada amostra (granulometria média de 20 mm) a três quedas livres (consecutivas) de uma altura de 1,8 m. Em seguida, adicionou-se o material remanescente da amostra inicial a um conjunto de peneiramento *LAB Vibrating Sieve ZY-200A* (utilizou-se, além da peneira de 8 mm, uma peneira de 4 mm + o fundo). Após 10 minutos de peneiramento, conforme a equação 4.1, utilizou-se o percentual de material retido na peneira de 8 mm para expressar o resultado do teste.

$$\text{Shatter Index (\%)} = (m8 / A) \times 100 \quad (4.1)$$

Onde: m8 representa a massa de material remanescente retida na peneira de 8 mm e A representa a massa inicial da amostra.

4.2.1.2 *Drum Index*

O ensaio DI, adaptado da norma técnica JIS K2151/04, foi realizado no laboratório de ensaios mecânicos do IFMG – *campus* Ouro Branco. Dessa forma, a um jarro com capacidade para 5 litros, componente de um moinho de bolas da marca Solab e modelo SL - 34 (Figura 4.3), adicionou-se cerca de 400 g de cada amostra (granulometria média de 20 mm), além de quatro corpos moedores (bolas de 80 mm e massa média de 212 g). O moinho foi rotacionado durante 10 minutos à velocidade constante de 28 rotações por minuto e, em seguida, adicionou-se o material remanescente da amostra inicial a um conjunto de peneiramento *LAB Vibrating Sieve ZY-200A* (utilizou-se, além da peneira de 8 mm, uma peneira de 4 mm, uma peneira de 1 mm + o fundo). Após 10 minutos de peneiramento, expressou-se os resultados em função da massa remanescente com granulometria superior a 8 mm e em função da massa remanescente com granulometria inferior a 1 mm, conforme as equações 4.2 e 4.3, respectivamente.

$$DI > 8 (\%) = (m8 / A) \times 100 \quad (4.2)$$

$$DI < 1 (\%) = (m1 / A) \times 100 \quad (4.3)$$

Onde: m8 representa a massa de material remanescente com granulometria superior a 8 mm, m1 representa a massa de material remanescente com granulometria inferior a 1 mm e A representa a massa inicial da amostra.

Figura 4.3 – a) moinho de bolas; b) corpos moedores



Fonte: Próprio autor (2024)

4.2.1.3 Resistência à compressão

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados em uma máquina universal de ensaios (Figura 4.4), localizada no laboratório de ensaios mecânicos do IFMG – *campus* Ouro Branco. Tal equipamento, da marca *EMIC* e modelo *DL 30.000*, possui capacidade de 30000 kgf. Além disso, possui velocidade de ensaio ajustável de 0,001 a 500 mm/min. Neste equipamento, a força é aplicada pelo prato superior (prato inferior é fixo), e o resultado é expresso em uma curva gerada a partir do giro do volante do equipamento. Dessa forma, devido a características do ensaio, bem como ao fato de os materiais responderem à compressão de maneira individual no AF, submeteu-se uma partícula de 20 mm (sem preparação prévia) de cada um dos combustíveis (*small coke*, carvão vegetal, CVP e antracito), individualmente, a um ensaio de compressão, a fim de se definir a força máxima de ruptura das amostras. Tal procedimento, conduzido à velocidade de 15 mm/min, foi realizado em triplicata e,

para expressar o resultado, utilizou-se a média dos valores encontrados. Para calcular as tensões de rupturas, considerou-se as partículas circulares de 20 mm de diâmetro.

Figura 4.4 – Máquina universal de ensaios



Fonte: Próprio autor (2024)

4.2.2 Caracterização química

Para a realização da caracterização química, as amostras foram submetidas a dois ensaios diferentes: análise imediata (umidade, cinzas, matéria volátil e carbono fixo) e análise de enxofre. Tais ensaios foram realizados no laboratório de ensaios químicos da mesma empresa siderúrgica nacional que forneceu as matérias-primas.

4.2.2.1 Análise imediata

A análise da umidade foi realizada conforme a norma técnica ASTM-D-3173/03. Dessa forma, submeteu-se cerca de 400 g de cada amostra a um aquecimento a fim de se liberar a água presente em sua composição. Após, foram realizados cálculos, conforme a equação 4.4, para se estimar a perda percentual de massa relacionada à umidade das amostras (utilizou-se base seca neste trabalho, contudo).

$$\text{Umidade na amostra (\%)} = [(A - B) / A] \times 100 \quad (4.4)$$

Onde: A representa a massa inicial da amostra utilizada e B representa a massa da amostra após o aquecimento.

A análise da matéria volátil foi realizada conforme a norma técnica ASTM-D-3175/07. Dessa forma, submeteu-se cerca de 400 g de cada amostra a um aquecimento à temperatura suficiente para ocasionar a liberação de um produto gasoso. Após, foram realizados cálculos, conforme as equações 4.5 e 4.6, para se estimar a perda de massa relacionada à liberação dos gases (exclui-se os gases gerados pela umidade da amostra).

$$\text{Perda de massa da amostra (C), \%} = [(A - D) / A] \times 100 \quad (4.5)$$

$$\text{Matéria volátil (\%)} = C - U \quad (4.6)$$

Onde: A representa a massa inicial da amostra, D representa a massa da amostra após o aquecimento, C representa a perda total de massa da amostra e U representa a perda de massa relacionada à umidade (%).

A análise de cinzas foi realizada conforme a norma técnica ASTM-D-3174/04. Dessa forma, foi realizada a queima das amostras (400 g, aproximadamente) até cerca de 800 °C. Após, foram realizados cálculos, conforme a equação 4.7, a fim de se estimar o percentual (em massa) de cinzas gerado.

$$\text{Cinzas (\%)} = (Cz / A) \times 100 \quad (4.7)$$

Onde: Cz representa a massa de cinzas gerada e A representa a massa inicial da amostra.

O carbono fixo, conforme a norma técnica ASTM-D-3172/13, foi estimado pela diferença de massas. Dessa forma, conforme a equação 4.8, o percentual em massa de carbono fixo foi determinado pela subtração dos valores de umidade, cinzas e matérias voláteis do valor de massa inicial da amostra.

$$\text{Carbono fixo (\%)} = 100 - (\% \text{ umidade} + \% \text{ cinzas} + \% \text{ voláteis}) \quad (4.8)$$

4.2.2.2 Análise de enxofre

A análise do enxofre total foi realizada conforme a norma técnica ASTM-D-3177/02. Dessa forma, conforme o método A, denominado *Eschka*, foi realizada a extração quantitativa do sulfato solúvel em água após cerca de 400 g de cada amostra ser submetida à incineração e oxidação a 800 °C, na presença de uma mistura contendo óxido de magnésio e carbonato de sódio. Após, foram realizados cálculos, conforme a equação 4.9, para se estimar o teor de enxofre na amostra.

$$\text{Enxofre (\%)} = [(B_p - B_c) \times 13,738 / A] \times 100 \quad (4.9)$$

Onde: A representa a massa inicial da amostra, B_c representa a massa de BaSO₄ para correção e B_p representa a massa de BaSO₄ precipitada.

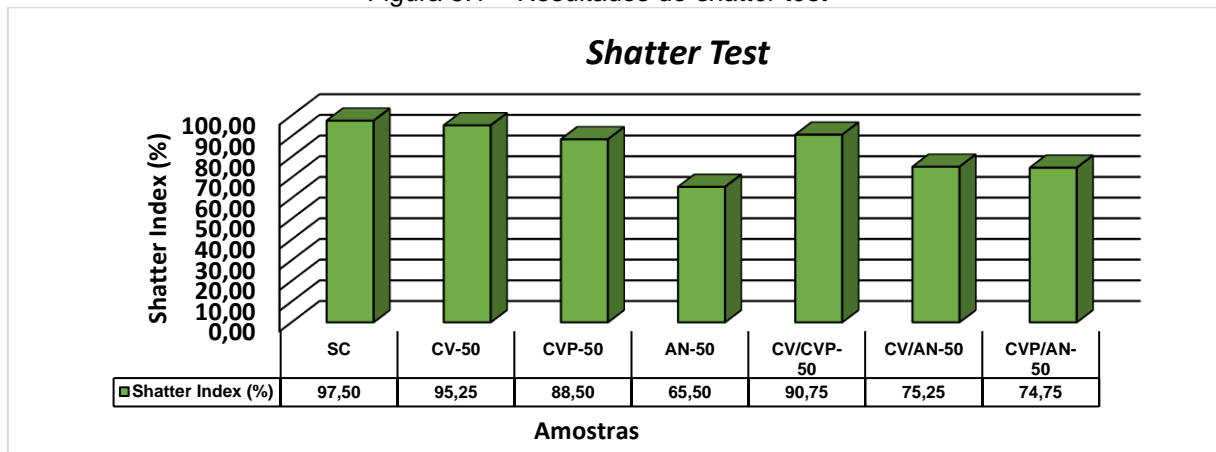
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização física

5.1.1 *Shatter Test*

Conforme apresentado na Figura 5.1, os resultados do *shatter test* das amostras indicaram, para o *small coke* (referência), um alto índice de resistência à queda (cerca de 97,50%), que apresentou valor muito semelhante aos 96,50% encontrado por Carvalhido (2019), em seu trabalho. E, dessa forma, o resultado encontrado para a amostra SC pode ser tratado como natural e em conformidade com as características de tal combustível.

Figura 5.1 – Resultados do *shatter test*



Fonte: Próprio autor (2024)

Ao avaliar a presença de um *small CVP* (100% CVP) no AF, Carvalhido (2019) encontrou como resultado um índice *shatter* de 83,80%, o que permite evidenciar a influência positiva da adição de *small coke* e/ou carvão vegetal à mistura, conforme observado nas amostras CVP-50 e CV/CVP-50, que apresentaram como valores de resistência à queda 88,50% e 90,75%, respectivamente. Sendo tais valores superiores ao encontrado pelo autor, ao mesmo tempo que próximos ao encontrado na amostra SC, estes podem ser considerados satisfatórios e, por consequência, pode-se considerar que tais amostras apresentaram alta resistência à queda.

Os resultados do *shatter test* indicaram, ainda, uma relação diretamente proporcional entre a presença de antracito nas amostras e um favorecimento à degradação (menor resistência à queda). Tal fato pode ser associado a características do próprio combustível que, conforme Pereira (2016), apresenta-se como um material duro (e frágil, conseqüentemente). Dessa forma, o baixo valor de resistência à queda (65,50%) observado na amostra AN-50 (composta por 50% de antracito, sendo, dentre as amostras, a de maior percentual deste combustível) pode ser tratado como natural e esperado, bem como os valores intermediários encontrados nas amostras CV/AN-50 e CVP/AN-50 (75,25% e 74,75%, respectivamente).

Apesar de sua natureza friável e considerável geração de finos após a carbonização (PEREIRA, 2009), os resultados indicaram, para as misturas envolvendo carvão vegetal, uma alta resistência à queda (com exceção da mistura CV/AN-50, que sofreu influência do antracito e, por isso, apresentou valor intermediário). Assim, os altos valores encontrados para as amostras CV-50 e CV/CVP-50 podem estar associados à granulometria utilizada, à influência direta exercida pela presença de *small coke* nas amostras, bem como a características da metodologia empregada. Além disso, características do próprio material utilizado podem influenciar nos resultados, uma vez que, segundo Costa *et al.* (2014), a resistência mecânica do carvão vegetal normalmente apresenta relação diretamente proporcional à sua densidade. Dessa forma, uma análise prévia das propriedades do carvão vegetal pode apresentar-se como uma boa alternativa para compreender-se e/ou prever-se os resultados dos ensaios mecânicos envolvendo tal combustível.

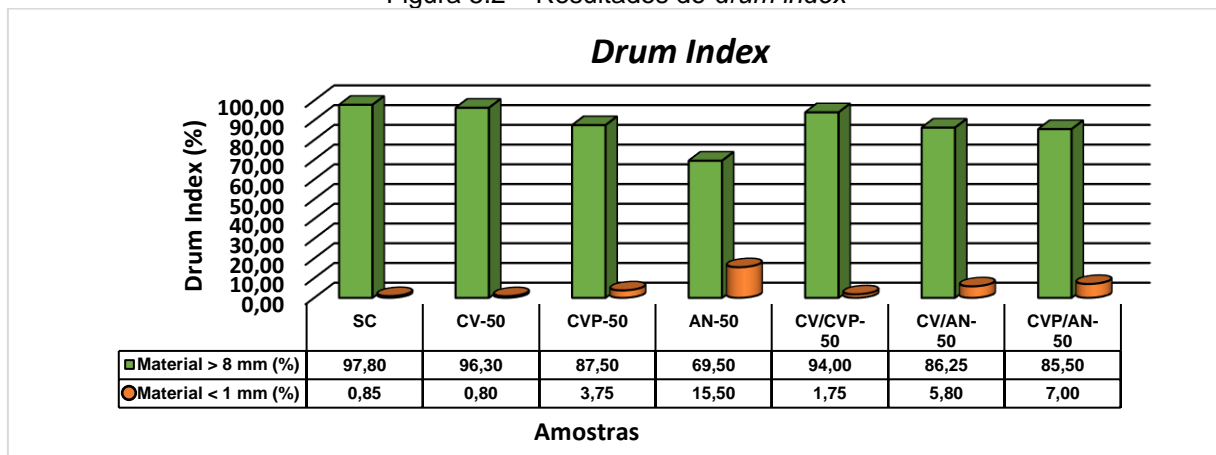
Assim, o *shatter test* indicou, de maneira geral, resultados mais satisfatórios associados às amostras CV-50 e CV/CVP-50 (desconsiderando a amostra de referência, SC), bem como indicou um pior desempenho relacionado à amostra AN-50.

5.1.2 Drum Index

Conforme apresentado na Figura 5.2, os resultados do *drum index* (DI) das amostras indicaram, para o *small coke* (utilizado como referência), um alto índice de

resistência a frio (97,80%) combinado com baixa geração de finos (0,90%), parâmetros comumente apresentados por tal combustível que, para estar adequado ao AF (coque metalúrgico), deve apresentar DI (150/15) superior a 85% (norma JIS K2151/04) (RIZZO, 2009). Dessa forma, os resultados obtidos podem ser tratados como naturais e em conformidade com as características tradicionais do coque.

Figura 5.2 – Resultados do *drum index*



Fonte: Próprio autor (2024)

A amostra AN-50, que apresenta maior proporção de antracito em sua composição (50%), caracterizou-se por seu baixo DI (69,50%) somado a uma alta geração de finos (15,50%). De forma análoga, em comparação à amostra SC, as amostras CV/AN-50 (86,30%) e CVP/AN-50 (85,50%) caracterizaram-se por valores intermediários de DI, além de alta geração de finos (5,80% e 7,00%, respectivamente). Dessa forma, a exemplo do *shatter test*, os resultados do *drum index* indicaram uma menor resistência a frio associada às amostras contendo antracito, além de maior geração de finos. Tais observações podem ser explicadas, novamente, pela dureza do material, que o torna frágil, por consequência.

A amostra CV-50 (50% de carvão vegetal) apresentou para o DI (96,30%) e geração de finos (0,80%) valores muito próximos aos encontrados na amostra SC, sendo considerados satisfatórios e, dessa forma, definindo tal amostra como de alta resistência a frio (além de baixa geração de finos). Assim como no *shatter test*, os resultados encontrados indicaram, para a presença de carvão vegetal nas amostras, uma influência positiva no DI, bem como na geração de finos, melhorando ambos os parâmetros das amostras CV/CVP-50 e CV/AN-50 (em comparação às amostras

CVP-50 e AN-50, respectivamente). Tal influência pode estar associada a características do carvão vegetal, bem como a características da metodologia empregada e, mais uma vez, uma análise prévia dos aspectos do combustível utilizado pode mostrar-se interessante.

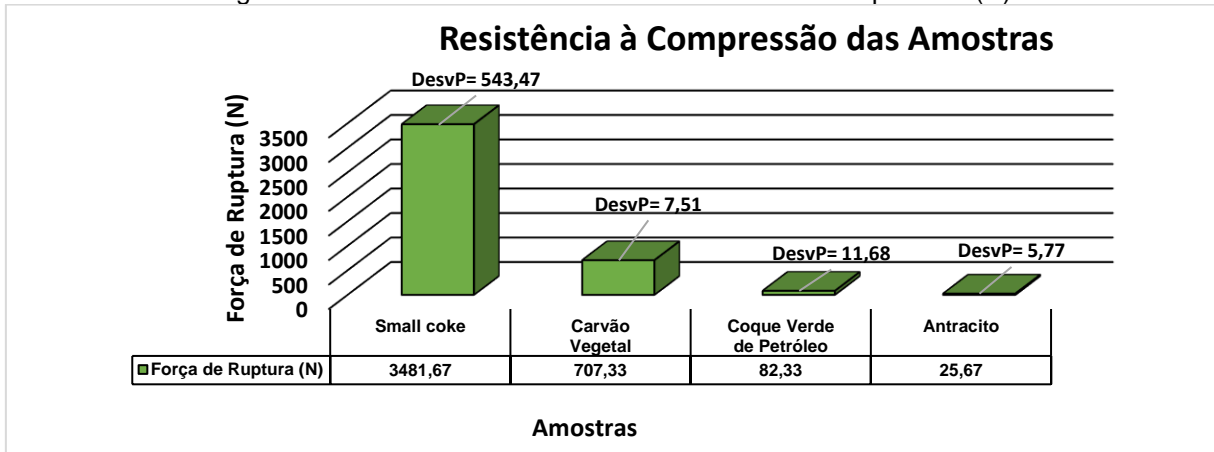
A amostra CVP-50, caracterizada pelo maior percentual de coque verde de petróleo entre as amostras (50%), comparada à amostra SC, apresentou valores intermediários de DI (87,50%) e de geração de finos (3,80%). Assim, observou-se uma influência positiva relacionada à presença de carvão vegetal na mistura, o que levou a amostra CV/CVP-50 a uma alta resistência a frio (94,00%) e uma baixa geração de finos (1,80%), em comparação à amostra SC e/ou CVP-50. Por outro lado, como exposto, a presença de antracito foi associada a uma influência negativa nas misturas, levando a amostra CVP/AN-50 a um DI ligeiramente inferior ao apresentado pela amostra CVP-50 (redução de 2%), além de um aumento no percentual de material remanescente com granulometria inferior a 1 mm (cerca de 3,20%) e, por isso, tal amostra caracterizou-se por uma alta geração de finos (em comparação à amostra SC e/ou CVP-50).

Sendo assim, o *drum index* indicou, de maneira geral, um melhor desempenho relacionado às amostras CV-50 e CV/CVP-50 (desconsiderando a amostra de referência), além de um pior desempenho relacionado à amostra AN-50.

5.1.3 Resistência à compressão

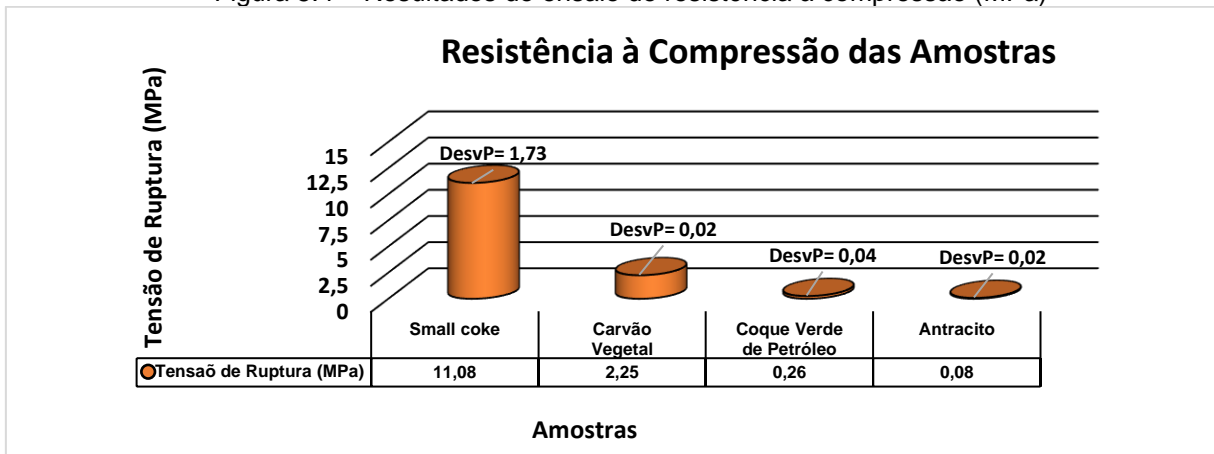
As médias dos resultados (bem como o desvio padrão) dos ensaios de resistência à compressão das amostras estão apresentados nas Figuras 5.3 e 5.4, nas quais observou-se, para o *small coke*, uma alta resistência (cerca de 11,08 MPa), valor semelhante ao definido por Rizzo (2009) como requerido para o coque metalúrgico no AF (entre 12,75 MPa e 15,69 MPa, aproximadamente). O resultado apresentado pelo *small coke* (ligeiramente inferior ao de referência) pode ser explicado pela diferença de granulometria, uma vez que Oliveira *et al.* (2017) constataram que a resistência à compressão do coque pode ser considerada uma função do tamanho da partícula ensaiada, de modo que menores granulometrias costumam apresentar menores resistências à compressão.

Figura 5.3 – Resultados do ensaio de resistência à compressão (N)



Fonte: Próprio autor (2024)

Figura 5.4 – Resultados do ensaio de resistência à compressão (MPa)



Fonte: Próprio autor (2024)

Para o carvão vegetal, os resultados indicaram baixa resistência à compressão, constatação esperada, uma vez que, segundo Kurauchi (2014), a resistência mecânica é o principal problema encontrado ao avaliar-se a utilização de carvão vegetal no AF e, por isso, tal combustível deve ser utilizado somente em reatores menores, a fim de se evitar a geração de finos e a perda de permeabilidade do leito, conseqüentemente. Dessa forma, o valor encontrado para a tensão de ruptura do carvão vegetal (2,25 MPa) pode ser explicado por características do combustível em si e de sua produção. Assim, ainda segundo o autor, a temperatura de carbonização, bem como a estrutura física da madeira, afeta diretamente a resistência à compressão do carvão vegetal e, por isso, este pode apresentar valores variados

para tal parâmetro, que também pode sofrer influência da metodologia empregada no ensaio.

Os resultados apontaram, também, baixíssimas resistências à compressão associadas ao coque verde petróleo (0,26 MPa) e ao antracito (0,08 MPa), sobretudo quando comparados ao *small coke* (11,08 MPa). Contudo, para uso sob a forma de *small* no AF, a caracterização química tende a ser mais determinante no julgamento de viabilidade, uma vez que a principal função do *small coke* é acelerar a reação de redução da carga metálica e, por isso, suas funções químicas tendem a ser mais relevantes no processo, visto que funções estruturais e de permeabilidade do leito são desempenhadas de maneira mais satisfatória pelo coque metalúrgico (ALENCAR *et al.*, 2014; CARVALHIDO, 2019; AGRA, 2023).

Dessa forma, o ensaio de resistência à compressão das amostras indicou, de maneira geral, um melhor desempenho associado ao carvão vegetal (desconsiderando o *small coke*), ainda que este combustível tenha apresentado baixa resistência. Além disso, o ensaio indicou baixíssimas resistências associadas ao coque verde de petróleo e ao antracito e, por isso, uma análise conjunta das caracterizações física e química pode mostrar-se interessante e/ou necessária ao julgar-se a viabilidade técnica relacionada ao uso de carvão vegetal, coque verde petróleo e/ou antracito sob a forma de *small* no AF.

5.2 Caracterização química

5.2.1 Análise imediata

Os resultados da análise imediata das amostras estão apresentados na Tabela 5.1, na qual apresentou-se uma comparação entre os resultados obtidos neste estudo e resultados encontrados por Gandra, Reis e Fernandes (2015) e Carvalhido (2019).

Os resultados obtidos na análise imediata (base seca) da amostra SC (referência) indicaram alto teor de carbono fixo (91,04%), alto teor de cinzas (8,19%)

e baixo teor de matéria volátil (0,77%), valores esperados e em conformidade com as características naturais do coque. Além disso, os resultados obtidos para tais parâmetros demonstraram-se muito semelhantes aos resultados encontrados por Gandra, Reis e Fernandes (2015) e Carvalhido (2019) em seus respectivos trabalhos e, dessa forma, podem ser considerados satisfatórios e de acordo com o esperado para tal amostra.

Tabela 5.1 – Resultados da análise imediata comparados a trabalhos semelhantes

Amostras	Parâmetros				Artigo
	Umidade (%)	Matéria Volátil (%)	Cinzas (%)	Carbono Fixo (%)	
Coque	Base seca	0,85	9,76	89,39	Gandra, Reis e Fernandes (2015)
Carvão Vegetal	Base seca	23,90	2,06	74,04	
Coque Verde de Petróleo	Base seca	12,10	0,12	87,78	
Antracito	Base seca	4,33	6,15	89,52	
<i>Small coke</i>	Base seca	0,60	8,00	91,40	Carvalhido (2019)
<i>Small CVP</i>	Base seca	10,90	0,77	88,33	
SC	Base seca	0,77	8,19	91,04	Este Trabalho (2024)
CV-50	Base seca	13,24	5,49	81,11	
CVP-50	Base seca	5,16	3,93	90,91	
AN-50	Base seca	3,76	19,02	77,22	
CV/CVP-50	Base seca	8,00	8,42	83,58	
CV/AN-50	Base seca	6,92	11,65	81,43	
CVP/AN-50	Base seca	4,90	9,47	85,63	

Fonte: Próprio autor (2024)

Os resultados encontrados para a amostra CV-50 indicaram altos teores de cinzas, matéria volátil e carbono fixo (5,49%, 13,24% e 81,11%, respectivamente). Tais resultados, quando comparados aos resultados do carvão vegetal (obtidos por Gandra, Reis e Fernandes (2015)), apesar de indicarem uma influência negativa no teor de cinzas associada à adição de *small coke* à mistura (levando a um aumento de 3,43%), indicaram um aumento considerável no teor de carbono fixo (7,07%), além de uma redução significativa no teor de matéria volátil (10,66%). Estas constatações podem ser relacionadas à manifestação de características típicas do *small coke* na mistura, bem como a uma combinação entre as características de ambos os combustíveis envolvidos.

Para a amostra CVP-50, os resultados apontaram alto teor de matéria volátil (5,16%), o menor teor de cinzas entre as amostras (3,93%) e alto teor de carbono fixo (90,91%). Os resultados da adição de *small coke* à mistura, quando comparados aos resultados obtidos para o CVP (Gandra, Reis e Fernandes (2015) e Carvallhido (2019)), demonstraram redução significativa no teor de matéria volátil (6,94% e 5,74%, respectivamente), além de aumento nos teores de cinzas (3,81% e 3,16%, respectivamente) e carbono fixo (3,13% e 2,58%, respectivamente). Tais constatações podem ser associadas, novamente, à influência direta exercida pela presença de *small coke* na mistura, manifestando suas características nos resultados.

Para a amostra AN-50 (desconsiderando a amostra SC), os resultados indicaram o menor teor de matéria volátil (3,76%), o maior teor de cinzas (19,02%) e o menor teor de carbono fixo (77,22%). Em comparação aos resultados obtidos para o antracito (Gandra, Reis e Fernandes (2015)), a amostra AN-50 indicou que a adição de *small coke* à mistura tende a ocasionar uma ligeira redução no teor de matéria volátil (0,57%), expressivo aumento no teor de cinzas (12,87%), além de expressiva redução no teor de carbono fixo (12,30%). Tais observações podem ser relacionadas à presença de *small coke* na amostra (combinações de características), bem como a particularidades dos materiais utilizados no ensaio.

Os resultados encontrados para a amostra CV/CVP-50 indicaram altos teores de cinzas, matéria volátil e carbono fixo (8,00%, 8,42% e 83,58%, respectivamente). Tais valores, quando comparados à amostra CVP-50, apontaram aumento nos teores de matéria volátil (2,84%) e cinzas (4,49%), além de redução no teor de carbono fixo (7,33%). Assim, nota-se que a adição de carvão vegetal à mistura contendo CVP e *small coke* pode ser considerada prejudicial, uma vez que os resultados indicaram que tal prática tende a piorar os três parâmetros avaliados.

Para as amostras CV/AN-50 e CVP/AN-50, os resultados indicaram altos teores de matéria volátil (6,92% e 4,90%, respectivamente), cinzas (11,65% e 9,47%, respectivamente) e carbono fixo (81,43% e 85,63%, respectivamente). Tais resultados, comparados à amostra AN-50, apesar de apontarem aumento no teor de matéria volátil (3,16% e 1,14%, respectivamente), indicaram redução no teor de cinzas (7,37% e 9,55%, respectivamente) e aumento no teor de carbono fixo (4,21% e 8,41%, respectivamente). Dessa forma, a adição de carvão vegetal ou CVP à mistura contendo antracito e *small coke* pode ser considerada benéfica, de maneira geral, sobretudo a adição de coque verde de petróleo, que apresentou ligeira alteração no

teor de matéria volátil combinada com melhores influências nos teores de cinzas e carbono fixo.

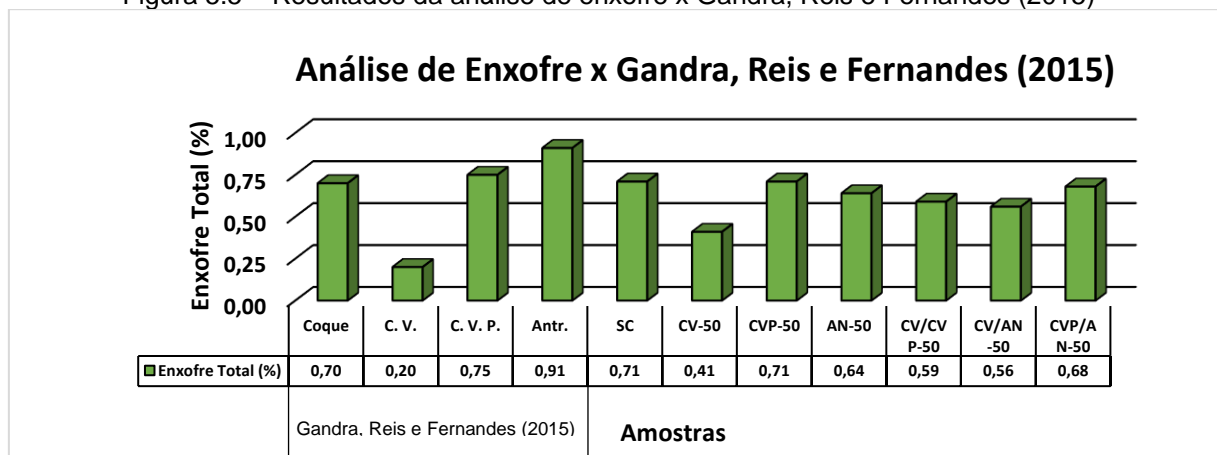
Sendo assim, desconsiderando a amostra SC, a análise imediata indicou, de maneira geral, um melhor desempenho associado à amostra CVP-50 (maior teor de carbono fixo e menor teor de cinzas), bem como um pior desempenho associado à amostra AN-50 (maior teor de cinzas e menor teor de carbono fixo).

5.2.2 Análise de enxofre

Os resultados da análise de enxofre estão apresentados nas Figuras 5.7 e 5.8, nas quais apresentou-se uma comparação entre os resultados observados neste trabalho e os resultados obtidos por Gandra, Reis e Fernandes (2015) e Carvalhido (2019), respectivamente.

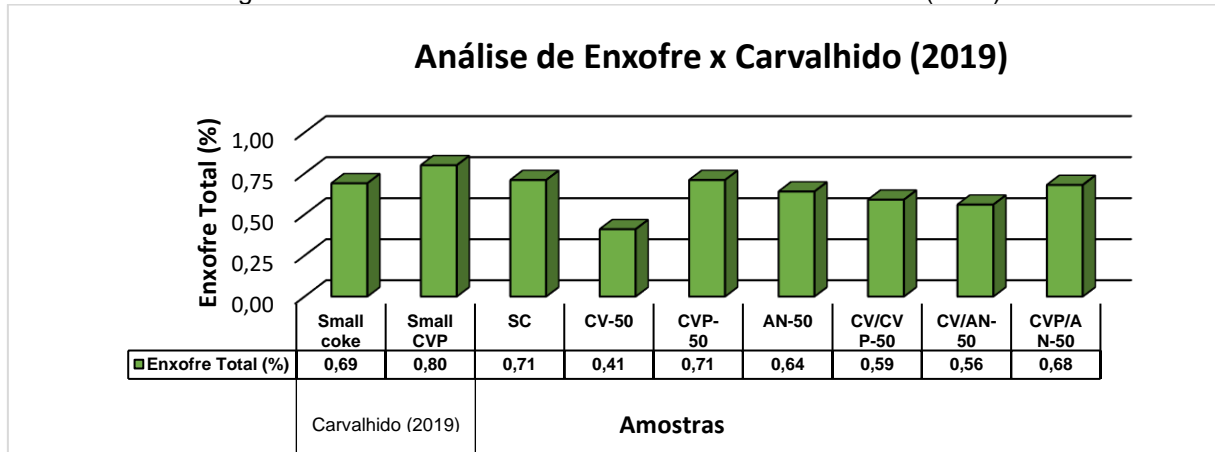
A análise indicou, para a amostra SC (referência), baixo teor de enxofre (0,71%), que apresentou valor muito próximo aos 0,70% e 0,69% encontrados, respectivamente, por Gandra, Reis e Fernandes (2015) e Carvalhido (2019). Assim, o resultado obtido neste trabalho pode ser considerado satisfatório e dentro do esperado.

Figura 5.5 – Resultados da análise de enxofre x Gandra, Reis e Fernandes (2015)



Fonte: Próprio autor (2024)

Figura 5.6 – Resultados da análise de enxofre x Carvalhido (2019)



Fonte: Próprio autor (2024)

Observou-se, para a amostra CV-50, o menor percentual de enxofre entre as amostras testadas (0,41%). Tal resultado, comparado ao encontrado por Gandra, Reis e Fernandes (2015), apontou um ligeiro aumento (0,21%) no percentual de enxofre ao adicionar-se *small coke* ao carvão vegetal. Este fato pode ser explicado por particularidades de ambos os combustíveis, uma vez que o carvão vegetal caracteriza-se por seu baixíssimo teor de enxofre e, por outro lado, o coque costuma apresentar valores um pouco mais altos para tal parâmetro. Assim, o ligeiro aumento observado pode ser tratado como natural e como o resultado do balanceamento entre as propriedades dos dois combustíveis.

Para a amostra CVP-50, o resultado indicou o maior percentual de enxofre entre as amostras testadas (0,71%). Em comparação aos resultados encontrados por Gandra, Reis e Fernandes (2015) e Carvalhido (2019), tal resultado representou mínima redução no teor de enxofre (0,04% e 0,09%, respectivamente) ao adicionar-se *small coke* ao coque verde de petróleo. Tal resultado pode ser explicado pela proximidade existente entre os teores de enxofre típicos de cada um dos combustíveis em questão, conforme observado por Gandra, Reis e Fernandes (2015) e Carvalhido (2019).

Para a amostra AN-50, em comparação ao valor obtido por Gandra, Reis e Fernandes (2015), o resultado indicou uma diminuição de 0,27% no teor de enxofre ao adicionar-se *small coke* ao antracito. Tal valor representa a maior diminuição no percentual de enxofre observada entre as amostras (causada somente pela presença de *small coke*). Novamente, o resultado obtido para amostra pode ser tratado como

esperado e justificado pela combinação entre as características de cada combustível, uma vez que a análise individual de enxofre já demonstrava o coque com um percentual de enxofre mais baixo que o antracito.

Para as amostras CV/CVP-50 e CVP/AN-50, em comparação à amostra CVP-50, os resultados indicaram ligeira redução no teor de enxofre (0,12% e 0,03%, respectivamente). Dessa forma, a adição de carvão vegetal ou antracito à mistura contendo coque verde de petróleo e *small coke* pode ser entendida como benéfica, ainda que a melhoria observada seja discreta.

Para a amostra CV/AN-50, em comparação à amostra CV-50, o resultado indicou um aumento de 0,15% no percentual de enxofre. Assim, a adição de antracito à amostra contendo carvão vegetal e *small coke* pode ser tratada como ligeiramente negativa, ainda que a amostra CV/AN-50 tenha apresentado o segundo melhor desempenho na análise de enxofre das amostras.

Sendo assim, desconsiderando a amostra SC (referência), a análise de enxofre das amostras apontou um melhor desempenho relacionado à amostra CV-50 (menor percentual de enxofre), bem como um pior desempenho relacionado à amostra CVP-50 (maior percentual de enxofre). O resultado obtido para a amostra CVP-50, porém, não deve ser tratado como desastroso, uma vez que apresentou-se semelhante aos resultados observados para o *small coke*, bem como para a amostra SC (referência).

5.3 Visão geral

5.3.1 Correlações entre os ensaios físicos

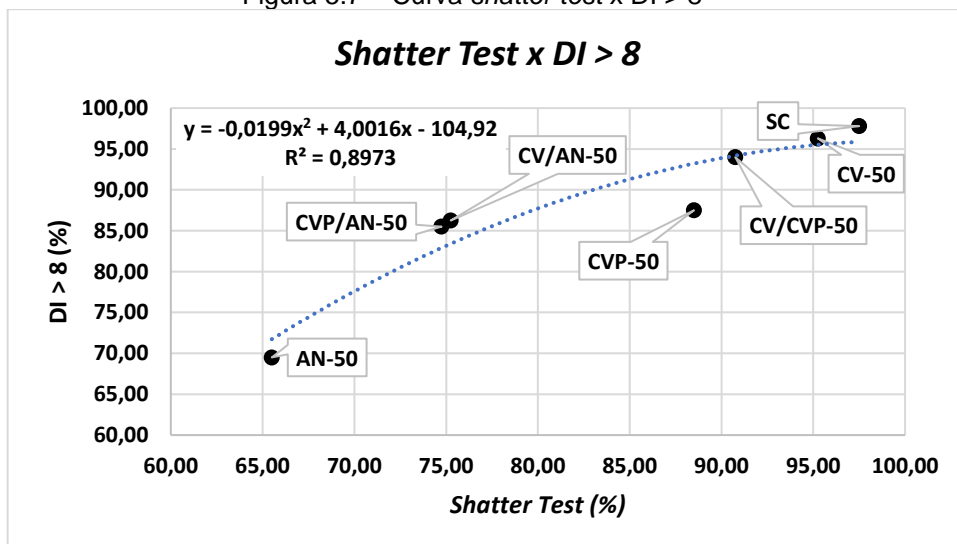
A fim de se verificar a ocorrência de correlações entre os ensaios físicos realizados, plotou-se três curvas relacionando os resultados obtidos nos ensaios *shatter test*, *drum index* e resistência à compressão. Utilizou-se, na curva *shatter test* x resistência à compressão e na curva $DI > 8$ x resistência à compressão, o ln dos valores encontrados nos ensaios (visando melhor adequação das curvas geradas), conforme indicado na Tabela 5.2, que apresenta os pontos utilizados para gerar cada uma das curvas plotadas.

Tabela 5.2 – Resumo das curvas plotadas

Curvas	Pontos	Shatter Test	Drum Index > 8	Resistência à Compressão
<i>Shatter Test</i> x <i>DI > 8</i>	SC	97,50	97,80	--
	CV-50	95,25	96,30	--
	CV/CVP-50	90,75	94,00	--
	CVP-50	88,50	87,50	--
	CV/AN-50	75,25	86,25	--
	CVP/AN-50	74,75	85,50	--
	AN-50	65,50	69,50	--
ln (<i>Shatter Test</i>) x ln (Resistência à Compressão)	SC; <i>Small Coke</i>	4,57985238	--	2,405141681
	CV-50; Carvão Vegetal	4,55650501	--	0,810930216
	CVP-50; CVP	4,48300255	--	-1,34707365
	AN-50; Antracito	4,18205014	--	-2,52572864
ln (<i>DI > 8</i>) x ln (Resistência à Compressão)	SC; <i>Small Coke</i>	--	4,582925	2,405141681
	CV-50; Carvão Vegetal	--	4,567468	0,810930216
	CVP-50; CVP	--	4,471639	-1,34707365
	AN-50; Antracito	--	4,241327	-2,52572864

Fonte: Próprio autor (2025)

A correlação entre os ensaios *shatter test* e *DI > 8* está apresentada na Figura 5.7, na qual observou-se que a equação polinomial gerada demonstrou-se capaz de explicar 89,73% dos pontos plotados e, dessa forma, pode ser definida como uma boa equação de predição.

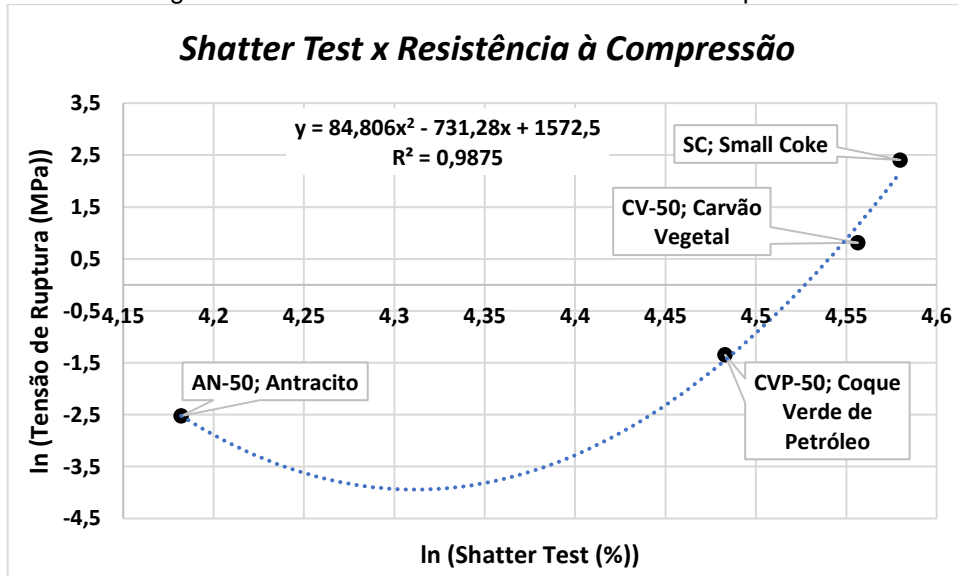
Figura 5.7 – Curva *shatter test* x *DI > 8*

Fonte: Próprio autor (2025)

A correlação entre os ensaios *shatter test* e resistência à compressão está apresentada na Figura 5.8, na qual observou-se que a equação polinomial gerada

demonstrou-se capaz de explicar 98,75% dos pontos plotados e, dessa forma, pode ser definida como uma excelente equação de predição.

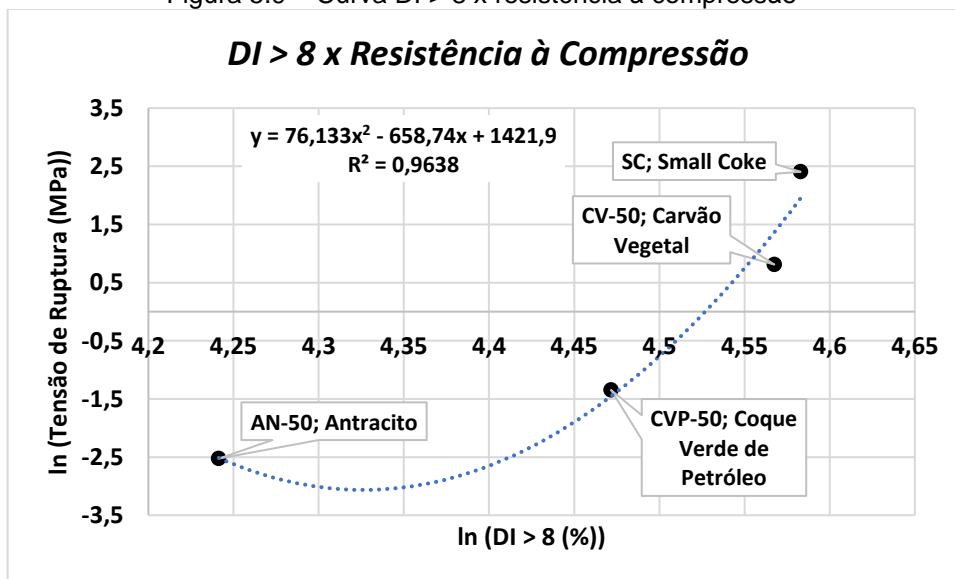
Figura 5.8 – Curva *shatter test* x resistência à compressão



Fonte: Próprio autor (2025)

A correlação entre os ensaios $DI > 8$ e resistência à compressão está apresentada na Figura 5.9, na qual observou-se que a equação polinomial gerada demonstrou-se capaz de explicar 96,38% dos pontos plotados e, dessa forma, também pode ser definida como uma excelente equação de predição.

Figura 5.9 – Curva $DI > 8$ x resistência à compressão



Fonte: Próprio autor (2025)

Assim, a partir das três curvas plotadas, observou-se a possibilidade de se utilizar as equações geradas para predição dos resultados, uma vez que bons coeficientes de determinação (R^2) foram obtidos e, dessa forma, em análises futuras será possível estimar resistência à compressão a partir da resistência à queda (*shatter test*), por exemplo (para as cargas termorreduzidas avaliadas neste trabalho).

5.3.2 Verificação de propriedade aditiva nos ensaios físicos

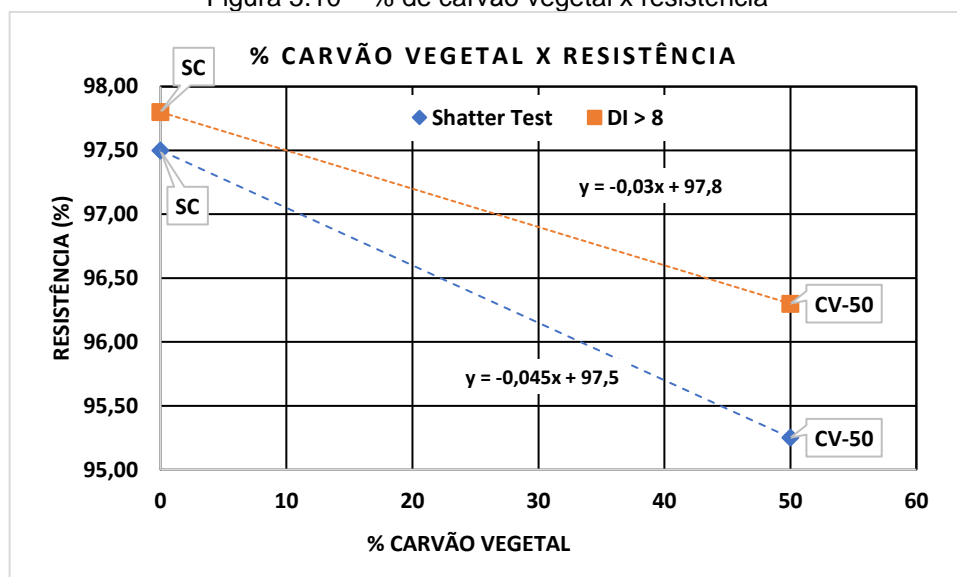
A fim de se verificar a ocorrência de propriedade aditiva nos ensaios físicos, plotou-se três gráficos relacionando o percentual de matéria-prima (carvão vegetal, CVP e antracito) nas amostras com os resultados obtidos nos ensaios *shatter test* e *drum index*. A Tabela 5.3 apresenta os pontos utilizados para gerar cada curva, que estão apresentadas nas Figuras 5.10, 5.11 e 5.12, respectivamente.

Tabela 5.3 – Pontos plotados em cada curva

Curvas	Pontos	% Matéria-Prima	<i>Shatter Test</i>	<i>Drum Index > 8</i>
% CV x resistência	SC	0% Carvão Vegetal	97,50	97,80
	CV-50	50% Carvão vegetal	95,25	96,30
% CVP x resistência	SC	0% CVP	97,50	97,80
	CVP-50	50% CVP	88,50	87,50
% antracito x resistência	SC	0% Antracito	97,50	97,80
	AN-50	50% Antracito	74,75	85,50

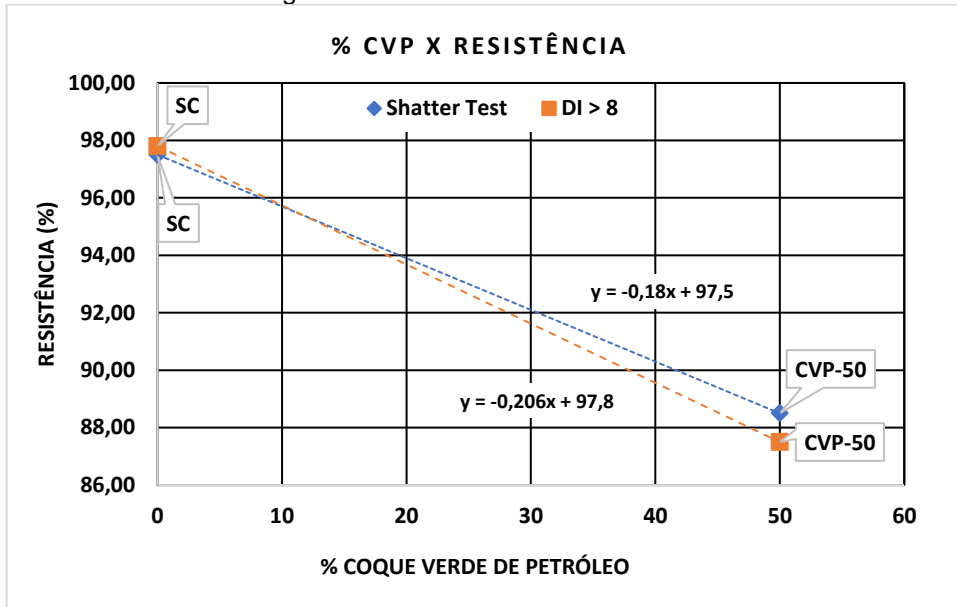
Fonte: Próprio autor (2025)

Figura 5.10 – % de carvão vegetal x resistência



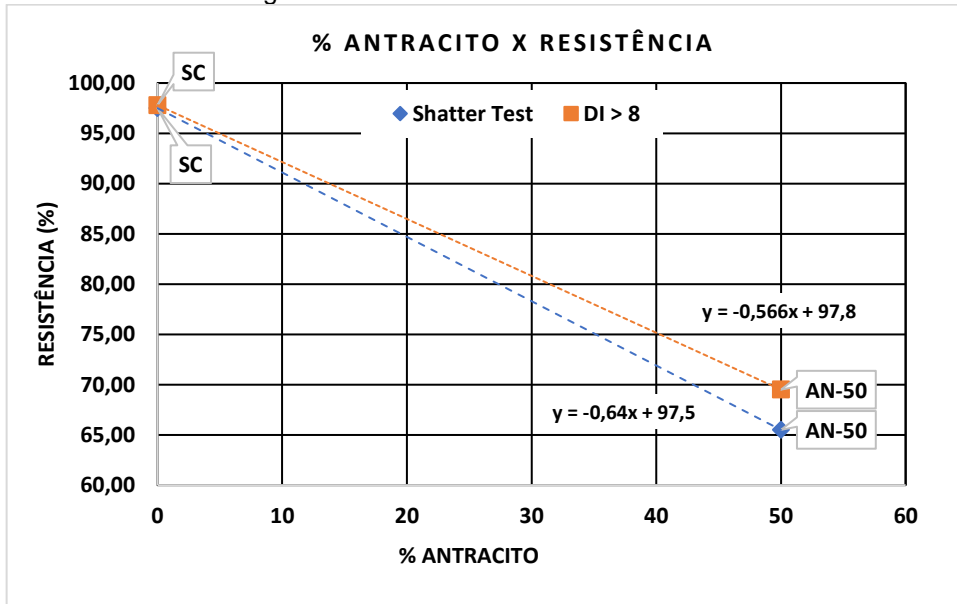
Fonte: Próprio autor (2025)

Figura 5.11 – % de CVP x resistência



Fonte: Próprio autor (2025)

Figura 5.12 – % de antracito x resistência



Fonte: Próprio autor (2025)

A partir das equações geradas pelas retas, por extrapolação, foi possível estimar as resistências para os combustíveis individuais, conforme apresentado na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Resistências individuais dos combustíveis

Resistência Individual			
Combustível	<i>Shatter Test</i>	DI > 8	Especificação
<i>Small Coke</i>	97,50	97,80	Medido
Carvão Vegetal	93,00	94,80	Estimado
CVP	79,50	77,20	Estimado
Antracito	33,50	41,20	Estimado

Fonte: Próprio autor (2025)

A partir das resistências individuais estimadas, por meio da equação 5.1, calculou-se, para as amostras CV/CVP-50, CV/AN-50 e CVP/AN-50, as resistências à queda e a frio. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 5.5.

$$\text{Resistência} = \frac{\%SC * RI_{SC} + \%CV * RI_{CV} + \%CVP * RI_{CVP} + \%AN * RI_{AN}}{100} \quad (5.1)$$

Onde: %SC representa o percentual de *small coke* na amostra, %CV representa o percentual de carvão vegetal na amostra, %CVP representa o percentual de CVP na amostra, %AN representa o percentual de antracito na amostra e RI representa a resistência individual de cada combustível.

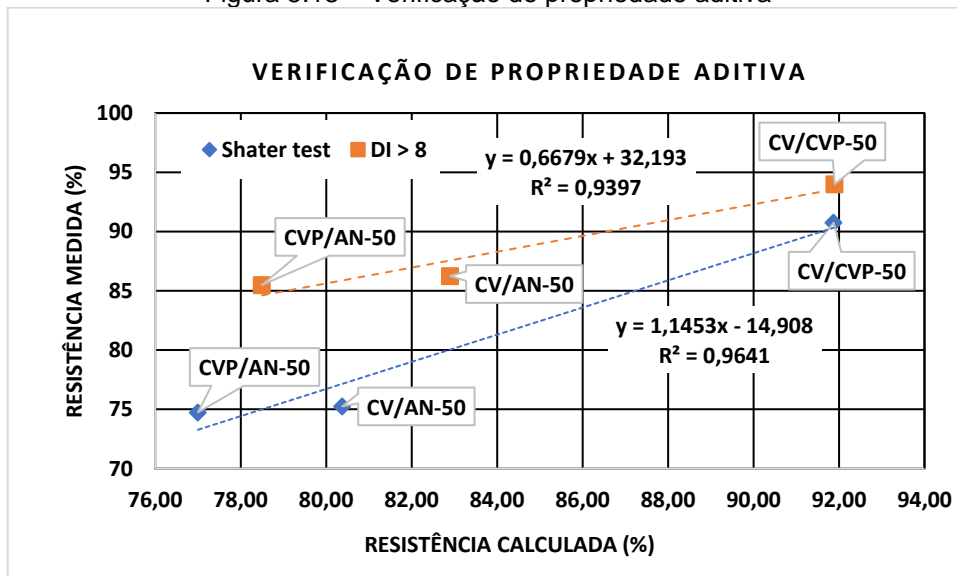
Tabela 5.5 – Resistências medidas x resistências estimadas

Resistências à Queda e a Frio				
Amostras	Medido		Estimado	
	<i>Shatter Test</i>	DI > 8	<i>Shatter Test</i>	DI > 8
CV/CVP-50	90,75	94,00	91,88	91,90
CV/AN-50	75,25	86,25	80,38	82,90
CVP/AN-50	74,75	85,50	77,00	78,50

Fonte: Próprio autor (2025)

A partir dos valores apresentados na Tabela 5.5, a fim de se verificar a ocorrência de propriedade aditiva nos ensaios, conforme apresentado na Figura 5.13, plotou-se as curvas (resistências à queda e a frio) relacionando os resultados medidos e os resultados estimados. E, dessa forma, notou-se que os ensaios *shatter test* e *drum index* podem ser definidos como ensaios capazes de manifestar as características individuais de cada matéria-prima utilizada nas amostras (verificou-se a ocorrência de propriedade aditiva), uma vez que os coeficientes de determinação gerados apresentaram-se capazes de explicar mais de 90% dos pontos plotados (para ambos os ensaios) e, dessa forma, em ambos os casos encontrou-se boas equações de predição. Assim, em análises futuras, haverá a possibilidade de se estimar (com boa precisão), por meio da equação 5.1, os valores de resistência à queda e a frio para amostras que contenham *small coke*, carvão vegetal, coque verde de petróleo e/ou antracito.

Figura 5.13 – Verificação de propriedade aditiva



Fonte: Próprio autor (2025)

5.3.3 Comparação entre as cargas termorreduzidas avaliadas

O Quadro 5.1, conforme discutido ao longo do trabalho, apresenta uma comparação geral entre as cargas termorreduzidas avaliadas, a fim de se resumir as constatações observadas, bem como classificar os desempenhos apresentados por cada amostra em cada caracterização.

Quadro 5.1 – Comparação entre as cargas termorreduzidas avaliadas neste trabalho

Amostras	Caracterizações	Principais Resultados	Conclusão
SC	Física: <i>Shatter Test</i> e <i>Drum Index</i> .	SI= 97,50%; DI > 8= 97,80%; DI < 1= 0,85%.	A amostra de referência apresentou-se em conformidade com o que se esperava para tal combustível.
	Química: Análise Imediata e Análise de Enxofre.	MV = 0,77%; Cz = 8,19%; CF = 91,04%; Enxofre = 0,71%.	A amostra de referência apresentou-se em conformidade com o que se esperava para tal combustível.
CV-50	Física: <i>Shatter Test</i> e <i>Drum Index</i> .	SI= 95,25%; DI > 8= 96,30%; DI < 1= 0,80%.	Apresentou o melhor desempenho.
	Química: Análise Imediata e Análise de Enxofre.	MV = 13,24%; Cz = 5,49%; CF = 81,11%; Enxofre = 0,41%.	Apresentou o quarto melhor desempenho, de maneira geral.
CVP-50	Física: <i>Shatter Test</i> e <i>Drum Index</i> .	SI= 88,50%; DI > 8= 87,50%; DI < 1= 3,75%.	Apresentou o terceiro melhor desempenho.
	Química: Análise Imediata e Análise de Enxofre.	MV = 5,16%; Cz = 3,93%; CF = 90,91%; Enxofre = 0,71%.	Apresentou o melhor desempenho, de maneira geral.
AN-50	Física: <i>Shatter Test</i> e <i>Drum Index</i> .	SI= 65,50%; DI > 8= 69,50%; DI < 1= 15,50%.	Apresentou o pior desempenho.
	Química: Análise Imediata e Análise de Enxofre.	MV = 3,76%; Cz = 19,02%; CF = 77,22%; Enxofre = 0,64%.	Apresentou o pior desempenho, de maneira geral.
CV/CVP-50	Física: <i>Shatter Test</i> e <i>Drum Index</i> .	SI= 90,75%; DI > 8= 94,00%; DI < 1= 1,75%.	Apresentou o segundo melhor desempenho.
	Química: Análise Imediata e Análise de Enxofre.	MV = 8,00%; Cz = 8,42%; CF = 83,58%; Enxofre = 0,59%.	Apresentou o terceiro melhor desempenho, de maneira geral.
CV/AN-50	Física: <i>Shatter Test</i> e <i>Drum Index</i> .	SI= 75,25%; DI > 8= 86,25%; DI < 1= 5,80%.	Apresentou o quarto melhor desempenho
	Química: Análise Imediata e Análise de Enxofre.	MV = 6,92%; Cz = 11,65%; CF = 81,43%; Enxofre = 0,56%.	Apresentou o quinto melhor desempenho, de maneira geral.
CVP/AN-50	Física: <i>Shatter Test</i> e <i>Drum Index</i> .	SI= 74,75%; DI > 8= 85,50%; DI < 1= 7,00%.	Apresentou o quinto melhor desempenho
	Química: Análise Imediata e Análise de Enxofre.	MV = 4,90%; Cz = 9,47%; CF = 85,63%; Enxofre = 0,68%.	Apresentou o segundo melhor desempenho, de maneira geral.
<i>Small Coke</i>	Física: Resistência à Compressão.	Tensão de ruptura= 11,08 MPa.	A amostra de referência apresentou-se em conformidade com o que se esperava para tal combustível.
Carvão Vegetal	Física: Resistência à Compressão.	Tensão de ruptura= 2,25 MPa.	Apresentou o melhor desempenho.
CVP	Física: Resistência à Compressão.	Tensão de ruptura= 0,26 MPa.	Apresentou baixíssima resistência à Compressão.
Antracito	Física: Resistência à Compressão.	Tensão de ruptura= 0,08 MPa.	Apresentou baixíssima resistência à Compressão.

Fonte: Próprio autor (2025)

6. CONCLUSÕES

As amostras CV-50 e CV/CVP-50 apresentaram respostas mais satisfatórias nos ensaios físicos (desconsiderando a amostra SC, utilizada somente como referência), caracterizando-se por alta resistência à queda e a frio. Tais características foram associadas à presença de carvão vegetal, que, no ensaio individual de resistência à compressão, apresentou o melhor resultado dentre os combustíveis avaliados neste trabalho (desconsiderando o *small coke*). Por outro lado, a amostra AN-50 apresentou os piores desempenhos, caracterizando-se por baixa resistência à queda e a frio, o que foi associado à presença de antracito na amostra, combustível que também apresentou o pior desempenho na análise individual de resistência à compressão.

A caracterização física indicou, ainda, a possibilidade de correlacionar os resultados obtidos nos ensaios físicos, uma vez que as equações de predição geradas indicaram coeficientes de determinação (R^2) capazes de permitir que os parâmetros utilizados na caracterização física deste trabalho sejam estimados com considerável precisão e, assim, em análises futuras haverá a possibilidade de se estimar a resistência à compressão a partir da resistência à queda, por exemplo. Além disso, a verificação de propriedade aditiva nos ensaios físicos indicou que o *shatter test* e o *drum index* podem ser definidos como ensaios que manifestam as características individuais de cada matéria-prima utilizada nas amostras ensaiadas e, dessa forma, em análises futuras, haverá a possibilidade de se estimar (com considerável precisão), por meio da equação 5.1, os valores de resistência à queda e a frio para amostras que contenham *small coke*, carvão vegetal, coque verde de petróleo e/ou antracito em sua composição.

A análise imediata das amostras, desconsiderando a amostra SC, apontou um melhor desempenho associado à amostra CVP-50, caracterizando-se por alto teor de carbono fixo combinado com baixo teor de cinzas. A análise imediata indicou, ainda, um pior desempenho relacionado à amostra AN-50, caracterizando-se por baixo teor de carbono fixo combinado com alto teor de cinzas. A análise de enxofre, por sua vez, apontou um melhor desempenho associado à amostra CV-50, caracterizando-se por baixo teor de enxofre. Tal análise indicou, também, um pior desempenho relacionado à amostra CVP-50, que apresentou o maior teor de enxofre dentre as amostras testadas. Contudo, tal resultado não deve ser tratado como desastroso, uma vez que

se demonstrou coerente com os valores observados para o *small coke*, bem como para a amostra SC (referência). Logo, de maneira geral, a análise química das amostras indicou a amostra CVP-50 como a de melhor desempenho, assim como a amostra AN-50 como a de pior desempenho.

Sendo assim, devido à relevância da análise química no julgamento das amostras (associada a bons resultados na análise física), a caracterização físico-química indicou um melhor desempenho associado à amostra CVP-50, responsável por apresentar os melhores resultados na caracterização química, bem como o terceiro melhor desempenho na caracterização física. E, dessa forma, tal amostra pode ser indicada, dentre as amostras testadas, como a de maior potencial para uso como complemento ao *small coke* em altos-fornos a coque, tendo sido demonstrado pelos resultados a viabilidade técnica da substituição (desde que matéria volátil seja avaliada), bem como a possibilidade de redução nos impactos ambientais na rota integrada a coque. Além disso, a substituição do *small coke* pela carga termorreductora CVP-50 representa menor percentual de cinzas no AF, o que indica menor geração de escória, bem como menor demanda de coque metalúrgico, levando a possíveis ganhos financeiros também.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- a) Analisar a viabilidade prática e a viabilidade econômica relacionadas à produção e utilização da amostra CVP em usinas siderúrgicas integradas a coque;
- b) Realizar um estudo pautado em analisar a relação custo x emissão de GEE's da amostra CVP;
- c) Submeter as amostras propostas a ensaios de outras naturezas, como ensaios térmicos, por exemplo;
- d) Analisar os efeitos causados por uma alteração nas proporções sugeridas em cada amostra;
- e) Desenvolver um briquete utilizando biomassa e compará-lo à carga termorreductora CVP.

REFERÊNCIAS

AGRA, Anderson Azevedo. **Estudo da produção e desempenho de coques altamente reativos contendo resíduos siderúrgicos com foco no aumento de eficiência e mitigação de emissão do alto-forno**. Tese (doutorado em engenharia de minas, metalúrgica e de materiais). 172 p. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2023. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/266123>>. Acesso em: 12 abr. 2024.

Alencar, Jean Philippe Santos Gjerardi de; Parreira, Ângelo Guimarães; Oliveira, Vinícius de Moraes; Wagner, Debora Turon; Ricardo, Márcio Antônio. **Propriedades a altas temperaturas de cargas mistas: Minério – Small Coke e Minério – HBI. 43º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas**. 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil. Disponível em: <<https://abmproceedings.com.br/ptbr/article/download-pdf/propriedades-a-altas-temperaturas-de-cargas-mistas-minrio-small-coke-e-minrio-hbi>>. Acesso em: 13 abr. 2024.

ALVES, Felipe Inácio Cunha. **Produção de coque metalúrgico a partir de carvão densificado por vibrocompactação em forno de soleira aquecida**. Dissertação (mestrado em engenharia de materiais). 77 p. Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2017. Disponível em: <<https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/7432>>. Acesso em: 09 abr. 2024

ALVES, José Luiz Sendim. **Diagnóstico do tratamento e reuso de efluentes de coqueria por meio de técnicas estatísticas de análise multivariada**. Dissertação (mestrado em engenharia mecânica). 151 p. Universidade Santa Cecília. Santos, 2016. Disponível em: <https://unisanta.br/arquivos/mestrado/mecanica/dissertacoes/Dissertacao_Jose_Luiz.pdf>. Acesso em: 06 abr. 2024.

ASSIS, Carlos Frederico Campos de. **Caracterização de carvão vegetal para a sua injeção em altos-fornos a carvão vegetal de pequeno porte**. Dissertação (mestrado em engenharia de materiais). 132 p. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2008. Disponível em: <<https://repositorio.ufop.br/handle/123456789/2639>>. Acesso em 21 mar. 2024.

ASTM D-3172-13. **Standard Practice for Proximate Analysis of Coal and Coke**. (Reaprovada). p. 1-2. 2021.

ASTM D-3173-03. **Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke**. p. 1-3. 2003.

ASTM D-3174-04. **Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal.** p.1-5. 2004c.

ASTM D-3175-07. **Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke.** p. 1-5. 2007a.

ASTM D-3177-02. **Standard Test Methods for Total Sulfur in the Analysis Sample of Coal and Coke.** p. 1-4. 2002.

BARBIERI, Cláudia Caroline Teixeira. **Estudos de misturas de carvões e biomassa visando a combustão em alto-forno.** Dissertação (mestrado em engenharia de minas, metalúrgica e de materiais). 134 p. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2013. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/76177>>. Acesso em: 17 mar. 2024.

BERNASOWSKI, Mikolaj; KLIMCZYK, Arkadiusz; STACHURA, Ryszard. Calculation of coke layers situation in the cohesive zone of blast furnace. **Materials**, v. 14, n. 1, p. 192, 2021. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1944/14/1/192>>. Acesso em: 11 ago. 2024.

Braga, João Ricardo Denicolo; Oliveira, Iara Patricia Vieira de; Moura, Lorena Cristina Amorim; Silva, Guilherme Liziero Ruggio da; Assis, Paulo Santos; Lemos, Leandro Rocha. Estudo da influência da adição de cal e pellet-feed sobre a reatividade do small-coke ao CO₂. **49° Seminário de Redução de Minérios e Matérias-primas**, 2019, São Paulo, SP, Brasil. Disponível em: <<https://abmproceedings.com.br/ptbr/article/download-pdf/estudo-da-influencia-da-adicao-de-cal-e-pellet-feed-sobre-a-reatividade-do-small-coke-ao-co2>>. Acesso em: 16 abr. 2024.

BRITO, José Otávio. Carvão vegetal no Brasil: gestões econômicas e ambientais. **Estudos avançados**, v. 4, p. 221-227, 1990. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/ea/a/YcDzd6q3pswcyzxFwJyNLfq/>>. Acesso em: 06 abr. 2024.

CARVALHIDO, Adriano Cesar. **Utilização do coque verde de petróleo sob a forma de small no alto-forno.** Dissertação (mestrado em engenharia metalúrgica, materiais e de minas). 46 p. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2019. Disponível em: <<https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/34117>>. Acesso em: 17 mar. 2024.

CARVALHO, Pedro Sérgio Landim de; MESQUITA, Pedro Paulo Dias; MELO, Luciane Paiva d'Ávila. **Siderurgia**. 2016. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/7210/2/Siderurgia_P.pdf>. Acesso em: 16 mar. 2024.

CASTRO, Alex André de. **Avaliação de propriedades em altas temperaturas de pelotas para alto-forno**. Dissertação (mestrado em engenharia de materiais). 125 p. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2006. Disponível em: <<https://repositorio.ufop.br/handle/123456789/2650>>. Acesso em: 23 mar. 2024.

CASTRO, Amilton Feliciano de. **Análise do sistema de reagentes na flotação de finos de carvão mineral de moazite, Moçambique**. Dissertação (mestrado em engenharia de minas, metalúrgica e de materiais). 104 p. Universidade Federal do Rio grande do Sul. Porto Alegre, 2016. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/150515>>. Acesso em: 22 mar. 2024.

CAVALIERO, Carla Kazue Nakao; JANNUZZI, G. M. A Injeção de Combustível Auxiliar em Alto-Forno como Medida de Redução das Emissões de CO₂ do Segmento Siderúrgico Nacional: Estudo de Casos na ACESITA E COSIPA. **SEMINÁRIO DE ENERGIA, XXI SEMINÁRIO DE BALANÇOS ENERGÉTICOS GLOBAIS E UTILIDADES**, n. 21, 1999. Disponível em: <<https://old.foundrygate.com/upload/artigos/A%20inje%C3%A7%C3%A3o%20de%200combust%C3%ADvel%20auxiliar%20em%20alto%20forno.pdf>>. Acesso em: 16 mar. 2024.

CGEE. **Siderurgia no Brasil 2010–2025: subsídios para tomada de decisão**. Brasília: CGEE, 2010. 116p. Disponível em: <https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/Siderurgia_no_Brasil__9567.pdf/893da7ee-8608-4251-adc1-10c2bf95b009?version=1.0>. Acesso em: 17 mar. 2024.

CORÁ, Rogério. **Aspectos técnicos e ambientais do uso do carvão mineral em caldeiras**. Dissertação (mestrado em engenharia mecânica). 146 p. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2006. Disponível em: <<https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/3198>>. Acesso em: 22 mar. 2024.

COSTA, Luiz Cláudio. **Parâmetros de controle do processo de coqueificação das baterias de fornos de coque da COSIPA**. Dissertação (mestrado em engenharia elétrica). 89 p. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3140/tde-02062008-161728/en.php>>. Acesso em: 06 abr. 2024.

COSTA, Tattiane Gomes; Bianchi, Maria Lúcia; Protássio, Thiago de Paula; Trugilho, Paulo Fernando; Pereira, Ariclene Júnior. **Qualidade da madeira de cinco espécies**

de ocorrência no cerrado para produção de carvão vegetal. Cerne, v. 20, p. 37-46, 2014. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/cerne/a/r6TRK6hJTSDkM5scsJQn4HR/?lang=pt>>. Acesso em: 7 dez. 2024.

EIBEL, Eliana; PINHEIRO, Rosa Beatriz Madruga. Crédito de carbono. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 4, n. 2, p. 588-601, 2016. Disponível em: <https://portaldeperiodicos.animaeducacao.com.br/index.php/gestao_ambiental/articloe/view/3226>. Acesso em: 23 mar. 2024.

FERNANDES, Diego Canez. **Adição de óleo para aumento da densidade de carga de carvões na coqueria.** Dissertação (mestrado em engenharia metalúrgica, materiais e de minas). 76 p. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2019. Disponível em: <<https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/30830>>. Acesso em: 09 abr. 2024.

FLORES, Bruno Deves; GUERRERO, Adrià; BORREGO, Angeles Gomez; DÍEZ, Maria Antonia; OSÓRIO, Eduardo; VILELA, Antônio Cezar Faria. Comportamento de carbonização de briquetes de ferro-coque. **2º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro**, 2014, Belo Horizonte. Anais dos Seminários de Redução, Minério de Ferro e Aglomeração. São Paulo: Editora Blucher, 2014. p. 580-591. Disponível em: <<https://abmproceedings.com.br/en/article/download-pdf/comportamento-de-carbonizacao-de-briquetes-de-ferro-coque>>. Acesso em: 16 abr. 2024.

GANDRA, Beatriz Fausta; REIS, Henriquison Magela Bottrel; FERNANDES, Mauro Vivaldino. Análise do Efeito de Diferentes Combustíveis na Condição de Small em Altos-Fornos. **45º Ironmaking/16º Iron Ore/3º Agglomeration**, p. 56-66, 2015. Disponível em: <<https://www.academia.edu/download/83930287/analise-do-efeito-de-diferentes-combustiveis-na-condicao-de-small-em-altos-fornos.pdf>>. Acesso em: 16 abr. 2024.

GAVEL, Dharm Jeet. A review on nut coke utilisation in the ironmaking blast furnaces. **Materials Science and Technology**, v. 33, n. 4, p. 381-387, 2017. Disponível em: <<https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1080/02670836.2016.1183073>>. Acesso em: 12 abr. 2024.

GEERDES, Maarten; TOXOPEUS, Hisko; VILET, Cor Van der. **Modern blast furnace ironmaking : na introduction.** Stahl Eisen. 2004.

GUPTA, R. C. **Fuels, furnaces and refractories.** PHI Learning Pvt. Ltd., 2016.

JIS M8711: **Test Method for Determination of Shatter Strength of Iron Ore Sinter**. 1987.

JIS k2151: **Methods for Determination of Drum Indices**. 2004.

KURAUCHI, Martim Hideki Nakayama. **Uma abordagem de ensaio de resistência mecânica de carvão vegetal**. Dissertação (mestrado em engenharia metalúrgica e de materiais). Universidade de São Paulo. São Paulo, 2014. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-28042015-110831/en.php>>. Acesso em: 16 dez. 2024.

MACHADO, André da Silveira. **Quantificação do teor de char e finos de coque no pó de balão do alto-forno por difração de raios-X**. Dissertação (mestrado em engenharia de minas, metalúrgica e de materiais). 139 p. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2011. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/32008>>. Acesso em: 16 mar. 2024.

MOURÃO, Marcelo Breda; YOKOJI, Akira; MALYNOWSKY, Antonio; LEANDRO, César Alves da Silva; TAKANO, Cyro; QUITES, Eduardo Emery Cunha; GENTILE, Erberto Francisco; SILVA, Guilherme F.B. Lenz e; BOLOTA, José Roberto; GONÇALVES, Marcelo; FACO, Rubens José. **Introdução à siderurgia**. ABM, 2007. Disponível em: <<https://repositorio.usp.br/item/001584919>>. Acesso em: 28 mar. 2024.

NOMURA, Seiji; TERASHIMA, Hidetoshi; SATO, Eiji; NAITO, Masaaki. Some fundamental aspects of highly reactive iron coke production. **ISIJ international**, v. 47, n. 6, p. 823-830, 2007. Disponível em: <https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational/47/6/47_6_823/_article/-char/ja/>. Acesso em: 15 abr. 2024.

OLIVEIRA, Iara Patricia Vieira de; SILVA, Guilherme Liziero Ruggio da; MOURA, Lorena Cristina Amorim; ASSIS, Paulo Santos. Avaliação da resistência mecânica à compressão no coque, p. 3280-3291. In: **72nd ABM Annual Congress**, São Paulo, 2017. Disponível em: <<https://abmproceedings.com.br/ptbr/article/avaliacao-da-resistencia-mecanica-a-compressao-no-coque>>. Acesso em: 16 dez. 2024.

PEREIRA, Flávia Alves. **Efeito da granulometria e de aglutinantes nas propriedades de briquetes de finos de carvão vegetal**. Dissertação (mestrado em ciência florestal). 66 p. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2009. Disponível em: <<https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/3027/1/texto%20completo.pdf>>. Acesso em: 29 mar. 2024.

PEREIRA, Priscilla Messias. **Influência do antracito adicionado à mistura de pelotização sobre as características físicas das pelotas queimadas**. Dissertação (mestrado em engenharia metalúrgica, materiais e de minas). 95 p. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2016. Disponível em: <<https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUBD-AC8GGB>>. Acesso em: 07 dez. 2024.

Petrobrás. Coque verde de petróleo: informações técnicas. **Assistência técnica**, 2019. Disponível em: <<https://petrobras.com.br/quem-somos/assistencia-tecnica>>. Acesso em: 17 abr. 2024.

RIZZO, Ernandes Marcos da Silveira. **Processo de Fabricação de Ferro-Gusa em Alto-Forno**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2009. 278p.

SILVA, Guilherme Liziero Ruggio da. **Utilização de moinha de biorredutor e pneu inservível na produção de coque metalúrgico**. Tese (doutorado em engenharia de materiais). 188 p. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2016. Disponível em: <<https://repositorio.ufop.br/handle/123456789/7317>>. Acesso em: 16 mar. 2024.

SILVA, Guilherme Liziero Ruggio da. **Otimização da mistura de carvões na produção de coque metalúrgico**. Dissertação (mestrado em engenharia de materiais). 173 p. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2011. Disponível em: <<https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/2548>>. Acesso em: 22 mar. 2024.

SILVA, Odilon José da. **Caracterização tecnológica de carvões para coqueria**. Dissertação (mestrado em engenharia de materiais). 90 p. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2008. Disponível em: <<https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/3005>>. Acesso em: 06 abr. 2024.

SONG, Qingshi. **Effect of nut coke on the performance of the ironmaking blast furnace**. PhD thesis (doctoral in mechanical, maritime and materials engineering). 159 p. Delft University of Technology. 2013. Disponível em: <<https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:c774c99c-2f40-48bb-852a-c8cb4e77d7d2>>. Acesso em: 12 abr. 2024.

VASCONCELOS, Rodrigo Figueiredo. **Antracitos eletricamente calcinados no tratamento de efluentes contaminados com naftaleno em coluna de leito fixo**. Dissertação (mestrado em engenharia de desenvolvimento sustentável). 93 p. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2021. Disponível em: <https://sappg.ufes.br/tese_drupal/tese_15580_Disserta%E7%E3o%20Mestrado%2>

0_%20Rodrigo%20Figueiredo%20Vasconcelos%20%281%29.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2024.

VIANA FILHO, Olney Amorim. **Estudo para o uso de matérias-primas nacionais em misturas de carvões para obtenção de coque com características requeridas em altos-fornos de alta produtividade**. Dissertação (mestrado em engenharia metalúrgica, materiais e minas). 127 p. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2007. Disponível em: <<https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/MAPO-7RCHR7>>. Acesso em: 16 mar. 2024.