



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE ANANINDEUA
FACULDADE DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

DANIEL COSTA MARTINS SEABRA

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE SÍNTER DE FINOS DO MINÉRIO DE
FERRO COM A UTILIZAÇÃO DE 8% DO COQUE E 12% DA CAREPA DE
LAMINAÇÃO**

ANANINDEUA/PA

2021

DANIEL COSTA MARTINS SEABRA

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE SÍNTER DE FINOS DO MINÉRIO DE
FERRO COM A UTILIZAÇÃO DE 8% DO COQUE E 12% DA CAREPA DE
LAMINAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade
Federal do Pará, em cumprimento as exigências para
a obtenção do Grau de Bacharel em Ciência e
Tecnologia – Ênfase em Tecnologia Mineral.

Orientador: Prof. Me. Alacid do S. Siqueira Neves.

Coorientadora: Ma. Brenda T. Figueira Daniel.

ANANINDEUA/PA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S438p Seabra, Daniel Costa Martins.
PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE SÍNER DE
FINOS DO MINÉRIO DE FERRO COM A UTILIZAÇÃO DE 8%
DO COQUE E 12% DA CAREPA DE LAMINAÇÃO / Daniel
Costa Martins Seabra. — 2021.
65 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Me. Alacid do Socorro Siqueira Neves
Coorientador(a): Prof^a. MSc. Brenda Thayssa Figueira Daniel
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade
Federal do Pará, Campus Universitário de Ananindeua, Curso de
Ciência e Tecnologia, Ananindeua, 2021.

1. síner. 2. resíduo siderúrgico. 3. carepa de laminação. 4.
coque. 5. sinterização. I. Título.

CDD 669.1

DANIEL COSTA MARTINS SEABRA

PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE SÍNTER DE FINOS DO MINÉRIO DE FERRO COM A UTILIZAÇÃO DE 8% DO COQUE E 12% DA CAREPA DE LAMINAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal do Pará, em cumprimento as exigências para a obtenção do Grau de Bacharel em Ciência e Tecnologia – Ênfase em Tecnologia Mineral.

Data da Avaliação: 07/10/2021

Conceito: Excelente

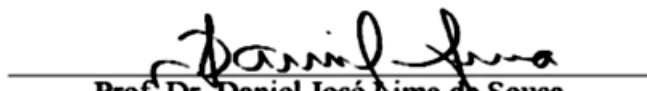
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Me. Alacid do Socorro Siqueira Neves
(FEMAT – UFPA – Campus Ananindeua – Orientador)



Ma. Brenda Thayssa Figueira Daniel
(PPGEM – ITEC – UFPA – Coorientadora)



Prof. Dr. Daniel José Lima de Sousa
(FACT – UFPA – Campus Ananindeua – Membro)



Prof. Dr. Silvio Bispo do Vale
(FACT – UFPA – Campus Ananindeua – Membro)

ANANINDEUA/PA

2021

Dedico este trabalho a Deus, a Nossa Senhora de Nazaré, a Santa Rita de Cássia e a São Tarcísio, a meus familiares, amigos e a todos que colaboraram em minha formação pessoal e acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus e a Nossa Senhora de Nazaré, por atenderem aos meus pedidos de oração para compreender os assuntos estudados e experimentos realizados a fim de concluir este trabalho, agradeço também a Santa Rita de Cássia e São Tarcísio, que me ajudaram e intercederam junto a Jesus nos momentos de dificuldade, não me deixando desistir e tendo sempre a coragem e motivação ao longo do meu curso, bem como em minha vida. Ao Espírito Santo, que me concedeu o dom da sabedoria e inteligência, para que eu pudesse compreender assuntos que iam além do meu entendimento.

A meus familiares pelo apoio, compreensão e carinho, em especial a minha mãe Doralice Martins e ao meu tio e padrinho Antônio Carlos, que me concederam sempre a melhor educação e me ajudaram com suas orações e sermões, me dando forças para continuar e jamais desistir. A minha tia Nila Modesto e seu marido Otton Modesto (*In memoriam*) que cuidaram de mim como se fossem meus pais, e custearam todos os meus estudos e sempre buscaram me oferecer o melhor, me dando condições de correr atrás dos meus sonhos, dando conselhos e sempre rezando por mim para que eu jamais me desviasse do caminho e nunca desistisse. A minha madrinha Mayara Modesto e meu primo Marco Modesto pelos conselhos de como levar uma boa graduação. A meus padrinhos Silvia Miranda e Adalberto Soares, pelos incentivos de oração e aconselhamento, com o intuito de ser perseverante em minhas escolhas e conquistas.

Aos meus amigos de graduação e da igreja, que me ajudaram a rir nos momentos de tristeza e que me deram palavras de conforto quando precisei, que estiveram comigo nas apresentações de trabalhos, experimentos e em minha vida pessoal. A Rafaela Farinha, minha parceira de laboratório e a técnica do LEQ (Laboratório de Engenharia Química) Jamilly, que me ajudaram nas etapas experimentais e de pesquisa, sempre me auxiliando a buscar as melhores formas de alcançar meus resultados.

Ao professor Dr. Reginaldo Sabóia, que me concedeu a oportunidade de participar do projeto de Associação dos Indígenas, ao qual pude adquirir muitos conhecimentos, que com toda certeza serão de grande serventia em minha vida profissional. Ao Professor Dr. Daniel Lima pelos ensinamentos e conselhos, assim como pelas oportunidades de realização de trabalhos e pesquisas em outros laboratórios. Ao Professor Dr. Deibson Costa, pela ajuda com alguns materiais necessários ao trabalho, assim como seus conselhos para melhorar minha vida acadêmica.

Ao meu Orientador Professor Msc. Alacid Neves e minha Coorientadora Bel. Brenda Daniel, que me acolheram como orientando e estiveram ao meu lado em todos os processos de

realização desde trabalho, me aconselhando e sempre buscando as melhores formas de realizar os processos de pesquisa e experimentação, tendo o apoio e incentivo dos mesmos, aos quais tiveram muitos puxões de orelha e várias correções, mas que sem dúvida alguma foram necessárias para chegar onde estou, graças a todos estes ensinamentos e incentivos pude evoluir em minha vida acadêmica e profissional.

Ao corpo docente e técnico da Faculdade de Ciência e Tecnologia, em especial ao Secretário Josivan Franca, por sempre me ajudar nos processos de documentação da faculdade, buscando todos os meios de resolução dos problemas e ao Erik André, por me ajudar nas formatações de vários trabalhos realizados, inclusive este.

A empresa SINOBRAS por fornecer as matérias-primas para realização dos experimentos. Aos laboratórios de análise da UFPA e IFPA, que ajudaram na caracterização das amostras para concluir este trabalho.

Deixo meu agradecimento a todos os colaboradores que ajudaram de forma direta ou indiretamente a desenvolver e concretizar este trabalho.

RESUMO

O processo de sinterização consiste em aglomerar os finos do minério de ferro, incorporando outros materiais, como finos de calcário calcítico e moinha de carvão vegetal. Portanto, este trabalho aborda uma temática ambiental que visa reaproveitar resíduos que, em alguns casos são degradantes ao meio ambiente, como é caso da carepa de laminação. Sendo assim, este estudo de sinterização tem por objetivo utilizar 8% de coque no lugar do carvão vegetal, combustível mais utilizado nas siderúrgicas do Estado do Pará, bem como utilizar 12% da carepa como parte da matéria-prima do processo. Para a produção do sínter, foi realizado o ensaio do teor de umidade ótima, para determinar a umidade ideal na produção das micropelotas utilizadas como carga em um reator vertical de leito fixo. Na verificação dos parâmetros de qualidade, após a produção, foram realizadas análises de MEV/EDS, DRX, FRX e tamboreamento. O sínter obtido apresentou resultados satisfatórios em relação a adição de carepa e coque, tendo uma boa qualidade tanto em sua estrutura quanto em sua resistência, estando de acordo com as informações inferidas na literatura e sendo, portanto, adequadas ao processo de obtenção do ferro-gusa.

Palavras-chave: sínter; resíduo siderúrgico; carepa de laminação; coque; sinterização.

ABSTRACT

The sintering process consists in agglomerating iron ore fines, incorporating other materials, such as limestone fines and charcoal grind. Therefore, this work addresses an environmental issue that aims to reuse waste that, in some cases, are degrading to the environment, as is the case of mill scale. Therefore, this sintering study aims to use 8% of coke in place of charcoal, the most used fuel in steel mills in the State of Pará, as well as to use 12% of the mill scale as part of the raw material of the process. For the production of sinter, the optimum moisture content test was performed, to determine the ideal moisture for the production of the micropellets used as load in a vertical fixed bed reactor. In the verification of the quality parameters, after production, MEV/EDS, DRX, FRX and tumbling analyses were performed. The sinter obtained presented satisfactory results in relation to the addition of scale and coke, with good quality both in structure and strength, in accordance with the information inferred in the literature and therefore suitable for the process of obtaining pig iron.

Keywords: sinter; steelmaking residue; mill scale; coke; sintering.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração dos três tipos de produtos na siderurgia.	18
Figura 2 – Calcário calcítico.....	19
Figura 3 – Carepa de laminação.....	20
Figura 4 – Coque.....	21
Figura 5 – Falsa grelha ou <i>Bedding</i> de sínter.....	22
Figura 6 – Processo de briquetagem.....	23
Figura 7 – Representação esquemática de um material poroso não saturado.	23
Figura 8 – Estágios de formação das micropelotas.....	25
Figura 9 – Processo de sinterização no reator vertical de leito fixo.....	26
Figura 10 – Análise microestrutural do sínter 1 (a) e 2 (b).	28
Figura 11 – Análise por MEV/EDS do sínter.....	29
Figura 12 – Análise DRX do sínter 1 (a) e 2 (b).	30
Figura 13 – Fluxograma das etapas e processos experimentais.	33
Figura 14 – Montagem do reator vertical de leito fixo.....	34
Figura 15 – Anemômetro.....	34
Figura 16 – Etapas principais da sinterização.	35
Figura 17 – Equipamento para o processo de ignição acoplado ao reator de leito fixo.	35
Figura 18 – Equipamento para medição da temperatura <i>Paperless Recorder</i> tipo PHL.....	36
Figura 19 – Matérias-primas: (a) FMF, (b) FCC, (c) CL e (d) coque.	37
Figura 20 – (a) britagem da amostra de coque e (b) moinho de disco para redução granulométrica.....	38
Figura 21 – Processo de peneiramento do coque: (a) peneiras de malha na unidade <i>mesh</i> Tyler, (b) agitador RO-TAP e (c) peneiras sobre o agitador.....	39
Figura 22 – Separação e secagem das matérias-primas.....	40
Figura 23 – Utilização do pelletizador na mistura das matérias-primas.	41
Figura 24 – Micropelotização das matérias-primas.....	41
Figura 25 – (a) Falsa grelha e (b) abastecimento com a carga.	42
Figura 26 – Processo de sinterização.....	42
Figura 27 – Fluxograma das etapas de caracterização das amostras de sínter.....	43
Figura 28 – Micropelotas: (a) produção para o sínter 1 e (b) produção para o sínter 2.	45
Figura 29 – Produção dos sínteres: (a) sínter 1 e (b) sínter 2.....	47
Figura 30 – Micrografia do sínter 1.....	48

Figura 31 – Micrografia do sínter 2.....	49
Figura 32 – Análise MEV/EDS do sínter 1.....	50
Figura 33 – Análise MEV/EDS do sínter 2.....	51
Figura 34 – DRX do FMF.	54
Figura 35 – DRX do FCC.....	54
Figura 36 – DRX da CL.	55
Figura 37 – DRX do coque.....	55
Figura 38 – DRX do sínter 1.	56
Figura 39 – DRX do sínter 2.	56
Figura 40 – Gráfico com resultado do teste de tamboreamento do sínter 1 e 2.	57
Figura 41 – Resultado do tamboreamento: (a) sínter 1 e (b) sínter 2.....	58
Figura 42 – Gráfico do rendimento do sínter.	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Teste do teor de umidade ótima.....	24
Tabela 2 – Umidade ótima para formação de micropelotas à produção de sínter.....	24
Tabela 3 – FRX das amostras de sínter 1 e 2.....	30
Tabela 4 – Materiais e equipamentos utilizados no processo de sinterização.....	32
Tabela 5 – Análise granulométrica do coque.	44
Tabela 6 – Velocidade do ar para sinterização.....	46
Tabela 7 – Comparação dos resultados das amostras de sínter.	51
Tabela 8 – FRX das matérias-primas e sínteres.....	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FMF – Fino de Minério de Ferro

FCC – Fino de Calcário Calcítico

MCV – Moinha de Carvão Vegetal

CL – Carepa De Laminação

PF – Perda ao fogo

MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura

EDS – Espectrometria de Energia Dispersiva de Raios-X

FRX – Espectrometria de fluorescência de raios X

DRX – Difração de Raios X

CaO – Óxido de Cálcio

CaCO₃ – Carbonato de Cálcio

Ca(OH)₂ – Hidróxido de Cálcio

CO – Monóxido de Carbono

CO₂ – Dióxido de Carbono

MgO – Óxido de Magnésio

MgCO₃ – Carbonato de Magnésio

MgFe₂O₄ – Magnésio-ferrita

CaMg(CO₃)₂ – Dolomita

FeO – Óxido de Ferro/Wustita

Fe₂O₃ – Óxido de Ferro (III)/Hematita

Fe₃O₄ – Óxido de Ferro (II, III)/Magnetita

Al₂O₃ – Óxido de Alumínio

SiO₂ – Dióxido de Silício/Quartzo

P₂O₅ – Pentóxido de Fósforo

SO₃ – Trióxido de enxofre

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivos.....	17
1.1.1	Geral.....	17
1.1.2	Específicos.....	17
1.2	Justificativa.....	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	Materiais para a produção do sinter.....	18
2.1.1	Fino de minério de ferro – F.M.F	18
2.1.2	Fino de calcário calcítico – F.C.C.....	19
2.1.3	Carepa de laminação – C.L.....	19
2.1.4	Coque	20
2.1.5	Falsa grelha (<i>bedding</i>)	21
2.2	Processos de aglomeração	22
2.2.1	Pelotização.....	22
2.2.2	Briquetagem.....	22
2.2.3	Sinterização.....	23
2.2.3.1	Difusão em meio poroso.....	23
2.2.3.2	Micropelotização	24
2.2.3.3	Processo de sinterização	25
2.3	<i>Packed-Bed Reactor</i> – Reator vertical de leito fixo	26
2.4	Reações na sinterização.....	26
2.5	Caracterizações físico-químicas e mecânicas do sinter	27
2.5.1	Microscópio eletrônico de varredura e Espectroscopia de raios-X por dispersão em energia (MEV/EDS)	28
2.5.2	Espectrômetro de fluorescência de raios-X (FRX).....	29
2.5.3	Difração de raios-X (DRX).....	30
2.5.4	Análise granulométrica.....	30
2.5.5	<i>Tumbler test</i> – Teste de tamboreamento.....	31
3	MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1	Materiais.....	32
3.1.1	Materiais e equipamentos para sinterização	32
3.2	Métodos.....	32

3.2.1	Condições para o processo de sinterização.....	33
3.2.2	Montagem do equipamento e simulação física do processo de sinterização	33
3.2.2.1	Sistema de ignição	35
3.2.2.2	Aparelho de aquisição de dados de temperatura.....	36
3.2.3	Matérias-primas	36
3.2.4	Análise granulométrica.....	37
3.2.4.1	Coque	37
3.2.4.2	Tratamento dos materiais a sinterizar	39
3.2.5	Teor de umidade ótima	40
3.2.6	Micropelotização	40
3.2.7	Abastecimento da carga no reator vertical de leito fixo	41
3.2.8	Caracterização do sínter.....	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
4.1	Análise granulométrica dos materiais para sinterização	44
4.2	Teor de umidade ótima na formação de micropelotas	45
4.3	Velocidade do ar e tempo de sinterização.....	45
4.4	Análise visual do sínter produzido	46
4.5	Caracterização do sínter.....	47
4.5.1	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	47
4.5.2	Espectroscopia de Energia Dispersiva (MEV/EDS).....	50
4.5.3	Fluorescência de Raios-X (FRX).....	52
4.5.4	Difração de Raios-X (DRX)	53
4.5.5	Tamboreamento do sínter (<i>tumbler test</i>).....	57
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
6	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	60
	REFERÊNCIAS.....	61

1 INTRODUÇÃO

O processo de sinterização consiste em aglomerar partículas finas do minério de ferro (*sínter feed*) gerado no processo de beneficiamento, que são muito relevantes neste processo devido ao teor de ferro contido. Sendo este misturado com outros materiais como finos de calcário calcítico e moínha de carvão ou coque vegetal para um melhor aproveitamento, evitando o descarte e respeitando a norma brasileira da ABNT (2004), sobre descarte de resíduos sólidos.

A sinterização, conforme Ahn, Choi e Cho (2013), trata-se da formação de materiais compactados submetidos a temperaturas elevadas. Onde, no local em que ocorre a combustão de acordo com Telles (2015), a temperatura aumenta até atingir cerca de 1000 a 1300 °C por um período de 1 minuto, abaixo da temperatura de fusão, criando um produto aglomerado com alterações macroscópicas e microscópicas de acordo com os elementos que constituem as matérias-primas.

A formação do *sínter* de acordo com Silva, G. (2011) e Cardoso (2016), é decorrente dos mecanismos de transportes de massa que produzem ao final do processo de aglomeração, um produto sólido com uma determinada resistência, para posterior utilização como carga metálica no alto-forno na produção do ferro gusa. A etapa inicial consiste na mistura dos finos das matérias-primas, gerando as micropelotas, estas depois de formadas são inseridas no reator para a queima. Durante o processo de sinterização ocorrem diversas reações que podem variar o gradiente de temperatura. Evidenciado pela composição química dos materiais, que podem acarretar um processo rápido ou lento.

No presente trabalho, será feita a adição da carepa de laminação como parte da matéria-prima, com o intuito de medir os parâmetros físico-químicos, resistência e qualidade do material, tendo um pensamento nas questões ambientais por incorporar resíduos das siderúrgicas como forma de reaproveitamento. Desta forma solucionam-se dois problemas inerentes às empresas, a preservação do meio ambiente por reaproveitar os materiais residuais e a redução do custo devido a reutilização destes, o que é alcançado pela menor compra de matérias-primas.

1.1 Objetivos

Nos tópicos seguintes são listados os objetivos necessários para produção do trabalho.

1.1.1 Geral

Produção de sínter em um reator vertical de leito fixo, utilizando finos de minério de ferro, finos de calcário calcítico, moinha de coque e carepa de laminação.

1.1.2 Específicos

- a) Caracterização das matérias-primas;
- b) Avaliação macro e microestrutural do sínter produzido;
- c) Caracterização físico-química do sínter;
- d) Verificação da influência da carepa e do coque nas características do sínter.

1.2 Justificativa

Com base na geração de matérias residuais nas siderurgias e menor dano a exploração de jazidas de minério de ferro, buscou-se incorporar um processo produtivo que reaproveite os resíduos gerados, com o intuito de reduzir os danos causados com o descarte e extração, criando um meio de inserir outros materiais para viabilizar e dar suporte de aglomerados pelo processo da sinterização.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordados conteúdos referentes ao processo de sinterização, mostrando as principais matérias-primas utilizadas, as etapas, os equipamentos empregados no processo e as caracterizações realizadas após a produção do *sínter*.

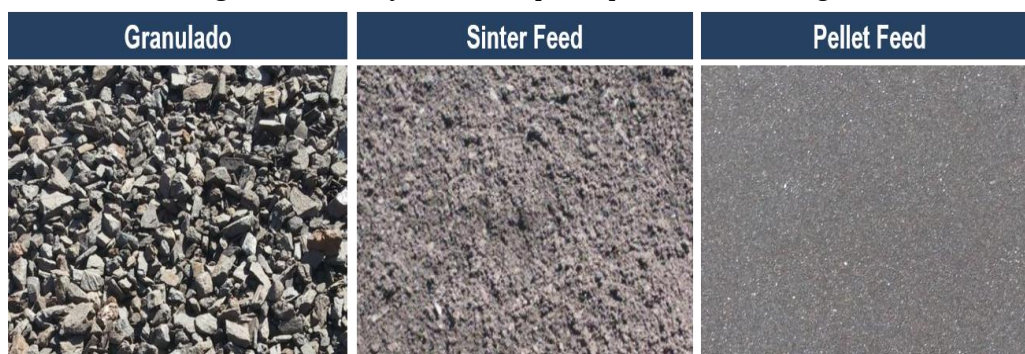
2.1 Materiais para a produção do *sínter*

Os materiais utilizados para formação do *sínter* são finos de minério de ferro, finos de calcário calcítico, carepa de laminação, coque e falsa grelha, descritos nos tópicos seguintes.

2.1.1 Fino de minério de ferro – F.M.F

Nas siderurgias conforme Carvalho *et al.* (2014), o minério de ferro antes de ser adicionado ao processo de sinterização, precisa atender as especificações relativas com o trabalho desejado. Diante disso, como mostra a Figura 1, Telles (2015) e Minério... (2020) apresenta os três tipos de produtos utilizados:

Figura 1 – Ilustração dos três tipos de produtos na siderurgia.



Fonte – Minério... (2020).

- **Granulado ou Lump Ore:** Minério de grande granulometria com tamanhos entre 50 e 6,3 mm, sendo utilizado nos altos-fornos das usinas siderúrgicas na obtenção do ferro gusa.
- **Sínter feed:** Minério fino com tamanhos entre 6,3 e 0,105 mm, no qual é utilizado para aglomeração do processo de sinterização.
- **Pellet feed:** É o minério mais fino, com partículas de granulometria menores que 0,105 mm, onde este em uma dosagem menor, pode ser misturado ao *sínter feed*.

Os materiais utilizados conforme Carvalho *et al.* (2014) e Telles (2015), são de vários tipos de minérios e materiais recicláveis, como: pós, lamas, carepas e finos de retorno. Portanto, as melhores formas de mistura tornarão a faixa de granulometria do *sínter feed* menos restrita.

2.1.2 Fino de calcário calcítico – F.C.C

O carbonato de cálcio de acordo com Perez (2001), é utilizado na metalurgia como fundente, fazendo-se presente nos grandes setores de produção da indústria moderna. A composição química presente na rocha, define o tipo de material formado, de acordo com a questão mineralógica aplicada aos teores de cada substância. Especificados como, CaCO_3 (carbonato de cálcio) ou CaO (óxido de cálcio), MgCO_3 (carbonato de magnésio) ou MgO (óxido de magnésio), não esquecendo a quantidade de impurezas presentes em cada uma destas amostras. A Figura 2 mostra o calcário calcítico utilizado.

Figura 2 – Calcário calcítico.



Fonte – Calcário... (2020)

2.1.3 Carepa de laminação – C.L

A carepa segundo Cunha *et al.* (2006) e Leite (2008), é oriunda da oxidação da parte superficial do aço, no qual, é o seu coproduto gerado ao ser submetido a um gradiente de temperatura, corrosão ou ação do tempo, desde as etapas de conformação e resfriamento. Dentre os resíduos gerados, têm-se os óxidos de ferro, que possuem em sua constituição wustita (FeO), hematita (Fe_2O_3) e magnetita (Fe_3O_4).

Nas siderurgias de acordo com Cunha *et al.* (2006), são gerados em média 1000 toneladas/mês de resíduos da carepa, no qual ambientalistas, engenheiros e pesquisadores, visam encontrar formas de reaproveitar este material nos processos siderúrgicos. A Figura 3 mostra o resíduo da carepa na siderurgia.

Figura 3 – Carepa de laminação.



Fonte – Pereira, F, Verney e Lenz (2019).

A granulometria da carepa, de acordo com Lobato, Villegas e Mansur (2015) e Duarte (2016), apresenta uma morfologia de partículas que são friáveis, suas dimensões variam, sendo inferiores a 5 mm, tendo grandes quantidades de poros e vazios, com tamanhos de aproximadamente 1 mm de comprimento. Os teores de ferro estão na faixa de 22,3 a 52,7%, possuindo conteúdos metálicos não ferrosos e compostos de metais alcalinos, sabendo também que, 5% de adição deste material confere ao sinter uma boa resistência, podendo ser verificada pelo teste de abrasão. A presença de óleo, principal contaminante, contém variações entre 0,1 e 2%, alcançando até 20%.

A concentração de óleo está presente na parte mais fina da carepa, sendo classificado na norma dos Resíduos sólidos ABNT (2004), como perigoso (Classe I). Algumas siderurgias, segundo Lobato, Villegas e Mansur (2015), utilizam a parte grosseira da carepa de laminação e a carepa livre de óleo na reciclagem de sinterização como matéria-prima, substituindo os minérios de ferro. As partículas mais finas, não há possibilidade de reciclagem, sendo tratadas e despejadas em aterros industriais.

2.1.4 Coque

De acordo com Pires (2016) e Companhia... (2021), o carvão mineral tem sua origem proveniente da decomposição de matérias vegetais, submetidas a processos das ações geológicas e ambientais (físicas e químicas). O coque metalúrgico, é um subproduto obtido pela coqueificação do carvão mineral em fornos da coqueria, onde ocorre a queima e liberação de voláteis, enriquecendo o carbono presente. Sendo constituído de uma massa compactada, que após passar por beneficiamento é utilizada como combustível em usinas siderúrgicas.

De acordo com alguns autores, o coque possui na sua constituição matéria inorgânica,

óxidos (Si, Ca, Mg, Al, Fe, Mn, P, S, Na, etc.), silicatos e umidade, impurezas detectadas na estrutura mineralógica do material. A estrutura do coque, como mostra a Figura 4, é baseada em material carbonáceo, empelotado e sólido, apresentando uma textura rígida, porosa, de cor cinza-prata e fissuras de diversos tamanhos (BARBOSA, 2018; GEERDES; VLIET; TOXOPEUS, 2009; SILVA, G, 2011).

Figura 4 – Coque.



Fonte – Alexander (2017).

As características do coque segundo Alves (2017) e Coelho *et al.* (2004), devem ser controladas durante sua produção na coqueria, desejando-se obter um material com bons parâmetros: resistência, baixa concentração de contaminantes, alto teor de carbono, etc., acarretando nos fornos de coqueificação uma produtividade de acordo com as necessidades de utilização no processo siderúrgico. Onde deve ser avaliado também, seu caráter como combustível, redutor e permeabilizador da carga.

2.1.5 Falsa grelha (*bedding*)

A falsa grelha ou *bedding* de acordo com Silva, J (2011) e Daniel (2018), é utilizada em fornos de sinterização para proteção da verdadeira grelha, impedindo que ela se funda com o material (sínter), como mostrado na Figura 5. Seus tamanhos são de 15 a 25 mm de dimensão, com espessuras de 25 a 40 mm. Destacando vantagens, como:

- As barras da grelha verdadeira estarão protegidas das temperaturas elevadas;
- Não haverá aderência do bolo de sínter com a grelha;
- A poeira gerada pela queima dos gases não será carregada para o ventilador, evitando desgastes de equipamentos.

Figura 5 – Falsa grelha ou *Bedding* de sínter.



Fonte – Daniel (2018).

2.2 Processos de aglomeração

Nos tópicos seguintes, serão descritos os processos necessários para aglomeração. Onde é apresentando os meios que contribuem para formação e obtenção do sínter.

2.2.1 Pelotização

A pelotização é bem implementada para aproveitar os minérios de baixa concentração, ultrafinos e inadequados ao processo de uso direto no alto-forno à produção de ferro primário. Desse modo, consiste em aglomerar os finos com faixa de umidade entre 8 e 10% de água essencial e transformá-los em pelotas de 12 a 15 mm, nos padrões apropriados ao uso da siderurgia (HONORATO, 2005; MOURÃO, 2017; PROCESSO..., 2019).

2.2.2 Briquetagem

A briquetagem é utilizada como matriz de conformação, com a função de briquetar o minério por parte. Este termo também é dito quando ocorre a compactação de material combustível, no caso do sínter: moinha de carvão vegetal ou coque. É usual na aglomeração dos finos industriais, como: poeiras, lamas e resíduos. Descrito em etapas que se iniciam na escolha do material até a obtenção do próprio briquete (BAPTÍSTA, 2016; CARDOSO, 2016; PROCESSO..., 2019). Conforme a Figura 6.

Figura 6 – Processo de briquetagem.



Fonte – Carvalho, Brinck e Campos (2018).

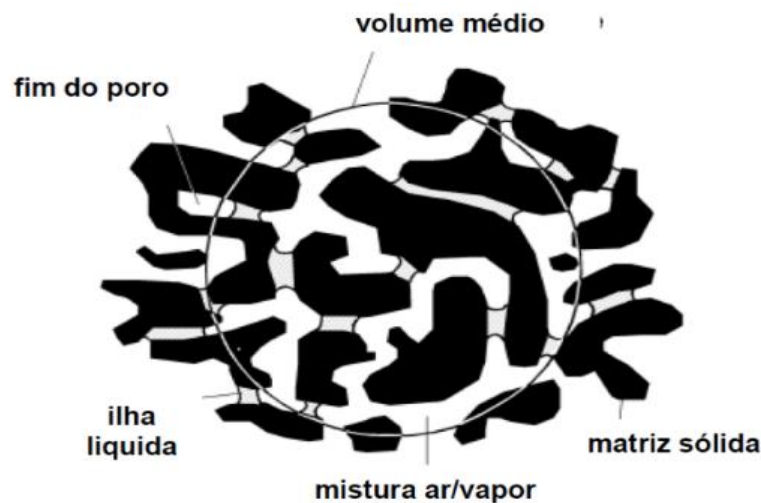
2.2.3 Sinterização

A sinterização, é um processo que utiliza finos compactados submetidos a altas temperaturas, onde são descritos nos tópicos seguintes como se decorre.

2.2.3.1 Difusão em meio poroso

O processo de difusão em meio poroso ocorre de acordo com a segunda lei da termodinâmica (transformação e transferência da energia em forma de calor), havendo fluxo de matéria de regiões com maior concentração para outra menor. Neste caso, é chamado de difundente, por conter mais de uma espécie química distinta, chamada matriz ou meio poroso (ÂNGULO, 2015; AZEVEDO, 2009; CATUNDA, 2017). Como mostra a Figura 7.

Figura 7 – Representação esquemática de um material poroso não saturado.



Fonte – Azevedo (2009).

Os poros que são as regiões vazias do próprio material, podem estar ou não isolados. Contudo, se o poro estiver ocupado com líquido, estará saturado e se estiver parcialmente preenchido estará não saturado (ÂNGULO, 2015; AZEVEDO, 2009; CATUNDA, 2017).

2.2.3.2 Micropelotização

Os minérios com baixa concentração são moídos e concentrados, obtendo quantidades de finos entre 6,3 a 0,150 mm, próprios para a micropelotização (HONORATO, 2005; MOURÃO, 2017; PROCESSO..., 2019). Na verificação do teor de umidade ótima, conforme Daniel (2018), a Tabela 1 mostra as variações entre as massas obtidas, a qual é avaliada a menor densidade entre os três percentuais. Onde verifica-se que, o teor de 10% de umidade proporcionará uma melhor aglomeração para formar as micropelotas.

Tabela 1 – Teste do teor de umidade ótima.

	Massa (g)	M. Esp. Ap. (g/cm ³)	% H ₂ O	Tempo (min)
Exp. 1	386,5	1,267	9	5
Exp. 2	386	1,266	10	5
Exp. 3	389	1,275	11	5

Fonte – Daniel (2018).

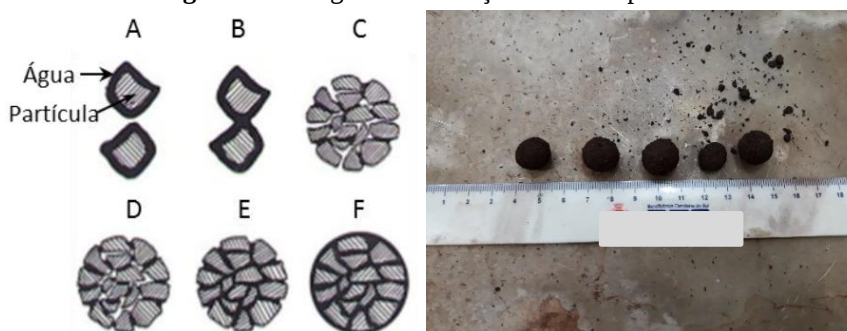
Segundo Felipe (2019), o mesmo teor de umidade é utilizado, diferenciando apenas a massa e a densidade, como mostra a Tabela 2.

Tabela 2 – Umidade ótima para formação de micropelotas à produção de sínter.

Amostra	Massa _{média} (g)	% Água	Massa _{específica} (g/cm ³)
1	435	7	1,51
2	429,5	8	1,72
3	407	9	1,41
4	387,5	10	1,35
5	422,5	11	1,47

Fonte – Felipe (2019).

De acordo com Silva, J (2011), três etapas são distribuídas, sendo: preparação da amostra, determinação das faixas granulométricas e aglomeração dos finos, como mostra a Figura 8.

Figura 8 – Estágios de formação das micropelotas.

Fonte – Fonseca e Campos (2018); Felipe (2019).

2.2.3.3 Processo de sinterização

No processamento do *sínter feed* segundo com Ahn, Choi e Cho (2013) e Cardoso (2016), ocorrerá a mistura com diferentes tipos de minério, como: hematita (Fe_2O_3), limonita ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), magnetita (Fe_3O_4) e siderita (FeCO_3). Desse modo, a sinterização é o processo térmico para aglomeração e densificação das partículas finas na formação de partículas maiores, que após obter o produto sinterizado, irá contribuir para produção de ferro gusa e aço.

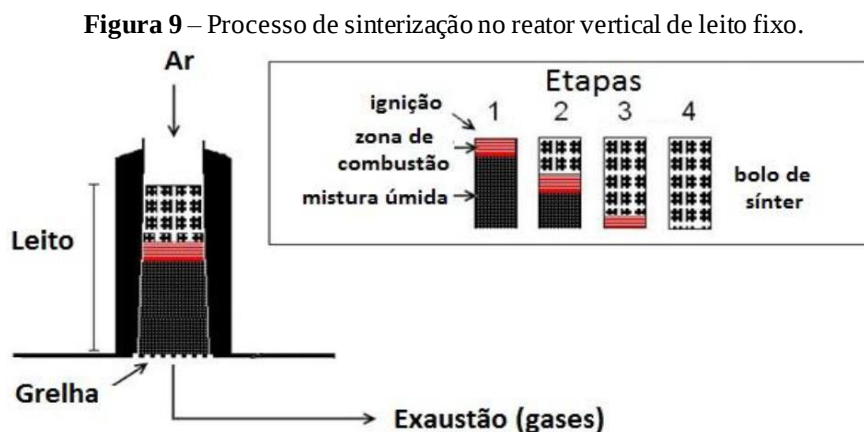
Os teores de ferro no *sínter* após o processo, estão entre 55 a 60%, com baixos teores de enxofre e fósforo (menor que 1%), apresentando também uma boa resistência mecânica. Haja vista que, para poder ser descarregado no alto-forno são exigidas uniformidades, não sendo inseridos diretamente os finos do minério de ferro, pois a faixa granulométrica é estreita (CARDOSO, 2016; MOCHÓN, 2014; SILVA, J, 2011; SILVA, G, 2011).

De acordo com Daniel (2018), são necessárias análises químicas e físicas, e condições técnicas adequadas para medir a resistência mecânica do *sínter*, observadas as temperaturas do processo para formação do material, velocidade e a taxa de resfriamento. As etapas do processo de formação do *sínter* são:

- Abastecimento da matéria-prima;
- Homogeneização, obtendo a formação, umidificação e formação de nódulos da mistura;
- Carga da mistura na esteira de sinterização;
- Sinterização, gerando a transformação da mistura em *sínter*;
- Quebra do aglomerado de *sínter*;
- Peneiramento do material a quente;
- Resfriamento do *sínter*;
- Peneiramento a frio.

Ao iniciar a queima do combustível na parte superior da mistura segundo Telles (2015) e Quaresma *et al.* (2017), o processo de combustão irá se propagar de cima para baixo, tendo

uma velocidade média de 1 a 3 cm/min, por conta da sucção do ar que atravessa os poros da mistura e a grelha, fornecendo oxigênio propício à combustão, como mostra a Figura 9.



Fonte – Telles (2015).

Segundo Telles (2015), na parte ocorrente da combustão, a temperatura atinge cerca de 1000 a 1300 °C por um período de 1 minuto, sendo abaixo da fusão dos minerais.

2.3 *Packed-Bed Reactor* – Reator vertical de leito fixo

O Reator vertical de leito fixo segundo Starling (2012) e Pereira, J. e Samuel (2017), é chamado de reator catalítico de leito fixo, onde possui a constituição de várias partículas com deposição ao longo do comprimento de um tubo, conforme a Figura 9 no item 2.2.3.3. Nele ocorre as reações de sinterização ocasionadas pela produção do sínter, mas possui algumas limitações na presença de finos, sendo prejudicial a ocorrência das reações em seu interior, assim como na permeabilidade do gás.

2.4 Reações na sinterização

De acordo com o Processo... (2019) e Ohno *et al.* (2013), os mecanismos básicos à sinterização são de dois tipos: transferência de calor do ar quente à camada inferior da mistura e as reações químicas de combustão do coque, sendo 15% de energia oriundo da ignição e 85% das reações de sinterização. Portanto, a temperatura é um dos principais artifícios para uma operação apresentar estabilidade, estipulado no processo como útil para melhor qualidade de sinterização.

Para combustão do coque, é necessário que se tenha um excesso de ar, pois quanto maior esse fluxo, melhor será o processo. Em todo caso, o tamanho das partículas das matérias-primas influenciará no tempo de formação do sínter, então, quanto maior o diâmetro das partículas,

mais demorado será a sinterização. Todavia, as reações químicas geradas não são controladas e estas são endotérmicas, e a redução do minério de ferro ocorre na presença de monóxido de carbono (CO). O dióxido de carbono (CO₂) gerado não possui estabilidade e reage de forma imediata com o coque para formação de CO (POLICARPO, 2012; FLORES, 2014 e MAXWELL, 2021).

Conforme Lopes (2012) e Geerdes, Vliet e Toxopeus (2004), o processo de sinterização pode ser analisado pelas seguintes reações:

1. Secagem: até 300 °C, ocorre a vaporização da água livre.



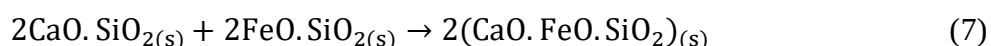
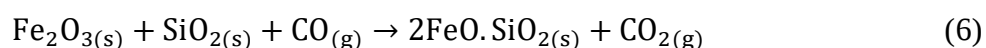
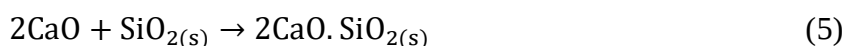
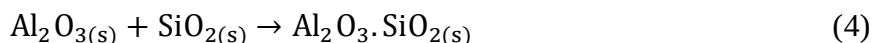
2. Desidratação: em torno de 400 a 500 °C, ocorre a vaporização da água combinada.



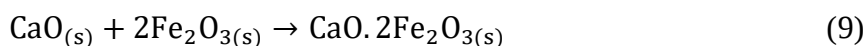
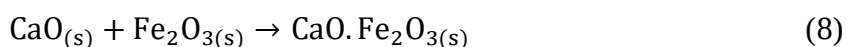
3. Decomposição de carbonatos: ocorre entre 750 a 1150 °C.



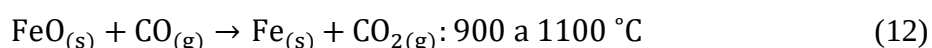
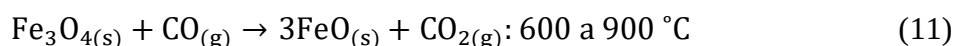
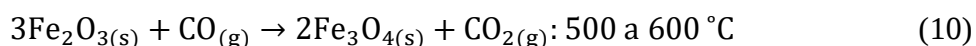
4. Formação de silicatos: ocorre entre 600 a 1300 °C.



5. Formação de Cálcio-ferritas: ocorre entre 600 a 1300 °C.



6. Redução do minério de ferro com CO.



7. Combustão do coque: a partir de 1300 °C.



2.5 Caracterizações físico-químicas e mecânicas do sínter

As técnicas de caracterização nestes tópicos, foram utilizadas em sínter com produção

de carvão vegetal (moinha) – MCV e serão aplicáveis a este trabalho para comparação das análises.

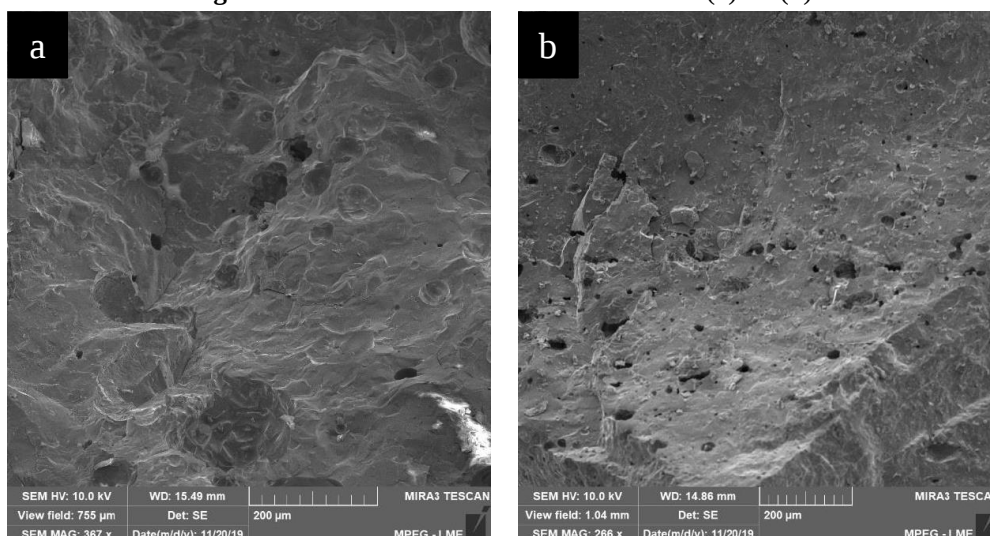
2.5.1 Microscópio eletrônico de varredura e Espectroscopia de raios-X por dispersão em energia (MEV/EDS)

Segundo Daniel (2018), o MEV produz apenas imagens com alta resolução, mostrando a superfície de um sólido qualquer, obtendo-se as características do material e percepção de possíveis falhas. O MEV acoplado ao EDS é responsável pela interpretação dos dados da espectroscopia de raios X por dispersão de energia.

A característica da microestrutura do sínter produzido com moinha de carvão vegetal de acordo com Iglesias *et al.* (2013) e Felipe (2019), influencia em suas propriedades tanto no ferro bem como no aço produzido, sendo necessário a análise da sua microestrutura morfológica, utilizando uma análise por varredura. Ao fazer a análise desses dados, deve-se observar partículas maiores que indicam a presença de agentes nucleantes, tendo as menores como aglomerantes ao redor.

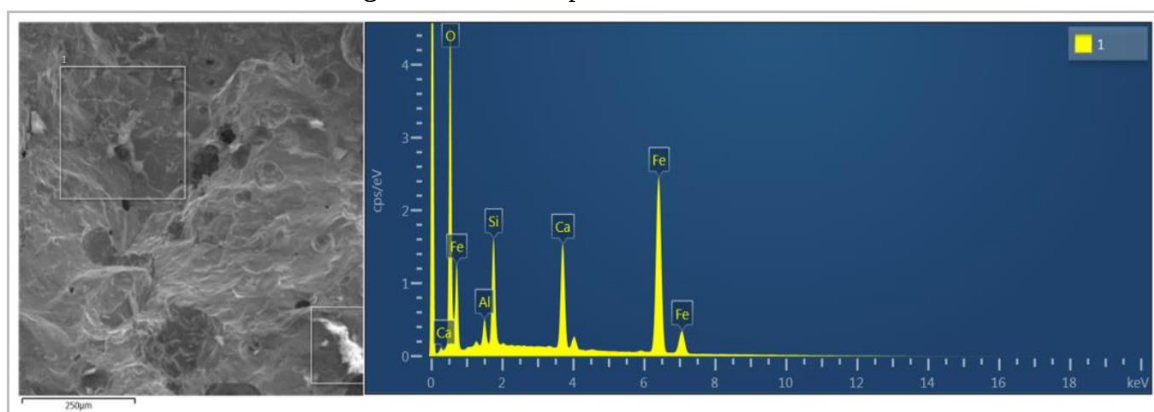
Segundo Felipe (2019), a presença de porosidade é o fator importante no sínter, sendo um parâmetro que aumenta o índice de redutibilidade. Onde essas propriedades são necessárias na produção do ferro gusa e aço. A morfologia do sínter 1 e 2 é mostrada na Figura 10.

Figura 10 – Análise microestrutural do sínter 1 (a) e 2 (b).



Fonte – Felipe (2019).

Por meio do MEV/EDS, verifica-se quantitativamente a relação dos elementos que foram encontrados no sínter, como mostra a Figura 11.

Figura 11 – Análise por MEV/EDS do sínter.

Fonte – Felipe (2019).

Segundo Felipe (2019), a presença de outros elementos formadores de óxidos nestes materiais, sofre influência das matérias-primas utilizadas. Podendo conceder características químicas e mecânicas diferentes na amostra, sendo identificadas por meio de outras análises mais detalhadas.

2.5.2 Espectrômetro de fluorescência de raios-X (FRX)

Esta análise conforme Daniel (2018), é fundamental para determinar os elementos existentes nas matérias-primas e no sínter. Assim como realizar a perda ao fogo, onde remove-se a matéria orgânica e o dióxido de carbono existente pela ação da alta temperatura, permanecendo os resíduos de CaO e MgO, juntamente com os silicatos e outros óxidos.

Segundo alguns autores, a presença de SO_3 e P_2O_5 proveniente de resíduos dos fundentes, coque ou do minério, poderá interferir na resistência mecânica do sínter, gerando no material fragilidade a quente e/ou a frio em temperatura ambiente. Em que, os teores destes óxidos precisam estar próximos aos valores indicados ao sínter, que é de 1,5% para o enxofre e 0,02% para o fósforo (GONCALVES, 2005; MESQUITA FILHO *et al.*, 2018; SIDERURGIA, 2021).

Conforme Felipe (2019), a Tabela 3 apresenta as variações dos teores de cada elemento e o valor percentual de perda ao fogo do sínter que é de 0%.

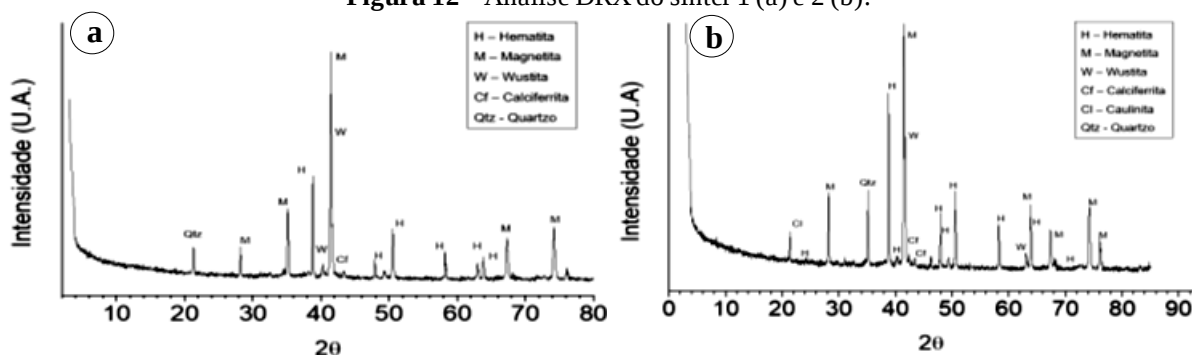
Tabela 3 – FRX das amostras de sínter 1 e 2.

Sínter 1		Sínter 2	
Componente	%	Componente	%
Fe ₂ O ₃	79,77	Fe ₂ O ₃	81,28
SiO ₂	8,61	SiO ₂	8,34
CaO	8,55	CaO	6,13
Al ₂ O ₃	1,83	Al ₂ O ₃	2,41
P ₂ O ₅	0,17	P ₂ O ₅	0,17
K ₂ O	0,39	K ₂ O	0,41
TiO ₂	0,16	TiO ₂	0,17
Cr ₂ O ₃	0,09	Cr ₂ O ₃	0,06
MnO	0,42	MnO	0,47
		MgO	0,55
PF	0	PF	0
Total	99,99	Total	99,99

Fonte – Felipe (2019).

2.5.3 Difração de raios-X (DRX)

A Difração de raios-X conforme Daniel (2018) e Felipe (2019), é uma análise técnica que tem por objetivo a caracterização das fases cristalinas dos materiais, assim como as fases mineralógicas presentes. Os picos de cada composto são bem diversificados, como mostra a Figura 12 da análise do sínter 1 e 2, tendo a presença de alguns óxidos.

Figura 12 – Análise DRX do sínter 1 (a) e 2 (b).

Fonte – Felipe (2019).

2.5.4 Análise granulométrica

A análise granulométrica é o método aplicado para determinar as faixas de tamanho adequado das partículas que serão utilizadas na sinterização, ao qual podem ser usadas peneiras de crivos, grelhas ou telas (ABNT, 2009; ABNT, 2018a; CARRISSO; CORREIRA, 2004). De

acordo com alguns autores, a granulometria desejada do minério de ferro (*sínter feed*) precisa estar na faixa de 6,3 a 0,104 mm, a carepa e fundente na faixa média de 5,0 a 0,104 mm e a do coque de 3,0 a 0,104 mm. Fazendo uso de peneiras com as faixas entre 6,35 mm a 0,104 mm para classificação desses tamanhos (BERTI, 2013; DANIEL, 2018; SILVA, J, 2011; SIMÕES *et al.*, 2017).

2.5.5 *Tumbler test* – Teste de tamboreamento

O teste de tamboreamento, determina a abrasão do *sínter* em relação a sua resistência, onde as quantidades do material estão em torno de 20 kg e as faixas granulométricas entre 5 a 50 mm. O material precisa passar primeiramente por peneiras de 9,52 e 7,93 mm, depois para o misturador, por um tempo de 10 a 15 minutos. Após este procedimento, o material deve passar novamente por peneiras, mas com abertura de 6,35 mm para determinar a quantidade de material passante e retido, verificando se o *sínter* possui ou não uma boa resistência mecânica (ABNT, 2018b; TELLES, 2015; FELIPE, 2019).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão abordadas as metodologias desenvolvidas ao longo deste trabalho, mostrando etapas e processos realizados para obtenção do síter.

3.1 Materiais

Os materiais listados neste tópico foram necessários para que se pudesse produzir o síter.

3.1.1 Materiais e equipamentos para sinterização

A realização do experimento de produção e obtenção do síter foram realizados na Usina de Materiais, do Laboratório de Engenharia Química (LEQ) da Universidade Federal do Pará – UFPA, utilizando as seguintes matérias-primas (doadas pela empresa SINOBRAS) e equipamentos para o processo de sinterização, conforme a Tabela 4:

Tabela 4 – Materiais e equipamentos utilizados no processo de sinterização.

Materiais e equipamentos			
FMF, FCC, CL e coque	Massa de silicone e argila para vedação	Pelotizador	Jogo de peneiras nas malhas de:
			19,05 mm;
Reator vertical de leito fixo	Britador de mandíbula	Cadinho	9,52 mm;
			7,93 mm;
Exaustor e tubo de exaustão	Moinho de disco	Maçarico	6,35 mm;
			4,0 mm;
Aparelho de verificação da temperatura	Agitador RO-TAP	Gás (GLP) e mangueira de pressão	2,80 mm;
			1,68 mm;
			1,00 mm;
Anemômetro	Balança e bandeja	Régua e pá	0,500 mm;
			0,295 mm,
Grelha	Estufa	Borrifador	0,208 mm,
			0,147 mm;
Termopar	Cronômetro	Proveta de 1000 mL	0,104 mm;
			0,074 mm

Fonte – Autoria própria (2021).

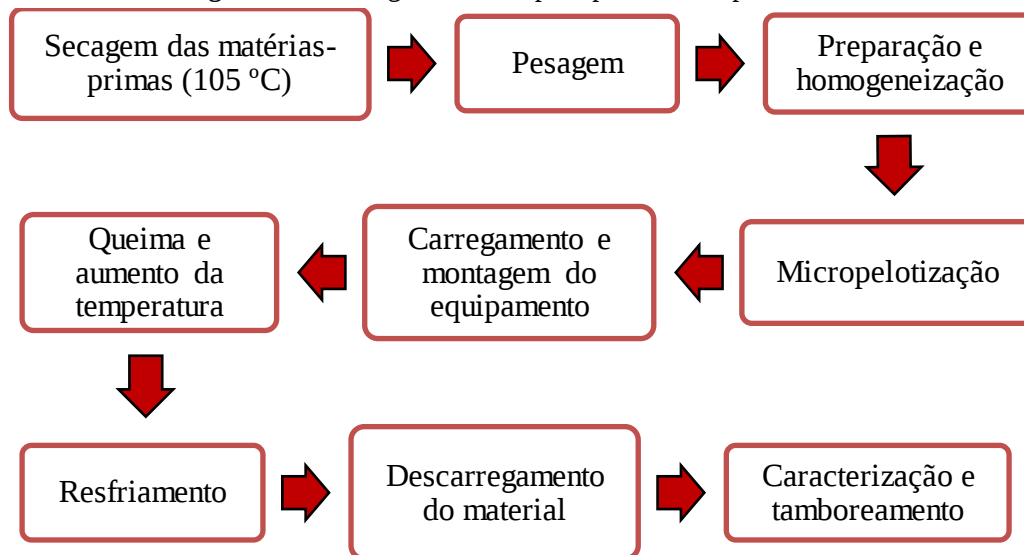
3.2 Métodos

Os métodos desenvolvidos neste trabalho, foram de suma importância para que se pudesse realizar a sinterização.

3.2.1 Condições para o processo de sinterização

Como forma de proceder com os objetivos do trabalho estabelecidos, o fluxograma da Figura 13 mostra as etapas decorridas para o processo de sinterização do material.

Figura 13 – Fluxograma das etapas e processos experimentais.



Fonte – Autoria própria (2021).

3.2.2 Montagem do equipamento e simulação física do processo de sinterização

Na etapa de montagem dos equipamentos, o reator de leito fixo foi vedado com argila e silicone, e a câmara de isolamento foi preenchida com vermiculita e lã de rocha (material refratário). Posteriormente foram inseridos sete termopares no reator para verificação das temperaturas nas camadas do leito de sinterização. Em seguida foi acoplada a grelha no fundo do reator juntamente com o exaustor, a fim de evitar a passagem do material micropelotizado e inserir o fluxo de ar, como mostrado na Figura 14.

Figura 14 – Montagem do reator vertical de leito fixo.



Fonte – Autoria própria (2021).

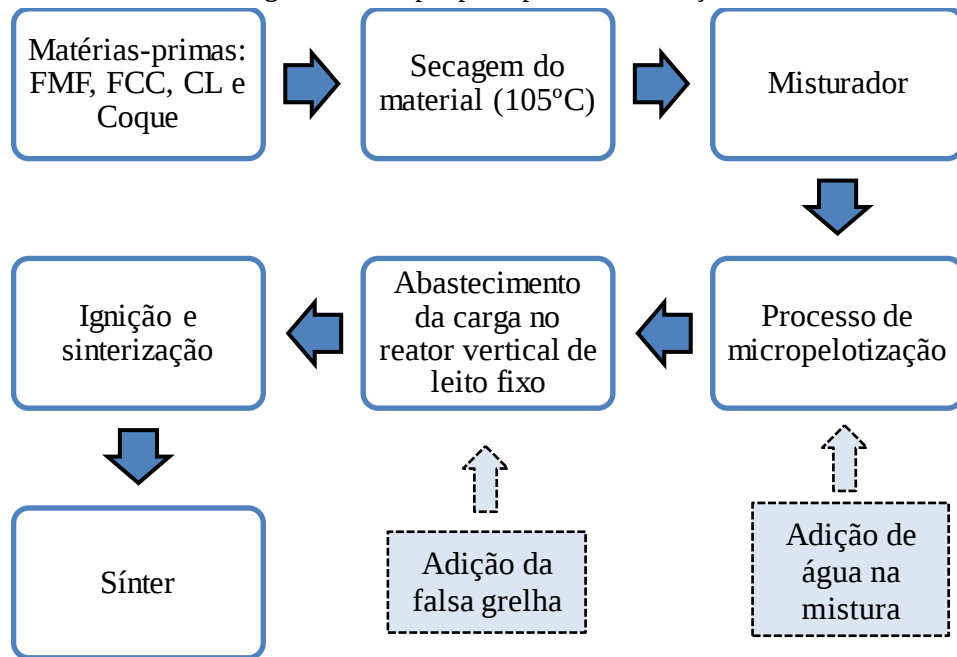
A verificação da circulação de ar foi efetuada com a utilização de um anemômetro, Figura 15, para determinar a velocidade do ar dentro do reator antes do carregamento do material e durante o processo de sinterização.

Figura 15 – Anemômetro.



Fonte – Autoria própria (2021).

Posteriormente, a falsa grelha (sínter doado pela SINOBRAS com granulometria de 12 mm) foi adicionada e logo após a matéria-prima micropelotizada, sendo colocados ambos em formato de cruz com o intuito de organizar os materiais uniformemente, como mostrado no fluxograma da Figura 16.

Figura 16 – Etapas principais da sinterização.

Fonte – Autoria própria (2021).

3.2.2.1 Sistema de ignição

Para que houvesse a ignição do combustível, um maçarico acoplado com uma mangueira tendo a alimentação de um gás liquefeito (GLP), foi posicionado na parte superior do reator bem no centro de sua abertura, como mostrado na Figura 17.

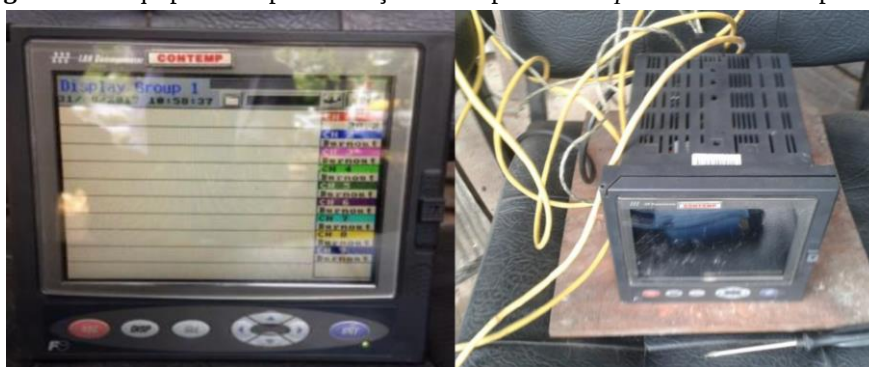
Figura 17 – Equipamento para o processo de ignição acoplado ao reator de leito fixo.

Fonte – Autoria própria (2021).

3.2.2.2 Aparelho de aquisição de dados de temperatura

Para obter os dados da temperatura do processo de combustão, foram conectados termopares no reator, sendo posicionados cinco na câmara de combustão, um ao redor do leito e um na parte inferior do reator, próximo a grelha, no qual mediu-se a temperatura da frente de combustão do processo de sinterização. As variações de temperatura foram gravadas no aparelho *Paperless Recorder*, como mostrado na Figura 18.

Figura 18 – Equipamento para medição da temperatura *Paperless Recorder* tipo PHL.



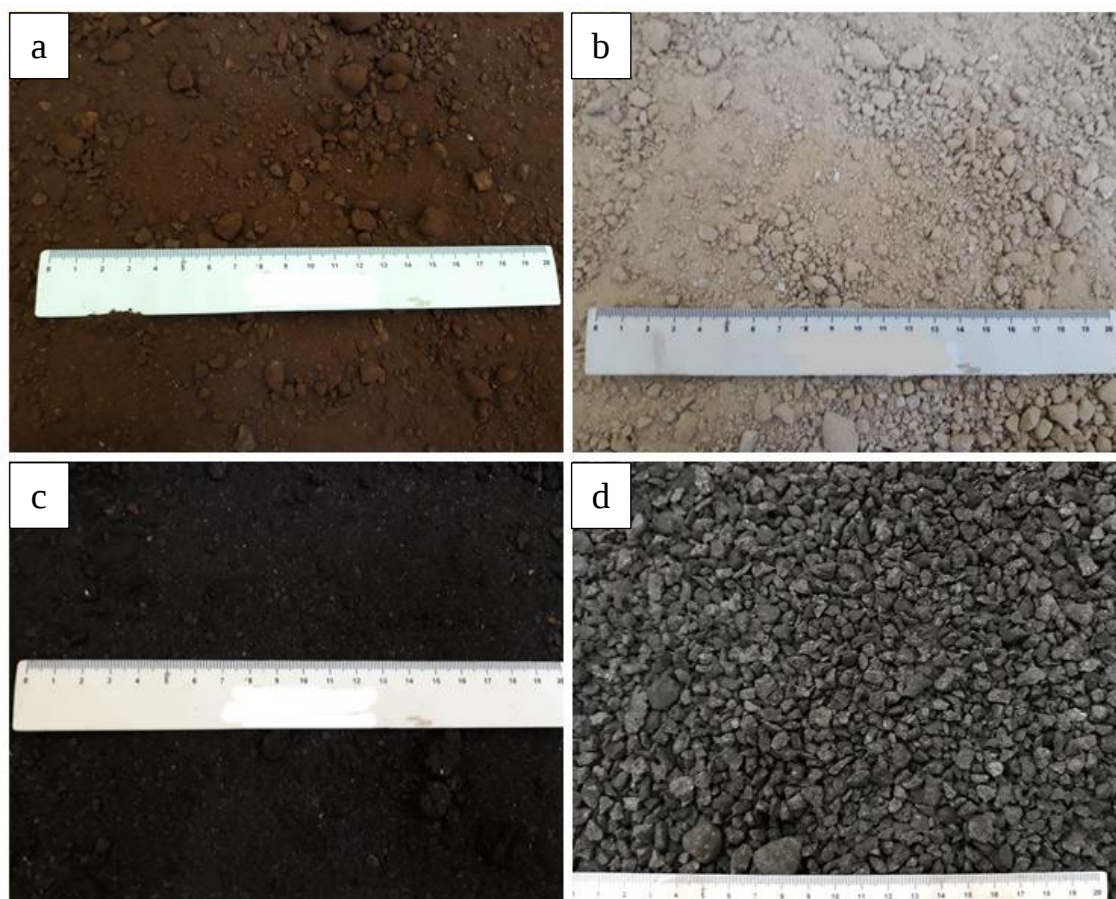
Fonte – Autoria própria (2021).

3.2.3 Matérias-primas

Na realização deste experimento, as matérias-primas utilizadas foram cedidas pela empresa siderúrgica SINOBRAS, localizada no município de Marabá/PA. Os materiais cedidos, como mostrado na Figura 19, foram finos de minério de ferro (FMF), finos de calcário calcítico (FCC), carepa de laminação (CL) e o coque.

Para o *sínter feed* foi utilizado na mistura dos materiais o FMF, o FCC teve o caráter de fundente, a CL foi uma incorporação as matérias-primas, aplicando o reaproveitamento de resíduo siderúrgico e o coque serviu como combustível e agente redutor. Estes materiais foram tratados de acordo com os estudos de Felipe (2019) e Daniel (2018).

Figura 19 – Matérias-primas: (a) FME, (b) FCC, (c) CL e (d) coque.



Fonte – Autoria própria (2021).

Por conta de os materiais apresentarem certo teor de umidade, foi necessário efetuar a secagem. Sendo assim, foi colocado na estufa após a determinação da faixa granulométrica do coque, por um tempo de 24h a temperatura de 105 °C. Posteriormente, as amostras foram pesadas e utilizadas conforme a necessidade do processo.

3.2.4 Análise granulométrica

A determinação da granulometria é necessária para obter o tamanho adequado para o processo de sinterização, sendo este processo aplicado para as matérias-primas.

3.2.4.1 Coque

Na determinação granulométrica do material, o processo consistiu em três etapas. A primeira consistiu em determinar o tamanho adequado para o coque, utilizando um britador de mandíbula para cominuição de 2,5 kg da amostra, como mostrado na Figura 20a.

A segunda etapa foi utilizar um moinho de disco para determinar a granulometria adequada a partir de 3,0 mm, conforme mencionado por Silva, J (2011) e Berti (2013). Então, o eixo circular do moinho foi posicionado com a abertura de 3,0 mm para que pudesse ser atingido o tamanho desejado, como mostra a Figura 20b. O processo durou cerca de três dias e após esta etapa, o material foi pesado e obteve-se uma massa no total de 2 kg.

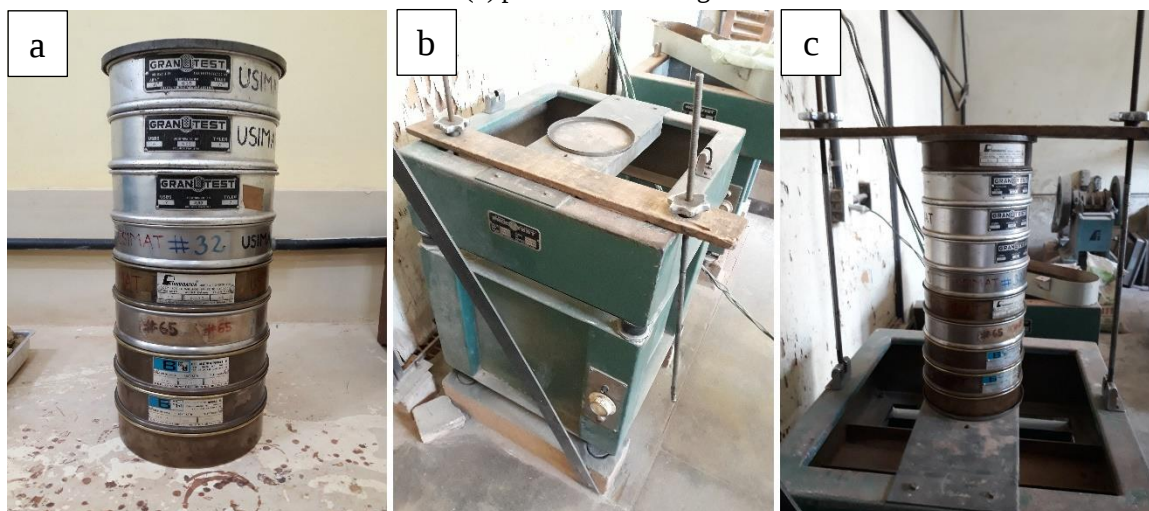
Figura 20 – (a) britagem da amostra de coque e (b) moinho de disco para redução granulométrica.



Fonte – Autoria própria (2021).

A terceira etapa foi o peneiramento da amostra, onde primeiramente, o material foi colocado em estufa por 24h a temperatura de 105 °C, obtendo posteriormente uma massa de 1,940 kg. Em seguida, conforme a Figura 21, utilizou-se peneiras de telas com tamanhos de 19,050 mm; 6,3 mm; 4,0 mm; 2,80 mm; 0,500 mm; 0,295 mm; 0,208 mm; 0,147 mm e 0,104 mm, conforme Carrisso e Correia (2004), Daniel (2018) e com base na norma da ABNT (2018a), a qual são colocadas em um agitador RO-TAP para realização do peneiramento.

Figura 21 – Processo de peneiramento do coque: (a) peneiras de malha na unidade *mesh* Tyler, (b) agitador RO-TAP e (c) peneiras sobre o agitador.



Fonte – Autoria própria (2021).

A balança foi tarada e cada peneira pesada, para obter a massa de coque. A peneira de 19,050 mm foi inserida apenas para complementar a capacidade do RO-TAP que é de 9 peneiras. A massa total de coque foi dividida por 4, visto que, pelo tamanho de cada peneira não tolerariam o todo, sendo 485 g distribuídos para cada 20 minutos de agitação.

Para o percentual de retidas utilizou-se a Equação 15, e a Equação 16a e 16b para o percentual de passantes na malha.

$$\%Retida = \frac{m_i}{M_t} \times 100 \quad (15)$$

$$\%Passante = (100 - \%Retida) \quad (16a)$$

$$\%Passante = (x - \%Retida) \quad (16b)$$

3.2.4.2 Tratamento dos materiais a sinterizar

Na granulometria das matérias-primas, a metodologia aplicada se baseou nos estudos de Daniel (2018) e Felipe (2019), e as normas ABNT (2009) e ABNT (2018a), conforme o processo de peneiramento com o conjunto das malhas 6,35 mm; 4,0 mm; 2,80 mm; 1,68 mm; 1,00 mm; 0,500 mm; 0,295 mm; 0,208 mm; 0,147 mm e 0,104 mm. As partículas de FMF, CL e FCC, não podem ser grossas para não degradar o sínter e nem muito finas para não atrapalhar o fluxo de ar dentro do reator. Permitindo uma boa eficiência e aumento da resistência do sínter, gerando uma boa produtividade e rendimento.

A pesagem das amostras consistiu em separar 8,5 kg de FMF, 2 kg de FCC, 2 kg de CL e 0,850 kg de coque, e coloca-los na estufa por 24h a temperatura de 105 °C. Portanto, foi

colocada uma quantidade excedente de massa para evitar possíveis perdas após a secagem. A massa utilizada foi 70% de FMF, 10% de FCC, 12% de CL e 8% de coque, como mostra a Figura 22. O restante que sobrou foi colocado em seus devidos recipientes para serem usados na produção de outro sínter.

Figura 22 – Separação e secagem das matérias-primas.



Fonte – Autoria própria (2021).

3.2.5 Teor de umidade ótima

Na determinação da umidade ótima, foi utilizado os estudos de Mourão (2017), Daniel (2018) e Felipe (2019), a qual o teor de umidade adaptável ficou entre os intervalos de 7 a 11%. O percentual obtido neste trabalho foi de 7%, mas se utilizou de 10% de umidade, visto que com o percentual anterior as micropelotas que constituíam a mistura não aglomeraram adequadamente. Então, optou-se por aumentar o teor de umidade para que houvesse uma melhor formação das micropelotas e não ocorresse interferência no fluxo de ar devido ao aumento da massa no leito de sinterização.

3.2.6 Micropelotização

Para misturar os materiais utilizou-se um tambor pelletizador, como mostra a Figura 23, sendo posicionado e inclinado a 45° para obter o melhor manuseio. Nesta etapa ocorre a mistura da matéria-prima juntamente com o volume de 10%, estipulado a partir da análise da umidade ótima. Sendo respingada de forma controlada por um borrifador, gerando a aglomeração das partículas finas e aumentando sua granulometria.

Figura 23 – Utilização do pelletizador na mistura das matérias-primas.



Fonte – Autoria própria (2021).

O material de 10 kg foi dividido em duas partes, sendo 5 kg para cada processo de micropelotização e retirando-se também 10% da massa de água, tendo 500 mL para a mistura. O material foi misturado e micropelotizado aos poucos, como mostra a Figura 24.

Figura 24 – Micropelotização das matérias-primas.

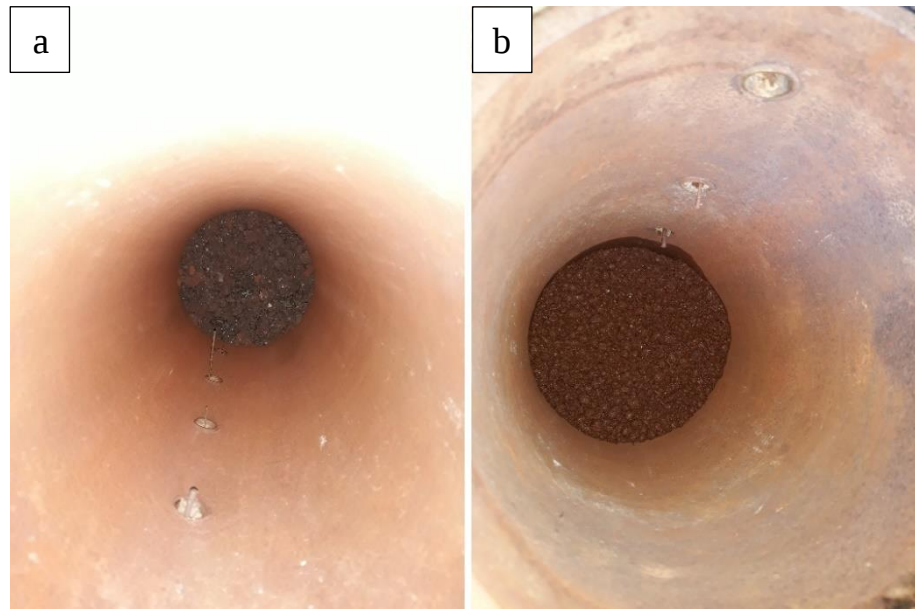


Fonte – Autoria própria (2021).

3.2.7 Abastecimento da carga no reator vertical de leito fixo

Após o procedimento de micropelotização conforme Daniel (2018), a falsa grelha foi abastecida no reator com dosagens em formato de cruz, com o intuito de manter a uniformidade no nível do material. Em seguida, foi adicionada a mistura micropelotizada com a mesma uniformidade, conforme a Figura 25.

Figura 25 – (a) Falsa grelha e (b) abastecimento com a carga.



Fonte – Autoria própria (2021).

Avaliou-se a velocidade do ar com o reator vazio, cheio e após o processo de sinterização, verificando também a média dessas velocidades. Foi adicionada uma camada de MCV para dar início a ignição da combustão, como mostra a Figura 26. De modo que, a processo de sucção do exaustor pudesse realizar a transferência de calor de cima para baixo, de acordo com Telles (2015) e Quaresma *et al.* (2017). A chama foi desligada quando a temperatura do termopar 1 permaneceu constante.

Figura 26 – Processo de sinterização.

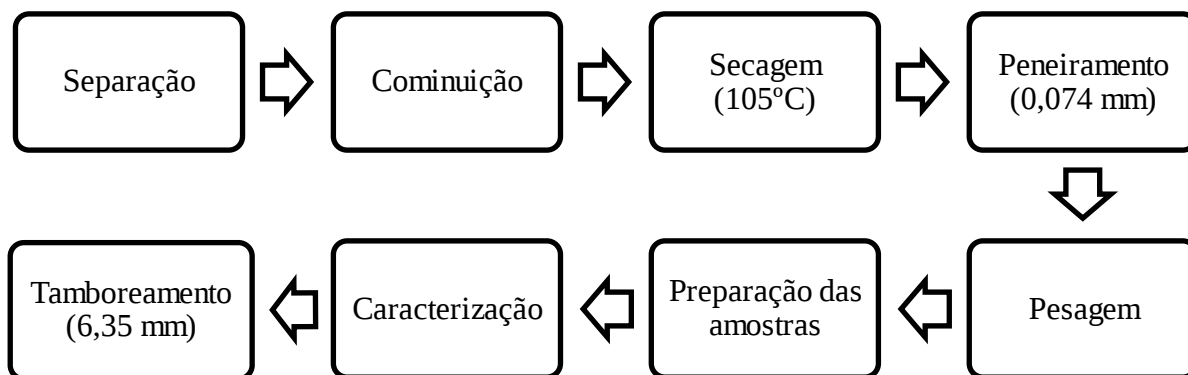


Fonte – Autoria própria (2021).

3.2.8 Caracterização do sínter

No processo de caracterização das amostras de sínter, a preparação ocorreu conforme o fluxograma da Figura 27.

Figura 27 – Fluxograma das etapas de caracterização das amostras de sínter.



Fonte – Autoria própria (2021).

As matérias-primas assim como os sínteres 1 e 2 produzidos, foram caracterizados quanto a sua estrutura mineralógica, físico-química e morfológicas, como forma de avaliação da qualidade do produto.

Portanto, as amostras foram submetidas a análises em MEV/EDS (utilizando o equipamento *PentaFET Precision – OXFORD Instruments*, no laboratório do Museu Paraense Emílio Goeldi), FRX, DRX (através do programa *X'Pert HighScore Plus*) e *tumbler test* – teste de tamboreamento. Conforme os procedimentos realizados por Daniel (2018), Felipe (2019), Iglesias *et al.* (2013), Mesquita Filho *et al.* (2018) e Telles (2015), dentro da norma ABNT (2018b).

No teste de tamboreamento, seguiu-se os procedimentos de Telles (2015), Daniel (2018) e Felipe (2019), utilizando 1 kg de cada sínter produzido retido nas peneiras de 7,93 e 9,52 mm, levando-os posteriormente ao pelotizador por 10 minutos para o processo de abrasão. No qual se classificou os materiais na peneira de 6,35 mm, expressando os resultados dos percentuais de passantes e retidos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos nos tópicos seguintes, foram realizados para verificar e quantificar a eficiência do processo de sinterização. Assim como compará-lo com o sinter produzido com moinha de carvão vegetal.

4.1 Análise granulométrica dos materiais para sinterização

Para as matérias-primas, foi aplicado a mesma faixa granulométrica descrita por Lobato, Villegas e Mansur (2015), Simões *et al.* (2017), Daniel (2018) e Felipe (2019), sendo para o minério de ferro de 6,3 a 0,104 mm, a carepa e o fundente de 5,0 a 0,104 mm. A granulometria do coque utilizada, foram os valores de 3,0 a 0,104 mm conforme Silva, J (2011) e Berti (2013), como mostra a Tabela 5.

Tabela 5 – Análise granulométrica do coque.

Peneira (mesh Tyler)	Abertura D# (mm)	Massa retida (g)	% Retida	% Passante
3/4	19,050	1	0,05	99,95
1/4	6,300	69,28	3,57	96,38
5	4,000	327,6	16,89	79,49
7	2,800	368,55	18,99	60,50
32	0,500	222,33	11,46	49,04
48	0,295	158,36	8,16	40,88
65	0,208	162,99	8,40	32,48
100	0,147	217,53	11,21	21,27
150	0,104	129,65	6,70	14,57
Fundo	0	282,71	14,57	0,00
Total		1.940	100	

Fonte – Autoria própria (2021).

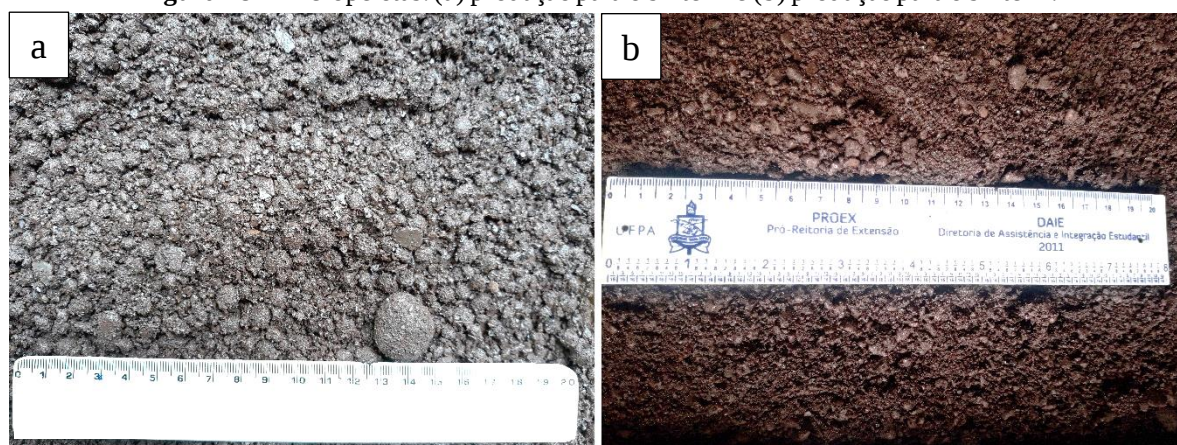
No coque, os valores que não estiveram dentro da faixa estipulada, foram complementados ao processo em pouca quantidade para que fosse evitado o desperdício. Diante disso, o material foi dividido por granulometria para ser inserido nas etapas seguintes.

4.2 Teor de umidade ótima na formação de micropelotas

Aumentou-se o teor de umidade devido ao fato do percentual de 7%, ter sido insuficiente para se obter uma micropelotização eficiente, o que comprometeria a circulação do fluxo de ar, devido a necessidade de aumento de massa da mistura para formar o leito de sinterização. Então, optou-se pela umidade de 10% que está contido no intervalo de 7 a 11%, estando de acordo com Mourão (2017), Daniel (2018) e Felipe (2019).

Após a etapa de mistura do material com o teor de 10%, obteve-se a formação das micropelotas como resultado para a produção dos sínteres, como mostra a Figura 28.

Figura 28 – Micropelotas: (a) produção para o sínter 1 e (b) produção para o sínter 2.



Fonte – Autoria própria (2021).

O teor de umidade ótima beneficia a permeabilidade no leito de sinterização no decorrer da queima, sendo assim, são fundamentais para alcançar um bom desempenho no processo.

4.3 Velocidade do ar e tempo de sinterização

O ar que estava atravessando o reator vazio, foi medido para verificar a que velocidade este poderia percolar o leito. Então, constatou-se que a quantidade de ar que circulava, seria suficiente para o processo de sinterização, conforme mencionado por Policarpo (2012) e Flores (2014).

Durante a sinterização, foi verificado o fluxo de ar que estava circulando no material, onde notou-se que a propagação de calor foi proporcional a entrada de ar que percolava o leito. Após o processo ser concluído em ambos, foram analisados os dados coletados e observados no sínter 1 que o tempo da queima, velocidade das reações e de sinterização foi mais rápido que o sínter 2, como mostra a Tabela 6.

Tabela 6 – Velocidade do ar para sinterização.

Medições (m/s)	1	2	3	4	5	Vel. ar média
Vel. ar vazio (sínter 1)	14,10	14,08	14,13	14,15	14,14	14,12
Vel. ar vazio (sínter 2)	14,08	14,09	14,11	14,10	14,07	14,09
Vel. ar cheio (sínter 1)	1,33	1,37	1,42	1,40	1,43	1,39
Vel. ar cheio (sínter 2)	0,98	0,90	0,84	0,83	0,86	0,882
Vel. ar sínter 1	1,30	1,35	1,28	1,37	1,31	1,32
Vel. ar sínter 2	2,40	2,22	2,36	2,36	2,42	2,376

Fonte – Autoria própria (2021).

A temperatura máxima alcançada e o tempo total nos dois processos de sinterização foi de 1702 °C para o sínter 1 em um tempo de 4 h e 15 min., e 1754 °C para o sínter 2 em um tempo de 5 h e 35 min.

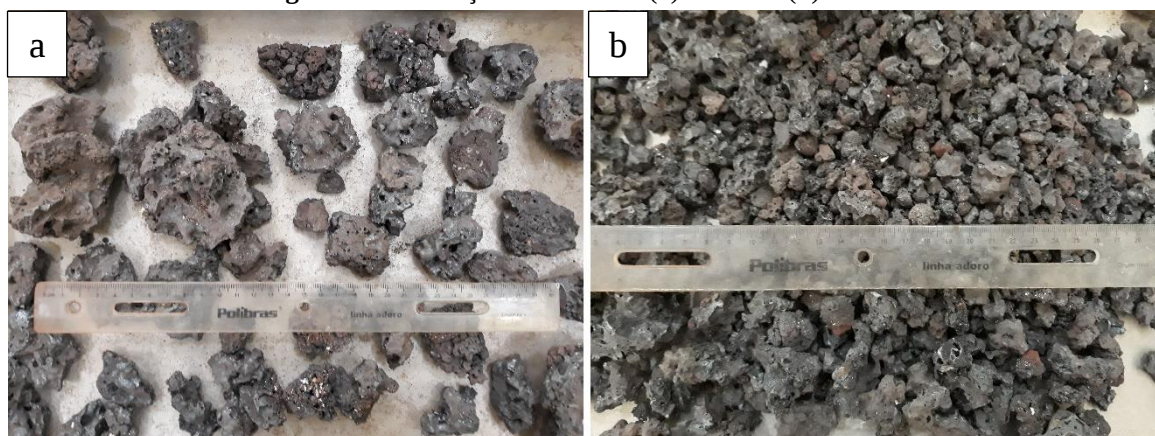
No sínter 2, nota-se que a velocidade do ar após a sua formação foi maior que no sínter 1. Então, entende-se que no sínter 2, o material gerado deve ter apresentado a formação de pedaços maiores, o que proporciona um maior fluxo de ar, havendo também uma possível formação de fase vítrea, visto que a temperatura alcançou o ponto de fusão de algum mineral não metálico. Já que, a temperatura alcançada para as reações na sinterização, foi muito além do que é mostrado por Lopes (2012) e Geerdes, Vliet e Toxopeus (2004).

Este fator, pode influenciar na redutibilidade do sínter (formação de uma camada vitrificada que impede de o ferro ser reduzido pelo carbono), na formação de partículas menores e na sua resistência mecânica (FELIPE, 2019). Estando conforme os estudos de Policarpo (2012), Flores (2014) e Maxwell (2021), no que diz respeito a temperatura das reações não serem controladas.

4.4 Análise visual do sínter produzido

As características visuais dos sínteres produzidos foram diferentes, sendo o primeiro experimento com a formação de tamanhos maiores, já o segundo apresentou variação nos tamanhos, sendo a predominância de pedaços menores, como mostra a Figura 29.

Figura 29 – Produção dos sínteres: (a) sínter 1 e (b) sínter 2.



Fonte – Autoria própria (2021).

As diferenças na formação, podem estar relacionadas as reações químicas decorrentes da percolação dos gases dentro do leito e também devido a umidade do ar presente no ambiente no dia dos experimentos, assim como a micropelotização e a distribuição da mistura no interior do leito de sinterização. A formação de pedaços menores no sínter 2, é devido a possível formação da fase vítrea, que durante o processo de resfriamento do material ocorreu sua fragmentação, reduzindo assim, sua resistência mecânica, no qual será avaliada pelo teste de tamboreamento.

As características para determinar a boa qualidade do sínter foram quantificadas por características de porosidade, granulometria do material e identificação das fases mineralógicas presentes, conforme mencionado por Silva, G. (2011) e Cardoso (2016).

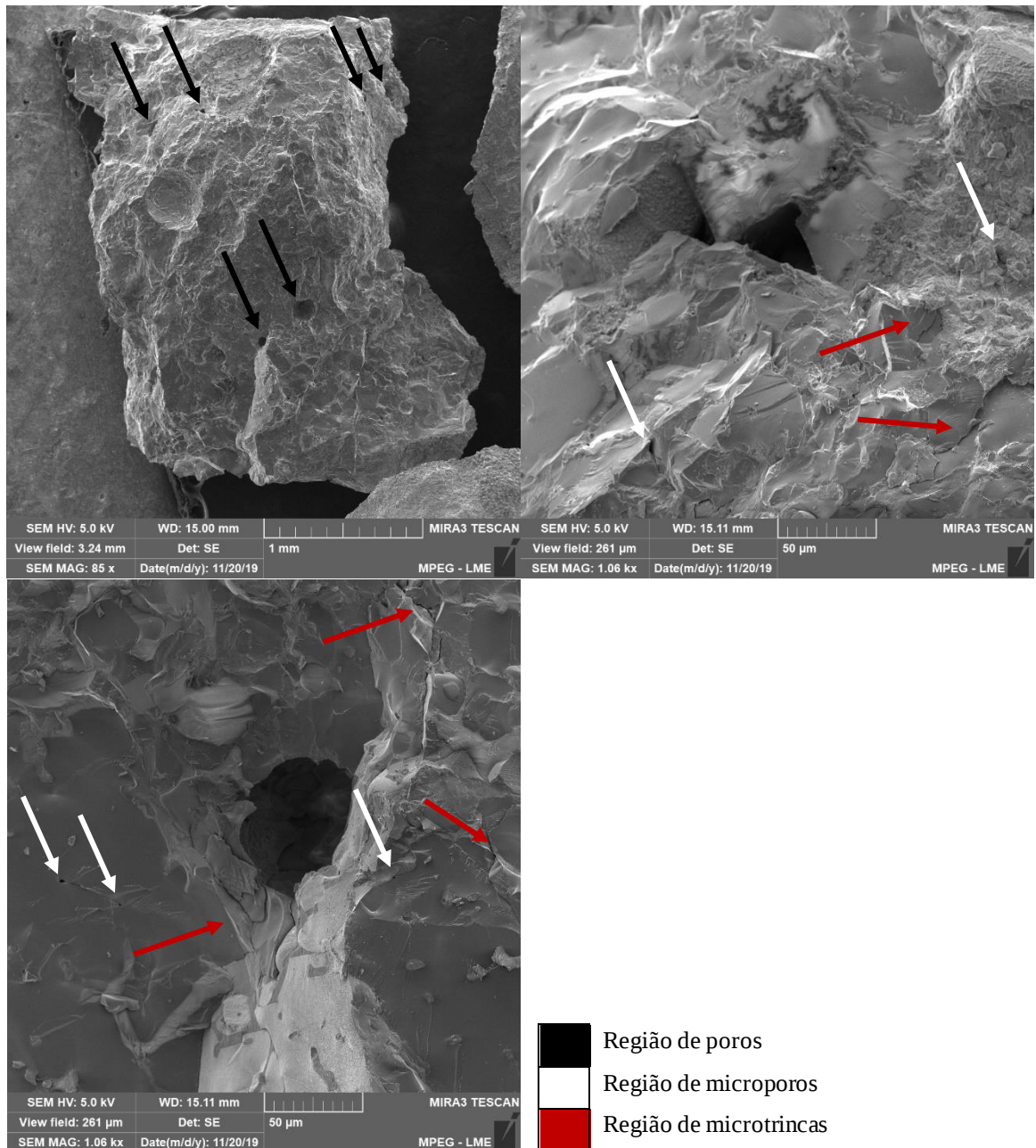
4.5 Caracterização do sínter

As caracterizações mencionadas nos tópicos seguintes, foram realizadas para avaliar a eficiência do processo de sinterização.

4.5.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A caracterização dos sínteres produzidos, se faz importante para determinar a morfologia do material, sendo influentes nas propriedades do ferro gusa e aço. A micrografia do sínter 1 é apresentada na Figura 30.

Figura 30 – Micrografia do sínter 1.

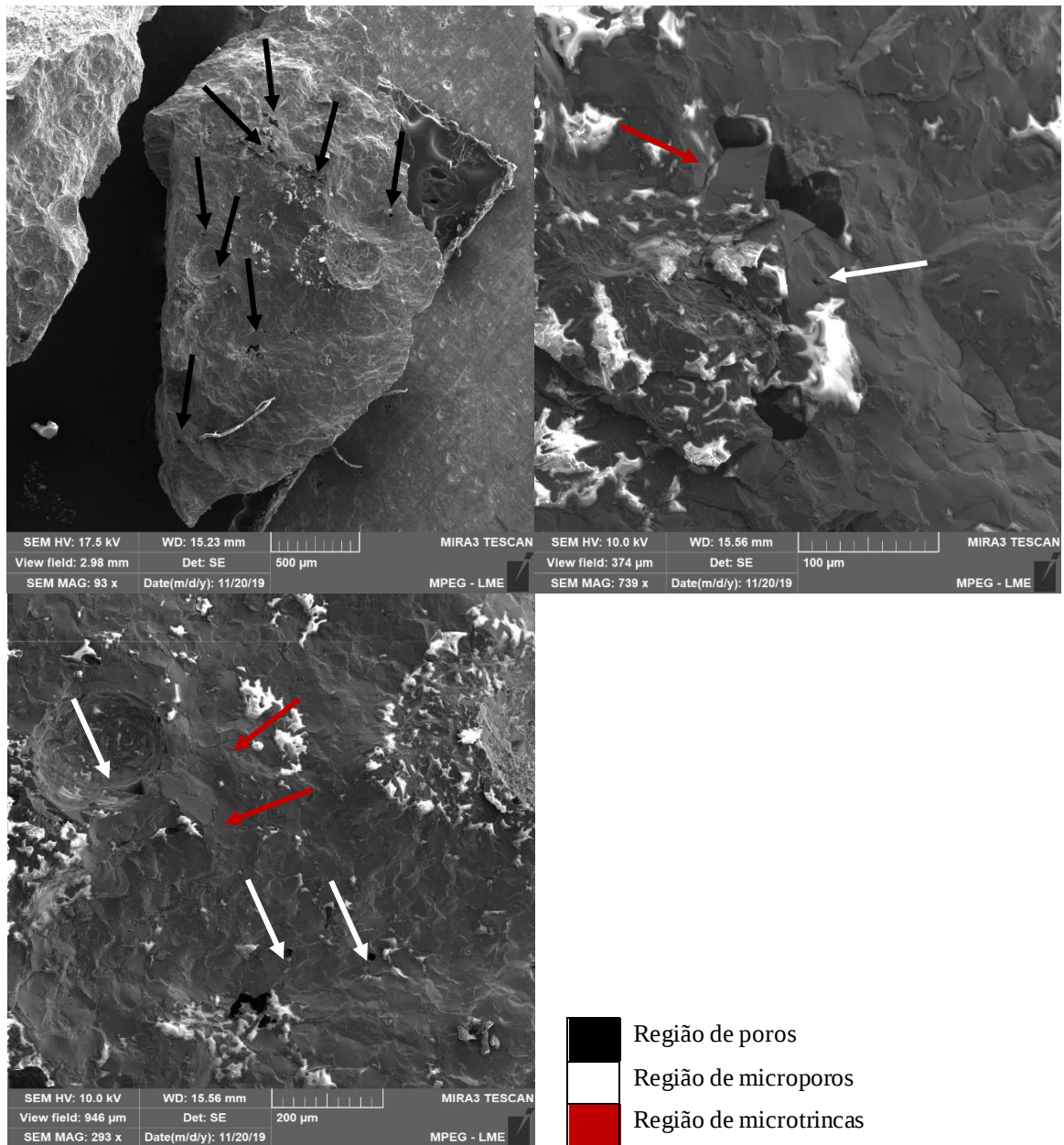


Fonte – Autoria própria (2021).

Observou-se nesta micrografia regiões com poros, microporos e microtrincas em pouca quantidade, não sendo possível notar partes não sinterizadas. Sendo assim, entende-se que esta amostra foi totalmente sinterizada, semelhante as análises descritas por Iglesias *et al.* (2013) e Felipe (2019), mas a presença dos poros está em menor quantidade. Notam-se também formas irregulares no sínter semelhantes aos mencionados por Daniel (2018), bem como a presença de partículas mistas, regiões de nucleação e aglomeração.

Na amostra de sínter 2 as características foram diferentes do sínter 1, como mostra a Figura 31.

Figura 31 – Micrografia do sínter 2.



Fonte – Autoria própria (2021).

Na micrografia do sínter 2 observou-se diferenças em comparação ao primeiro, os poros estão em maior quantidade e possuem poucos microporos, assim como as microtrincas. Nota-se também, partes que não foram sinterizadas (regiões de mancha branca), relacionadas aos finos de calcário calcítico que não fundiram. Há presença de partículas mistas, formas irregulares, regiões de nucleação e aglomeração, semelhante ao sínter 1, assim como as características relatadas por Daniel (2018) e Felipe (2019).

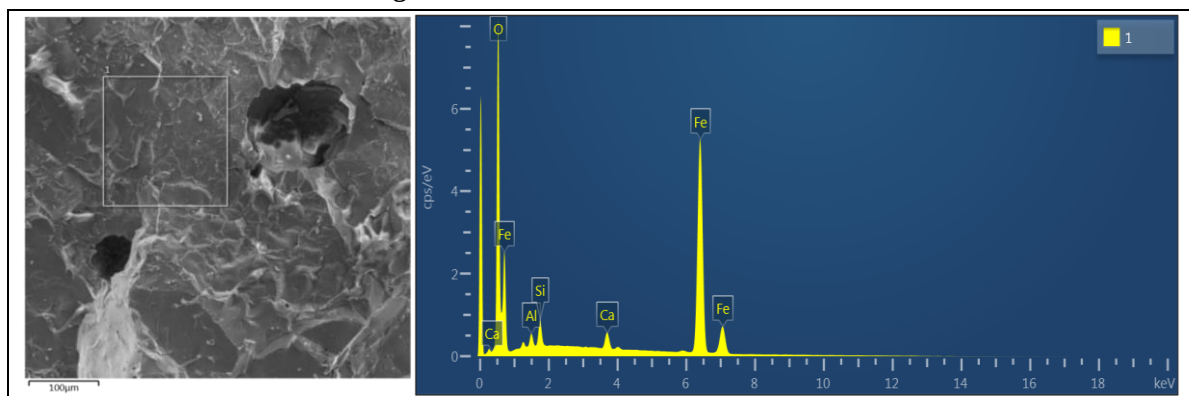
As características das amostras de sínter 1 e 2 não foram totalmente iguais, portanto, conforme Azevedo (2009), Iglesias *et al.* (2013), Angulo (2015) e Catunda (2017) a textura do

material assim como a porosidade, influenciada pela difusão, não será semelhante por conta da diversificação das fases. Visto que, as análises apresentadas tiveram suas diferenças, apesar dos processos serem semelhantes. Então, a forma encontrada no material é decorrente das matérias-primas que foram utilizadas nos processos de sinterização.

4.5.2 Espectroscopia de Energia Dispersiva (MEV/EDS)

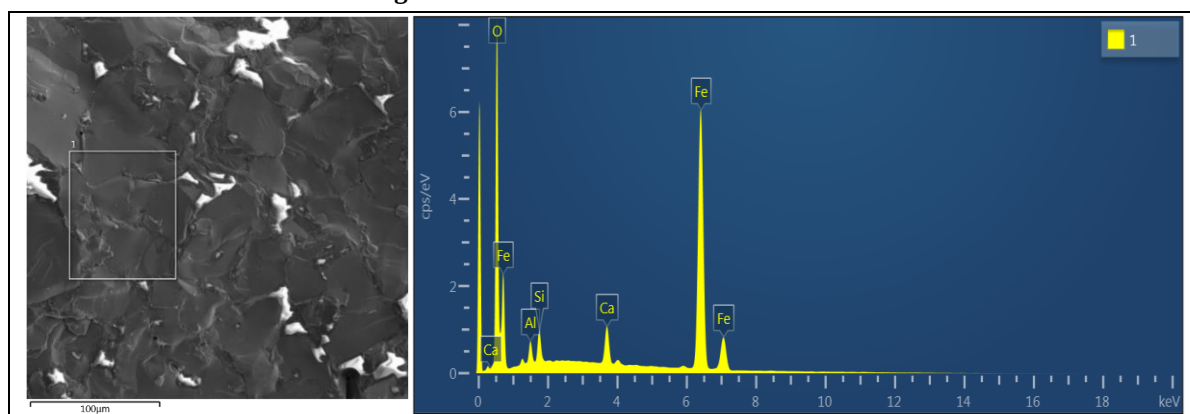
A realização da análise por EDS, como mostra a Figura 32, mediu o percentual quantitativo dos elementos encontrados no sínter 1, sendo as composições: 65,52% de ferro; 30,28% de oxigênio; 1,65% de silício; 1,57% de cálcio e 0,97% de alumínio. A predominância no sínter 1 por conta dos altos teores de Fe e O estão relacionados a presença de FeO, Fe₂O₃ e Fe₃O₄ presentes no DRX das mesmas amostras, em decorrência das composições presentes nas matérias-primas, que na presença do oxigênio formam os óxidos.

Figura 32 – Análise MEV/EDS do sínter 1.



Fonte – Autoria própria (2021).

No sínter 2 os elementos apresentaram pouca diferença, como mostra a Figura 33. Os percentuais obtidos foram: 65,67% de ferro; 28,41% de oxigênio; 2,94% de cálcio; 1,64% de silício e 1,34% de alumínio.

Figura 33 – Análise MEV/EDS do sínter 2.

Fonte – Autoria própria (2021).

Os percentuais do sínter 2 ao serem comparados com o sínter 1, nota-se que, cálcio e alumínio foram maiores, enquanto que, ferro e silício ficaram aproximados e o oxigênio no sínter 1 apresentou o maior valor. Os valores da análise comparados aos percentuais encontrados por Daniel (2018) e Felipe (2019) nos sínters 1 e 2 tiveram suas diferenças, como mostra a Tabela 7.

Tabela 7 – Comparação dos resultados das amostras de sínter.

Sínter 1						Sínter 2					
Autor		Felipe (2019)		Daniel (2018)		Autor		Felipe (2019)		Daniel (2018)	
E	%	E	%	E	%	E	%	E	%	E	%
Fe	65,52	Fe	48,02	Fe	54,38	Fe	65,67	Fe	62,42	Fe	53,44
O	30,28	O	36,06	O	31,43	O	28,41	O	30,43	O	34,01
Ca	1,57	Ca	8,88	Ca	4,75	Ca	2,94	Ca	4,02	Ca	5,71
Si	1,65	Si	5,54	C	4,62	Si	1,64	Si	3,14	C	6,84
Al	0,97	Al	1,50	Al	1,08	Al	1,34				
				Mg	0,76						

Fonte – Autoria própria (2021).

No sínter 1 o percentual de ferro foi maior, os demais elementos apresentaram baixa composição em comparação aos três sínteres. A amostra de Felipe (2019) apresentou maior quantidade nos demais elementos, entretanto, na análise de Daniel (2018) foi detectada a presença de carbono e magnésio, ao qual não é quantificado nas amostras anteriores.

O sínter 2 também apresentou maior quantidade de ferro e menor nos outros elementos, já o silício foi maior no de Felipe (2019), porém o oxigênio e o cálcio foram maiores no sínter de Daniel (2018).

4.5.3 Fluorescência de Raios-X (FRX)

As análises de FRX das matérias-primas detectaram a presença de vários elementos, principalmente impurezas que prejudicam o processo de sinterização, como os óxidos de enxofre e fósforo, como mostra a Tabela 8.

Tabela 8 – FRX das matérias-primas e sínteres.

FMF		FCC		CL		COQUE		Sínter 1		Sínter 2	
Comp.	%	Comp.	%	Comp.	%	Comp.	%	Comp.	%	Comp.	%
Fe ₂ O ₃	80,6	Fe ₂ O ₃	3,46	Fe ₂ O ₃	51,4	Fe ₂ O ₃	28,70	MgO	0,4002	SiO ₂	8,851
SiO ₂	5,83	SiO ₂	5,86	SiO ₂	0,79	SiO ₂	23,02	Al ₂ O ₃	1,865	K ₂ O	0,373
K ₂ O	0,37	K ₂ O	0,43	K ₂ O	0,15	K ₂ O	2,39	SiO ₂	7,816	CaO	8,605
CaO	1,81	CaO	54,03	CaO	0,41	CaO	7,48	P ₂ O ₅	0,163	TiO ₂	0,1843
Al ₂ O ₃	5,5	Al ₂ O ₃	4,04	Al ₂ O ₃	0,29	Al ₂ O ₃	11,53	SO ₃	0,1548	Cr ₂ O ₃	0,109
MgO	0,31	MgO	3,14	MnO	0,29	MnO	1,34	K ₂ O	0,34	MnO	0,5734
TiO ₂	0,33	TiO ₂	0,29	CuO	0,12	TiO ₂	1,97	CaO	7,63	Fe ₂ O ₃	81,30
MnO	0,83	SrO	0,16	SO ₃	0,12	SO ₃	13,18	TiO ₂	0,1536		
P ₂ O ₅	0,27					ClO ₂	0,53	Cr ₂ O ₃	0,1604		
						V ₂ O ₅	0,26	MnO	0,6201		
						Na ₂ O	5,69	Fe ₂ O ₃	80,69		
						NiO	0,05				
						ZnO	0,19				
						P ₂ O ₅	1,21				
						MgO	2,41				
PF	3,94	PF	28,44	PF	46,33	PF	0,05	PF	0	PF	0
Total	99,79	Total	99,85	Total	99,9	Total	100	Total	99,9931	Total	99,9957

Fonte – Autoria própria (2021).

Como o FMF é de origem hematítica, o sínter tem a predominância de hematita. Na CL, o percentual de ferro encontrado está de acordo com a faixa mencionada por Duarte (2016) e no coque o valor foi considerável, sendo identificado a presença de impurezas, conforme mencionado por Geerdes, Vliet e Toxopeus (2009), Silva, G (2011) e Barbosa (2018), já no FCC o valor foi baixo.

A perda ao fogo para o FMF por ser um valor baixo, entende-se que há pouca presença de matéria orgânica. Para o FCC, devido a calcinação do carbonato de cálcio, houve uma quantidade considerável de matéria orgânica. Já o coque, foi o mais baixo, pelo fato do processo

de coqueificação liberar grande parte das matérias voláteis. Porém, a CL foi o que apresentou maior perda de matéria orgânica, fator que de acordo com Lobato, Villegas e Mansur (2015), é em decorrência da presença de óleo, podendo chegar em até 20% da sua constituição.

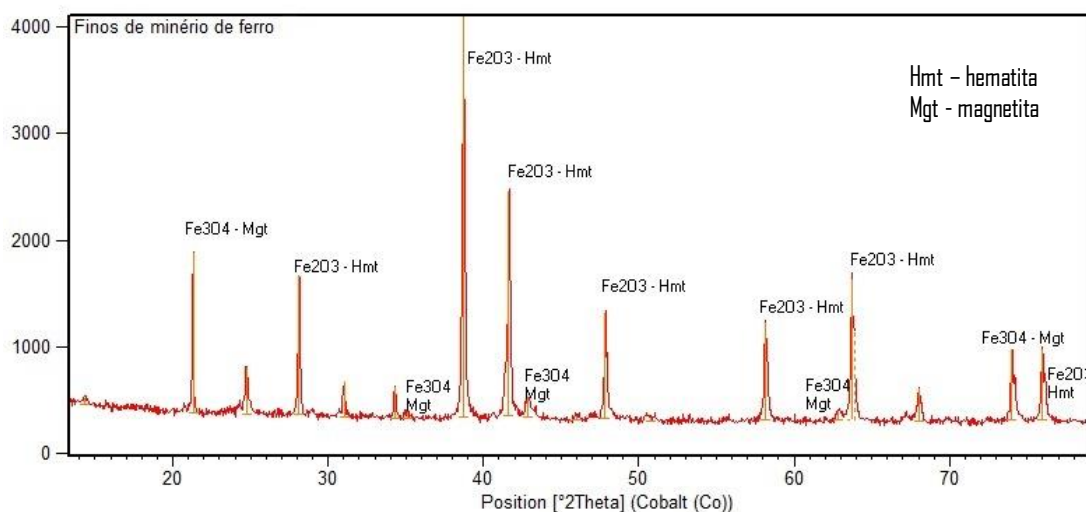
O sínter 1 apresenta quantidades de fósforo abaixo de 1% e o enxofre entre 1 e 0,02%, estando dentro dos padrões das siderúrgicas, conforme Goncalves (2005), Silva, G. (2011), Cardoso (2016), Mesquita Filho *et al.* (2018) e Siderurgia (2021). Os teores destes contaminantes também foram diferentes quando comparados com os de Felipe (2019). No sínter 2 não houve presença destes materiais e a PF de 0% se deu pela eliminação da matéria orgânica no próprio processo de sinterização.

No sínter 1 e 2 os teores de hematita foram 80,69% e 81,30%, sendo valores próximos quando comparados com o de Felipe (2019). O teor de ferro no sínter produzido neste trabalho foi superior a faixa mencionada nos estudos de Cardoso (2016) e Silva, G. (2011). Portanto, essas quantidades de ferro superiores ao estabelecido, podem ser explicadas pela influência direta das matérias-primas. Visto que, a CL e o coque possuem quantidades consideráveis de óxido de ferro, o que acarreta na presença de outras fases de ferro no material, identificadas no DRX da mesma amostra.

4.5.4 Difração de Raios-X (DRX)

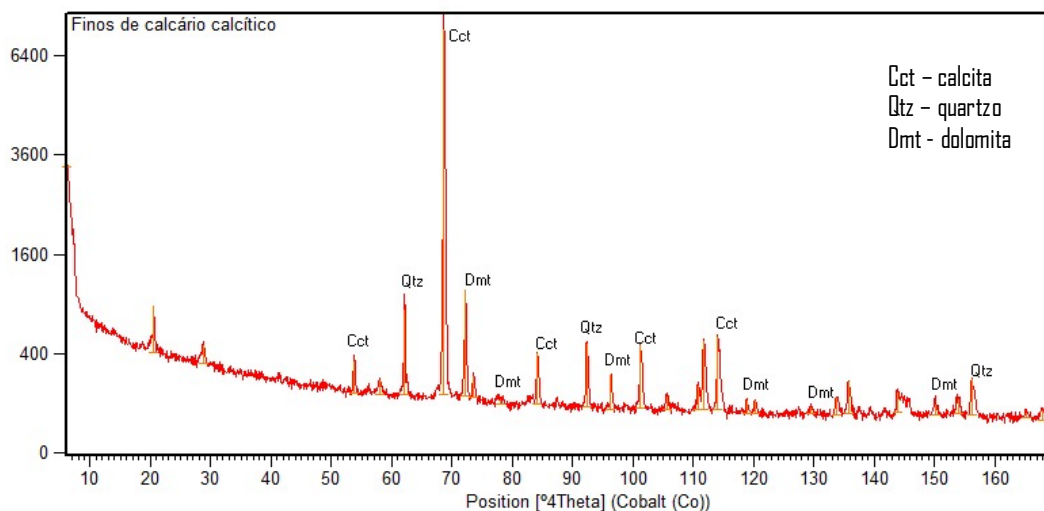
As fases cristalinas das matérias-primas e dos sínteres produzidos, foram identificados através da análise de DRX, por meio do programa *X'Pert HighScore Plus*. Obtendo gráficos que mostram as fases mineralógicas presentes em cada material.

No FMF, como mostra a Figura 34, os cristais de maior importância identificados foram, os óxidos de hematita (Fe_2O_3) e magnetita (Fe_3O_4), sendo atestado pelos picos que o minério possui predominância de hematita.

Figura 34 – DRX do FMF.

Fonte – Autoria própria (2021).

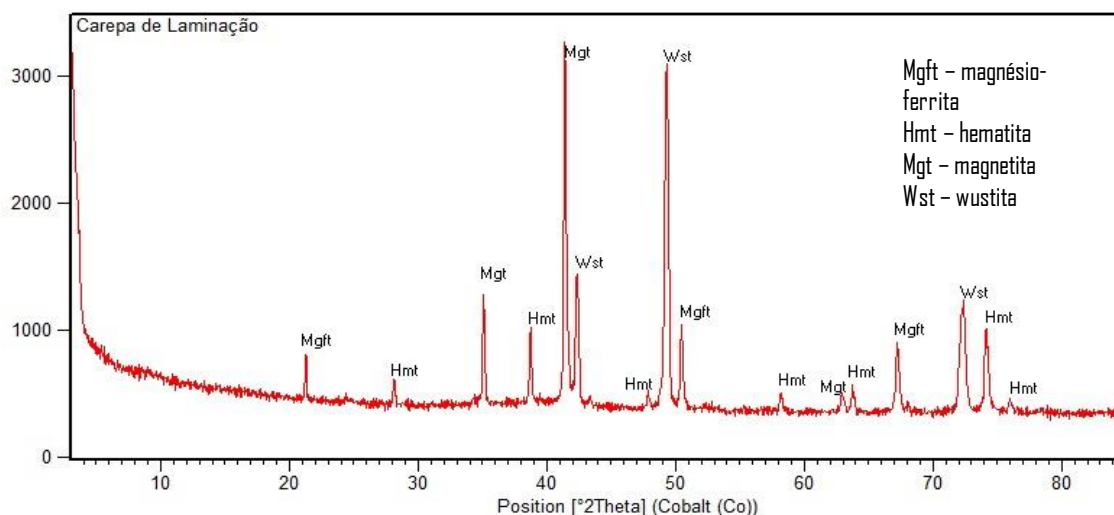
O FCC, como mostra a Figura 35, possui na sua constituição mineralógica a presença de calcita (CaCO_3), dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) e quartzo (SiO_2).

Figura 35 – DRX do FCC.

Fonte – Autoria própria (2021).

Portanto, com base no FRX da Tabela 8 no item 4.5.3 e o DRX desta amostra, a composição e o maior pico de CaO, contribui para identificar que o material tem sua constituição de origem calcítica.

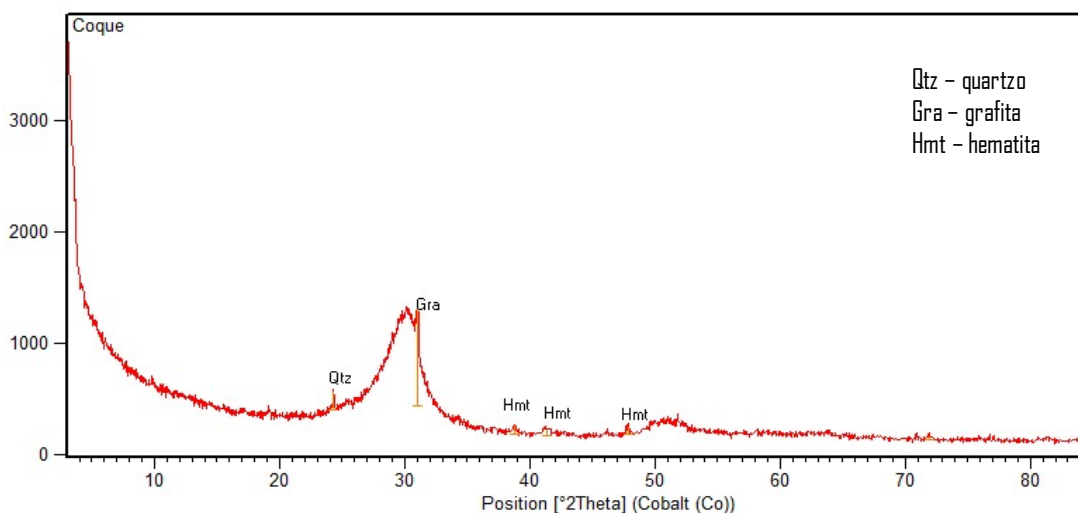
A CL, como mostra a Figura 36, apresenta os principais picos relacionados ao ferro pela presença de wustita (FeO), hematita (Fe_2O_3), magnetita (Fe_3O_4) e magnésio-ferrita (MgFe_2O_4).

Figura 36 – DRX da CL.

Fonte – Autoria própria (2021).

Com base no FRX da Tabela 11 no item 4.5.3, os dados obtidos no DRX confirmam o caráter ferrítico da carepa, que é o esperado, por se tratar de um material oriundo da oxidação na parte superficial dos lingotes de aço, pela queda brusca de temperatura no ato de conformação e resfriamento.

No coque, o principal pico, como mostra a Figura 37, foi o da grafita (C), apesar de ser um material predominantemente amorfo, ou seja, não possui uma estrutura cristalina. Então, não haverá picos definidos.

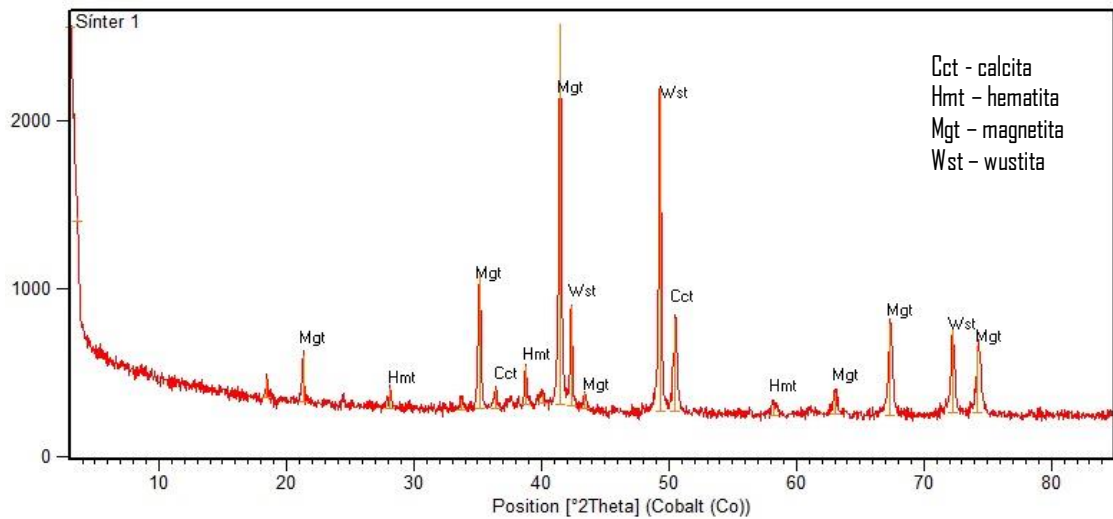
Figura 37 – DRX do coque.

Fonte – Autoria própria (2021).

O DRX do sínter 1, tendo como base a análise do FRX na Tabela 11 no item 4.5.3, apresentou o esperado para as fases cristalinas de wustita, hematita e magnetita, tendo apenas a

presença pouco significativa da calcita, como mostra a Figura 38.

Figura 38 – DRX do sínter 1.

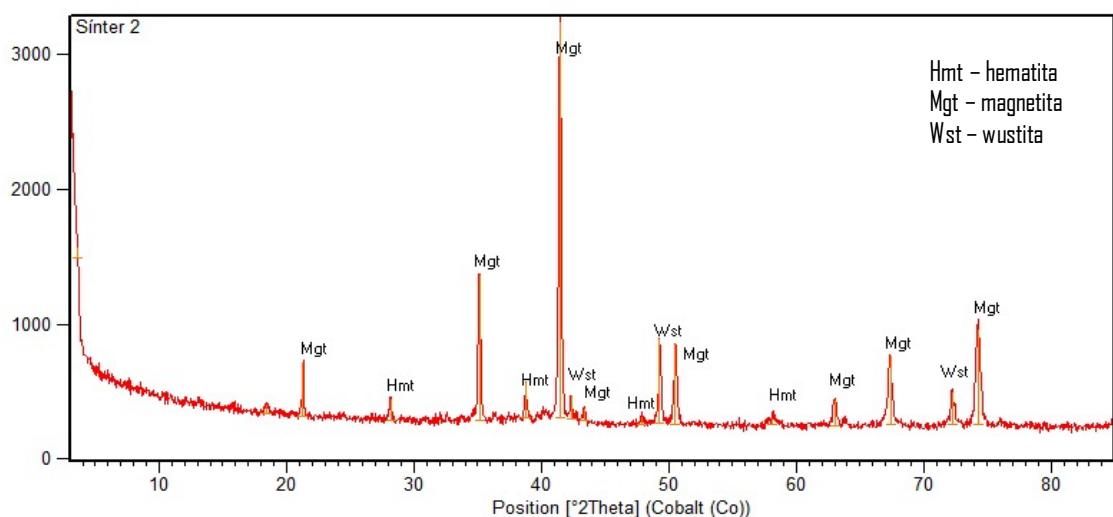


Fonte – Autoria própria (2021).

A intensidade do pico de wustita, pode ter sofrido essa influência por conta da adição de carepa, propiciando esta formação. Conforme mencionado por Cunha *et al.* (2006) e Leite (2008), referindo-se à influência que a carepa pode ocasionar por conter outros óxidos de ferro em sua constituição. Não estando distante das fases diversificadas, obtidos por Daniel (2018) e Felipe (2019).

O sínter 2, como mostra a Figura 39, também apresentou as fases cristalinas de wustita, hematita e magnetita, mas a presença de calcita não foi detectada. A intensidade do pico foi apenas para a hematita, semelhante ao encontrado por Daniel (2018) e Felipe (2019).

Figura 39 – DRX do sínter 2.

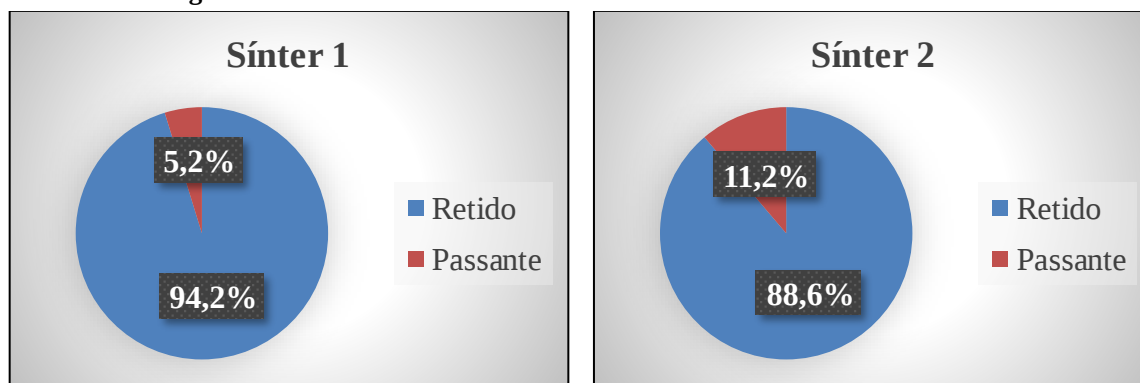


Fonte – Autoria própria (2021).

4.5.5 Tamboreamento do sínter (*tumbler test*)

O teste de tamboreamento, conforme as normas estabelecidas na ABNT (2018b), mostra os resultados dos materiais retidos em relação aos passantes na peneira com malha de 6,35 mm, como mostra o gráfico na Figura 40.

Figura 40 – Gráfico com resultado do teste de tamboreamento do sínter 1 e 2.



Fonte – Autoria própria (2021).

A análise destes resultados, mostrou que o sínter 1 apresentou melhor resistência, retendo 94,2% da amostra, indicando boa resistência a abrasão e baixa concentração de finos, se comparado ao sínter 2 com 88,6%. Em relação aos trabalhos de Felipe (2019) e Daniel (2018), os melhores sínteres apresentaram 83% e 57,4% de material retido, respectivamente, mostrando que a resistência do sínter neste trabalho foi maior em relação as análises realizadas pelos autores. Tendo também a complementação que, para uma boa qualidade do sínter, a adição de 12% da carepa tornou ainda mais resistente, conforme mencionado por Lobato, Villegas e Mansur (2015), quando diz que 5% é o suficiente para dar resistência ao material.

Com base nas análises do FRX no item 4.5.3, o sínter 2 possui uma melhor qualidade, pelo fato de possuir maior percentual de ferro, assim como por não ter a presença de enxofre e fósforo. Porém, em relação a resistência mecânica, o sínter 1 apresenta uma qualidade maior. Então, como mencionado no item 4.4, esta fragilidade no sínter 2 pode ter sido ocasionada pela possível formação de fase vítrea, por conta da elevada temperatura. O que deve ter influenciado em uma maior fragmentação durante o processo de abrasão, gerando finos e pedaços menores, como mostra a Figura 41.

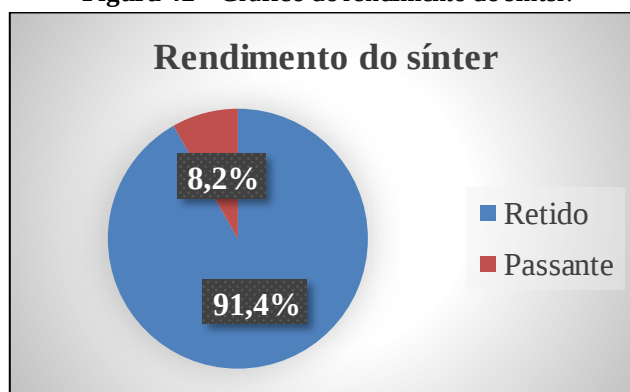
Figura 41 – Resultado do tamboreamento: (a) sínter 1 e (b) sínter 2.



Fonte – Autoria própria (2021).

O rendimento da sinterização foi avaliado para medir a resistência média do sínter. Portanto, foi verificado a média das massas retidas e passantes nas amostras de sínteres, ao qual obteve-se o rendimento total do processo, como mostra a Figura 42.

Figura 42 – Gráfico do rendimento do sínter.



Fonte – Autoria própria (2021).

O rendimento da produção de sínter com base nos dados obtidos foi de 91,4% de retidas e 8,2% de passantes. Em relação ao apresentado por Daniel (2018) foi maior, pois o seu rendimento foi de 73,8% de retidas e 26,2% de passantes e Felipe (2019) com 83% de passantes e 17% de retidas. Havendo um bom aproveitamento das matérias-primas na obtenção do sínter, sendo superior a 90%.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nas matérias-primas, foram avaliados a questão da granulometria e a composição química presente. No qual a classificação granulométrica, influenciou na obtenção de um material com tamanhos adequados. Enquanto que, as análises químicas caracterizaram o tipo de material, como ferro e outros elementos. Onde quantificou-se os elementos presentes que poderiam ser detectados posteriormente no síter.

Na avaliação macroestrutural dos sínteres produzidos, foi possível notar que nos materiais obtidos houve diferenças em relação aos tamanhos, onde no síter 1 a presença fora predominantemente de tamanhos maiores, enquanto que no 2 a predominância foi de tamanhos menores. Na caracterização microestrutural dos sínteres por meio do MEV, foi observada a presença de poros e microporos, sendo estes, importantes para resistência ao choque térmico e abrasão do material, assim como partes sinterizadas e não sinterizadas. Enquanto que, por meio do MEV/EDS, obteve-se os percentuais de alguns óxidos presentes nas amostras.

Os resultados obtidos por meio do FRX e DRX, mostraram que os elementos de interesse, como os óxidos de ferro (FeO , Fe_2O_3 e Fe_3O_4) e os óxidos de enxofre e fósforo (SO_3 e P_2O_5), estavam dentro dos parâmetros de qualidade, no que se refere ao teor e presença de cada elemento.

O teste de tamboreamento, indicou que o síter 1 apresentou uma maior resistência a abrasão em relação ao síter 2, como também ao produzido com carvão vegetal. Onde notou-se uma possível formação de fase vítrea no síter 2, referente a fusão dos minerais durante a queima do material, o que pode ter acarretado na sua fragmentação durante o resfriamento.

A incorporação da Carepa influenciou de forma positiva, aumentando o teor de ferro no síter, assim como contribuindo para sua resistência mecânica. Visto que, segundo alguns autores, a adição de 5% é o suficiente para garantia desse atributo. Já o coque, utilizado como combustível, teve sua influência no teor de óxidos contaminantes, em destaque o SO_3 .

6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Utilizar outros teores de Coque;
- Utilizar outros teores de Carepa;
- Verificar outros resíduos da siderurgia que podem ser incorporados no processo de sinterização;
- Produzir estudos que visem reduzir a liberação dos gases nocivos ao meio ambiente.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10004**: Classificação de Resíduos. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR ISO 4701**: Minérios de ferro e pré-reduzidos - determinação da distribuição granulométrica por peneiramento. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7181:2018**: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2018a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR ISO 3271**: Minérios de ferro como insumo para alto-forno e redução direta - determinação dos índices de tamboreamento e abrasão. Rio de Janeiro, 2018b.
- AHN, H.; CHOI, S.; CHO, B. Process simulation of iron ore sintering bed with flue gas recirculation: Part 2–Parametric variation of gas conditions. **Ironmaking & Steelmaking**, v. 40, n. 2, p. 128-137, 2013.
- ALVES, F. I. C. **Produção de coque metalúrgico a partir de carvão densificado por vibrocompactação em forno de soleira aquecida**. 2017. 75 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.
- ALEXANDER, Dzhogolik. **O que é carvão de coque e onde ele é usado**. 2017. Nextews. Disponível em: <http://pt.nextews.com/d64412a3/>. Acesso em: 3 maio 2020.
- ANGULO, J. A. P. **Escoamento em meios porosos: efeito da temperatura a altas pressões e baixa permeabilidade: dependência da permeabilidade/porosidade em misturas sólido-fluido**. 2015. 95 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2015.
- AZEVEDO, E. N. de. **Difusão e transporte em meios porosos e colóides: um estudo através de imagens por ressonância magnética nuclear**. 2009. 188 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Ciência de Materiais, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.
- BAPTÍSTA, A. L. de B. **Desenvolvimento de um briquete auto-fundente, multiconstituído de rejeitos, resíduos e descartes recicláveis gerados na planta integrada de produção de aço, aplicado como componente da carga de fornos de redução**. 2016. 195 f. Dissertação (Mestrado Profissional) - Curso de Materiais, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, 2016.
- BARBOSA, F. de L. L. **Degradação mecânica de coque metalúrgico e sinter**. 2018. 103 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.
- BERTI, L. F. **Processamento e manufatura de metais 1**. Engenharia de Materiais – UTFPR. Londrina/ PR, 2013.

CALCÁRIO Friável. Itatinga Calcário e Corretivos LTDA. Disponível em: <http://www.itatinga.com.br/produtos/>. Acesso em: 28 abr. 2020.

CARVALHO, E. A. de; BRINCK, V.; CAMPOS, A. R. de. Aglomeração: Briquetagem. In: **Tratamento de Minérios**. 6. ed. CETEM/MCTIC. Cap. 15, p. 651-674, 2018.

CARDOSO, C. G. L. **Desenvolvimento e caracterização de sínter a partir de resíduos sólidos siderúrgicos para aplicação em aciaria**. 2016. 86 f. Dissertação (Mestrado Profissional) - Curso de Materiais, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, 2016.

CARVALHO, P. S. L. de, *et al.* **Minério de ferro**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 39, p. 197-233, mar. 2014.

CARRISSO, R. C. C.; CORREIRA, J. C. G. Classificação e peneiramento. In: **Tratamento de Minérios**. 4. ed. revisada. CETEM/MCTIC. Cap.5, p. 195-238. Rio de Janeiro, 2004.

CATUNDA, C. E. G. **Influência da temperatura e de dopantes de cromo na difusão configuracional transiente de óxidos de ferro em meios refratários porosos de alta alumina**. 2017. 164 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

COELHO, R. J. *et al.* Modelos de previsão da qualidade metalúrgica do coque a partir da qualidade dos carvões individuais e do coque obtido no forno-piloto de coqueificação. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 57, n. 1, p. 27-32, 2004.

COMPANHIA Siderúrgica do Pecém - CSP. 2021. O que faz a coqueria de uma siderúrgica?. Disponível em: <https://www.cspecem.com/pt-br/2017/05/o-que-faz-a-coqueria-de-uma-siderurgica/>. Acesso em: 19 abr. 2021.

CUNHA, A. F. D. *et al.* Caracterização, beneficiamento e reciclagem de carepas geradas em processos siderúrgicos. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 59, n. 1, p. 111-116, 2006.

DANIEL, Brenda Thayssa Figueira. **Avaliação da altura do leito de sinterização de finos de minério de ferro em um reator vertical de leito fixo para a produção de sínter**. 2018. 79 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciência e Tecnologia) – Campus Universitário de Ananindeua, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, 2018. Disponível em: <http://bdm.ufpa.br/jspui/handle/prefix/597>. Acesso em: 5 out. 2021.

DUARTE, A. da S. **Síntese e caracterização de sínter utilizando resíduos siderúrgicos com foco na resistência mecânica**. 2016. 96 f. Dissertação (Mestrado Profissional) - Curso de Pós-Graduação em Materiais, Fundação Oswaldo Aranha, Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA, Volta Redonda/ RJ, 2016.

FELIPE, R. F. **Produção e caracterização de sínter de minério de ferro com a incorporação de 12% de carepa de laminação utilizando moinha de carvão vegetal como combustível**. 2019. 69 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, 2019.

FLORES, I. V. **Avaliação da influência do tamanho de partícula sobre as propriedades de carvões coqueificáveis e de coque produzidos em escala de laboratório**. 2014. 165 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

FONSECA, V. O.; CAMPOS, A. R. Aglomeração: pelletização. In: **Tratamento de minérios**. 6. ed. CETEM/MCTIC. Cap.15, p.677-724. Rio de Janeiro, 2018.

GEERDES, M.; VLIET, C.; TOXOPEUS, H. **Modern Blast Furnace Ironmaking**. 2. ed. Amsterdam, IOS Press. 2009.

GEERDES, M.; VLIET, C.; TOXOPEUS, H. **Redução de Minério de Ferro em Alto-Forno**. 2004. Disciplinas da USP. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/mod/resource/view.php?id=175202&forceview=1>. Acesso em: 15 set. 2021.

GONCALVES, W. M. **Adequação do processo de fabricação de aço LD, utilizando ferro-gusa líquido com baixo teor de silício**. 2005. 87 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

HONORATO, E. P. **Adequação granulométrica das matérias-primas e do sistema de segregação contínua (I.S.F), para melhorias na produtividade e qualidade do sinter para os altos-fornos**. 2005. 126 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

IGLESIAS, J. C. A. *et al.* Caracterização quantitativa de sinter. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 7, n. 1-2, p.12-17. São Paulo, 2013.

LEITE, W. F. **Dissolução de óxidos formados a altas temperaturas nos aços elétricos variando-se a temperatura e concentração da solução ácida na decapagem**. 2008. 60 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

LOBATO, N.C.C.; VILLEGAS, E. A.; MANSUR, M. B. Rotas de reaproveitamento da carepa siderúrgica. In: 70º Congresso Anual da ABM, 70., 2015, Rio de Janeiro. **ABM Proceedings**. Rio de Janeiro: Editora Blucher, 2015. v. 47, p. 922-928.

LOPES, M. V. **Caracterização de sinter de minério de ferro para uso em altos-fornos a carvão vegetal**. 2012. 80 f. Dissertação (Mestrado Profissional) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2012.

MESQUITA FILHO, M. M. de, *et al.* Caracterização do sinter produzido através do sinterizador de leito fixo com 15% de carvão vegetal. In: 6º simpósio brasileiro de aglomeração de minérios, 6., 2018, São Paulo. **ABM Proceedings**. São Paulo: Editora Blucher, 2018. v. 6, p. 222-229.

MAXWELL. **Fundamentos Termodinâmicos e Cinéticos dos Processos de Redução:** termodinâmica da redução dos óxidos de ferro. PUC Rio. Disponível em: https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/4775/4775_3.PDF. Acesso em: 14 set. 2021.

MINÉRIO DE FERRO. 2020. Companhia Siderúrgica Nacional - CSN. Disponível em: <https://www.csn.com.br/homepage/minerio-de-ferro/>. Acesso em: 28 abr. 2020.

MOCHÓN, J. *et al.* Iron ore sintering Part 2. Quality indices and productivity. **Dyna**, v. 81, n. 183, p.168-177, 2014.

MOURÃO, J. M. **Aspectos conceituais relativos à pelotização de minérios de ferro.** Vitória, 2017.

OHNO, K. *et al.* Effect of coke combustion rate equation on numerical simulation of temperature distribution in iron ore sintering process. **ISIJ international**, v. 53, n. 9, p.1642-1647, 2013.

PEREIRA, J. P.; SAMUEL, W. **Reatores de leito fixo e fluidizado.** Coronel Fabriciano, 2017.

PEREIRA, F. M; VERNEY, J. C. K; LENZ, D. M. Avaliação do emprego de carepa de aço como agregado miúdo em concreto. **Rem: Revista Escola de Minas**. v. 64, n. 4, p.463-469. Ouro Preto, 2011.

PIRES, L. C. **Caracterização física de coques visando previsão da degradação durante manuseio.** 2016. 72 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

PEREZ, B. C. **As rochas e os minerais industriais como elementos de desenvolvimento sustentável.** Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2001. (Série Rochas e Minerais Industriais, 03).

POLICARPO, F. F. **Minério de ferro: desafios para as indústrias mineral e siderúrgica.** Minas Gerais, 2012.

PROCESSO Siderúrgico. Cap. 01 - Processos de Aglomeração de Minérios: Sinterização e Pelotização. Disponível em: <https://cutt.ly/txIqdgw>. Acesso em: 20 out. 2019.

QUARESMA, D. S. *et al.* Estudo da sinterização em reator vertical de leito fixo para produção de agregado sintético. **Cerâmica**, v. 63, n. 366, p.169-177, 2017.

SIDERURGIA. Associação Brasileira do Carvão Mineral - ABCM. Disponível em: https://www.carvaomineral.com.br/interna_conteudo.php?i_subarea=15&i_area=2. Acesso em: 22 fev. 2021.

SILVA, G. L. R. da. **Otimização da mistura de carvões na produção de coque metalúrgico.** 2011. 157f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Engenharia de Materiais, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

SILVA, J. N. S. **Siderurgia.** Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará. Belém, 2011.

SIMÕES, L. F. P. *et al.* Início de operação e estabilização da sinterização da CSP. In: 5º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minérios, 5., 2017, São Paulo. **Anais dos Seminários de Redução, Minério de Ferro e Aglomeração**. São Paulo: Blucher, 2017. v. 47, p. 172-183.

STARLING, A. R. de A. R. **Avaliação de metodologias de simulação física do processo de sinterização**. 2012. 152 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

TELLES, V. B. **Estudo da influência da sinterização de minérios de ferro na redução por hidrogênio**. 2015. 112 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.