



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE ANANINDEUA
FACULDADE ENGENHARA DE MATERIAIS

RAFAELA FARINHA FELIPE

**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**

ANANINDEUA
2019

**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)**

- F313p Felipe, Rafaela Farinha
Produção e caracterização de sinter de minério de ferro
com a incorporação de 12% de carepa de laminação
utilizando moinha de carvão vegetal como combustível /
Rafaela Farinha Felipe. — 2019.
71 f. : il. color.
- Orientador(a): Prof. Me. Alacid do Socorro Siqueira Neves
Coorientador(a): Prof^ª. Brenda Thayssa Figueira Daniel
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de
Engenharia de Materiais, Campus Universitário de
Ananindeua, Universidade Federal do Pará, Ananindeua,
2019.
1. Sinterização. Resíduo. Carepa. Caracterização
físico-química. I. Título.

CDD 620.11

RAFAELA FARINHA FELIPE

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE SÍNER DE MINÉRIO DE FERRO COM A
INCORPORAÇÃO DE 12% DE CAREPA DE LAMINAÇÃO UTILIZANDO MOINHA
DE CARVÃO VEGETAL COMO COMBUSTÍVEL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Faculdade de Engenharia de Materiais da
Universidade Federal do Pará, em
cumprimento as exigências para a obtenção do
Grau de Bacharel em Engenharia de Materiais.
Orientador: Prof. Msc. Alacid do S. S. Neves.
Coorientador: Bel. Brenda Thayssa F. Daniel

ANANINDEUA
2019

RAFAELA FARINHA FELIPE


PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE SÍNER DE MINÉRIO DE FERRO COM A INCORPORAÇÃO DE 12% DE CAREPA DE LAMINAÇÃO UTILIZANDO MOINHA DE CARVÃO VEGETAL COMO COMBUSTÍVEL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Pará, em cumprimento as exigências para a obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia de Materiais.


Data da Avaliação: 17 / 12 / 2014.

Conceito: EXCELENTE.


BANCA EXAMINADORA:



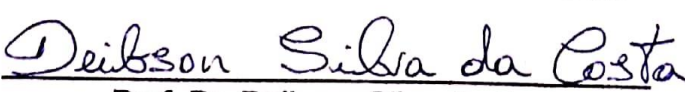
Prof. Msc. Alacid do Socorro Siqueira Neves
FEMAT - UFPA - Campus Ananindeua - Orientador



Bel. Brenda Thayssa Figueira Daniel
PPGEM - ITEC - UFPA - Coorientador



Prof. Dra. Raimunda/Figueiredo da Silva Maia
PRODERNA - UFPA - Membro Externo



Prof. Dr. Deibson Silva da Costa
FEMAT - UFPA - Campus Ananindeua - Membro Interno

ANANINDEUA
2019

Dedico este trabalho a minha mãe.

AGRADECIMENTOS

Sou grata à Deus por todas as escolhas, momentos e ensinamentos que tive nesses 5 anos. Sou grata por ter sempre a fé e a dedicação que aprendi a exercer a seu serviço. Agradeço ainda a minha mãe do céu, que jamais me tirou de seu amparo e sempre me cobriu com seu manto de proteção e esperança.

Aos meus pais, Florinda Farinha e Rubenil Felipe, meu agradecimento por todo investimento de tempo e incentivo para que eu chegasse a esse momento.

Agradeço à minha mãe, a ela todo meu amor. Te dedico este trabalho e te agradeço por toda dedicação, esforço e persistência para nos criar. Teus ensinamentos me trouxeram até aqui. Serei grata eternamente por teres permitido a realização de diversas etapas dessa jornada e por ser a principal incentivadora do meu crescimento.

Às minhas irmãs, Alessandra Felipe, Samara Felipe, Thaynná Felipe e Gabriela Felipe, que são exemplos para mim de determinação. Obrigada por terem de alguma forma contribuído com esse sonho. Agradeço em especial à minha gêmea, por toda insistência que dedica a mim.

Aos meus familiares, obrigada por serem meus incentivadores e por terem feito de mim quem sou hoje.

Aos meus professores todo meu respeito e gratidão por terem contribuído com minha formação.

Ao corpo docente da FEMat e faculdades parceiras, agradeço por todo conhecimento, incentivo e dedicação para nossa formação. Agradeço também por todas as oportunidades que me deram durante esses 5 anos. Desejo a vocês muito sucesso para que continuem exercendo brilhantemente o magistério.

Aos professores Carlos Brito e Vicente Ferrer, obrigada pela oportunidade de ter trabalhado com vocês e por ter alcançado resultados tão importantes nesse percurso.

Ao meu orientador, professor Alacid Neves, que abraçou meu trabalho e acreditou que eu seria capaz. Obrigada por todo tempo dedicado a mim, por todas as palavras de incentivo, conselhos e por ter aceitado me orientar, mesmo com todas as suas tarefas.

À minha coorientadora, Brenda Daniel, que é um ser humano ímpar. Muito obrigada por ter me abraçado em todo esse caminho e por ter me tirado de vários momentos de insegurança. Você merece o mundo e não tenho palavras para expressar minha gratidão a ti. Que sua luz seja emanada por onde você passar! Obrigada.

Agradeço aos meus colegas de curso, que de alguma maneira contribuíram na minha caminhada.

Agradeço pelas oportunidades que pude ter nos anos que representei o CAEMAT e por todo aprendizado que tive nos anos que dediquei a este CA.

Aos meus colegas e à Atlética Mercúrio, por toda descontração e companheirismo. Obrigada por terem me permitido participar e ajudar essa família.

À minha turma, Engenharia de Materiais 2015, que é o reflexo de excelência para mim. Vocês são os melhores. Obrigada por cada momento que compartilhamos durante esses anos.

Ao F.A.C.T.H, que alegrou e me arrancou os sorrisos mais inesperados. Agradeço em especial à Clara e ao Thiago, por terem sido companheiros de bons e maus momentos.

Ao meu K.R.A.C.K, vocês foram meu ponto de equilíbrio. Muito obrigada pelo companheirismo, aventuras, risadas e por compartilharem sempre o crescimento de vocês comigo.

Ao Carlos Eduardo, por todos os esclarecimentos e momentos que compartilhamos. Obrigada por ter entrado na minha vida e ter trazido tua alegria para perto de mim.

Kate Santos, obrigada por ter sido tão otimista e carinhosa comigo. Obrigada pela amizade e pelos sorrisos que a gente pôde compartilhar.

Avener Andrade, minha pessoa, não fomos os melhores alunos, mas com certeza fomos o melhor um para o outro. Obrigada por compartilhar comigo não só trabalhos, mas também ensinamentos e conselhos. Agradeço por sempre ter acreditado em mim.

Willian Rayol, minha gratidão por todo incentivo que você me deu. Obrigada por ter contribuído tanto para que eu pudesse me manter firme para concluir esse trabalho, por ter me escutado várias vezes falando sobre sinterização e por ter acalentado meu choro quando ninguém mais ouvia. Sua parceira e amizade são muito importantes para mim. Obrigada por tudo.

RESUMO

As pesquisas relacionadas a produção de materiais com utilização de resíduos têm sido cada vez mais frequentes. Além da destinação ambientalmente correta, a diminuição na exploração de matérias primas e a produção de novos materiais com alto valor agregado são atrativos para estes estudos. A indústria siderúrgica é uma grande geradora de resíduos, necessitando reutilizá-los, além do uso de grandes quantidades de massas de material como carga (minério de ferro, combustível e fundentes) no processo produtivo do aço. Assim, a produção de sinter de minério de ferro com a incorporação de 12 % de carepa de laminação é o objetivo deste trabalho, a qual viabiliza a produção de carga para o alto forno com a reutilização de finos e resíduos industriais. Para produção da carga foi utilizado um reator vertical de leito fixo. Os sínteres foram caracterizados por MEV/EDS, DRX, FRX, permeabilidade magnética e tamboreamento, além de ter sido feito o estudo do teor de umidade ótima. Os resultados obtidos foram satisfatórios frente a adição de carepa de laminação, o sinter produzido apresentou características adequadas para o uso no processo de redução do ferro.

Palavras-chave: Sinterização. Resíduo. Carepa. Caracterização físico-química.

ABSTRACT

Research related to the production of materials using waste has been increasingly frequent. In addition to the environmentally sound destination, the reduction in raw material exploration and the production of new materials with high added value are attractive for these studies. The steel industry is a large waste generator and needs to be reused, in addition to the use of large amounts of material as cargo (iron ore, fuel and fluxes) in the steel production process. Thus, the production of iron ore sinter with the incorporation of 12% rolling mill scale is the objective of this work, which enables the production of cargo for the blast furnace through the reuse of fines and industrial waste. For the production of the load a vertical fixed bed reactor was used. The sinter were characterized by MEV / EDS, DRX, FRX, magnetic permeability and drumming, and the study of the optimal moisture content. The results obtained were satisfactory with the addition of lamination scale, the sinter produced presented adequate characteristics for use in the iron reduction process.

Keywords: Sintering. Waste. Mill scale. Physicochemical characterization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma esquemático das rotas do processo de obtenção do aço. 2020	
Figura 2 - Fluxograma esquemático da cadeia de produção do aço.	211
Figura 3 - Uso de matérias primas produzidas internamente.	222
Figura 4 - Carepa de Laminação. a) Carepas na superfície do tarugo de aço e b) carepas eliminadas pelo processo.	233
Figura 5 - Disco de pelotamento.	266
Figura 6 - Esquema simplificado do processo de sinterização.	288
Figura 7 - Classificação das partículas de acordo com a capacidade de microaglomeração.....	299
Figura 8 - Evolução da frente de combustão dentro de um leito de sinterização.....	30
Figura 9 - Faixa granulométrica ideal para o <i>sinter feed</i>	344
Figura 10 - Matriz energética para a produção de aço em 2017.	355
Figura 11 - Fluxograma da metodologia do experimento.	377
Figura 12 - Reator vertical de leito fixo pronto para o experimento.....	388
Figura 13 - Anemômetro.	388
Figura 14 - Principais etapas do processo sinterização experimental.	399
Figura 15 - Posicionamento do maçarico.	399
Figura 16 - Equipamento de registro de temperatura <i>Paperless Recorder</i>	40
Figura 17 - Matérias primas utilizadas para o processo de sinterização. a) FMF, b)FCC, c) MCV e d) CL.....	411
Figura 18 - Equipamento de peneiramento (Ro-Tap) e as peneiras.	422
Figura 19 - Análise granulométrica do FMF.	422
Figura 20 - Análise granulométrica da CL.	433
Figura 21 - Análise granulométrica da MCV.....	433
Figura 22 - Análise granulométrica do FCC.	444
Figura 23 - Processo de Micropelotização.	455
Figura 24 - Abastecimento do leito com a mistura micropelotizada.....	466
Figura 25 - Chama de ignição.	466
Figura 26 - Fluxograma das etapas de preparação das amostras para a caracterização.....	477
Figura 27 - Teor de umidade ótima.	488
Figura 28 - Material micropelotizado.	499

Figura 29 - Evolução da temperatura na produção do Sínter 1.	50
Figura 30 - Evolução da temperatura na produção do Sínter 2.	50
Figura 31 - Resultado do Teste de tamboreamento Sínter 1 e do Sínter 2.	511
Figura 32 - Micrografias de uma amostra do Sínter 1.....	533
Figura 33 - Micrografias de uma amostra do sínter 2.	544
Figura 34 - MEV/EDS do Sínter 1.	555
Figura 35 - MEV/EDS do Sínter 2.	555
Figura 36 - DRX do FMF.....	588
Figura 37 - DRX do FCC.....	599
Figura 38 - DRX da MCV.	599
Figura 39 - DRX da CL.....	60
Figura 40 - DRX do Sínter 1.....	60
Figura 41 - DRX do Sínter 2	611
Figura 42 - Sínteres produzidos. Sínter 1 (esquerda) e Sínter 2 (direita).....	622

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Massas das matérias primas.....	444
Tabela 2 - Determinação do teor de umidade ótima.....	488
Tabela 3 - FRX das matérias primas.....	566
Tabela 4 - FRX dos sínteres.	577
Tabela 5 - Basicidade e teor de FeO.....	577

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Al₂O₃ – Óxido de Alumínio

CaO – Óxido de Cálcio

CO – Monóxido de Carbono

CO₂ – Dióxido de Carbono

DRX – Difração de Raios X

EDS – Espectrometria de Energia Dispersiva de Raios-X

FCC – Fino de Calcário Calcítico

FMF – Fino de Minério de Ferro

FRX – Espectrometria de fluorescência de raios X

MCV – Moinha de Carvão Vegetal

MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura

Mg₆Si₄O₁₀(OH)₈ – Crisotila

MgO – Óxido de Magnésio

NO_x – Óxido de Nitrogênio

RDI – Reduction Degradation Index – Índice de degradação sob redução

RI – Índice de redutibilidade

SiO – Óxido de Silício

SiO₂ – Dióxido de Silício

SO_x – Óxido de enxofre

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	166
1.1	Objetivos	177
1.1.1	Objetivo Geral	177
1.1.2	Objetivos Específicos	177
1.2	Justificativa	177
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	188
2.1	Indústria Siderúrgica	188
2.1.1	Histórico	188
2.1.2	A indústria siderúrgica no estado do Pará	188
2.1.3	Processo siderúrgico	199
2.1.4	Resíduos industriais	222
2.1.5	Resíduo – Carepa de Laminação (CL)	233
2.2	Processos de aglomeração	244
2.2.1	Briquetagem	255
2.2.2	Pelotização	255
2.2.3	Sinterização	266
2.3	Reações de sinterização	30
2.4	Resistência mecânica do sínter	322
2.5	Redutibilidade	322
2.6	Materiais primas para produção do sínter	333
2.6.1	Minério	333
2.6.2	Combustível	344
2.6.3	Fundente	366
3	MATERIAIS E MÉTODOS	377
3.1	Montagem do equipamento	377
3.2	Matérias primas	40
3.3	Análise granulométrica das matérias primas	411
3.4	Teor de umidade ótima para a micropelotização	444
3.5	Abastecimento do reator vertical de leito fixo	455
3.6	Caracterização do sínter	477
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	488
4.1	Teor de umidade ótima	488

4.2	Temperatura	499
4.3	Caracterização do sínter	511
4.3.1	Tamboreamento	511
4.3.2	Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	522
4.3.3	Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS)	555
4.3.4	Fluorescência de Raios-X (FRX).....	566
4.3.5	Difratometria de Raios-X (DRX)	588
4.3.6	Análise visual do Sínteres produzidos.....	611
5	CONCLUSÕES	633
6	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	644
	REFERÊNCIAS	655

1 INTRODUÇÃO

Atualmente diversos esforços são realizados pelas indústrias para criação de processos sustentáveis e de baixo valor econômico para produção de bens. A tentativa de redução do consumo de matérias primas, diminuição na produção de resíduos aliadas a alta produtividade são focos de diversos estudos.

Face a tal cenário pesquisas relacionadas a reutilização de resíduos gerados dentro das plantas industriais ganha força no cenário mundial. As estratégias são pautadas em tecnologias mais eficazes, com utilização de resíduos sólidos e baixo impacto ao meio ambiente. Dessa maneira, os altos custos de destinação adequada são drasticamente diminuídos e o consumo de matérias primas decresce na mesma proporção. (CARDOSO, 2016)

A indústria siderúrgica é uma das principais geradoras de resíduos. Muitos deles são reutilizados dentro da própria planta de produção, como os finos de retorno, ou dentro de processos produtivos de outras indústrias, como a cimentícia. Entretanto, a produção de coprodutos siderúrgicos ainda é elevada, tal fato é atrelado ao grande consumo de aço no mundo.

Os processos de aglomeração surgiram como uma alternativa tecnológica para o reaproveitamento de fontes minerais e diminuição na exploração de minas de ferro. A principal aglomeração usada no Brasil é a sinterização, a qual utiliza tanto os finos de minério de ferro, quanto os de combustíveis. Além disso, o processo de sinterização permite adições que muitas vezes podem ser de resíduos gerados na produção do aço.

Alguns coprodutos siderúrgicos apresentam elevado teor de ferro, como as lamas, pós e carepas, e isto possibilita a utilização deles no processo de sinterização (CARDOSO, 2016). As carepas são fontes ricas em ferro e comumente estudadas para aplicação em produtos cerâmicos (FURMANSKI, 2016).

O baixo teor de impurezas é motivo para que a carepa de laminação seja estudada para aplicação no processo de sinterização. O estudo deste tipo de aplicação pode proporcionar a obtenção de um produto com alto valor agregado, além de explorar o potencial do resíduo.

Dessa maneira, escolheu-se a carepa de laminação para o estudo da utilização deste resíduo no processo de sinterização, com a finalidade de sugerir uma

destinação ambientalmente correta, com atração comercial e reduzir o uso de minério de ferro no processo siderúrgico.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Realizar a produção de sinter a partir da utilização de Finos de Minério de Ferro, Finos de Calcário Calcítico e Moinha de Carvão Vegetal, além da incorporação de Carepa de Laminação.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar as matérias primas;
- Determinar a umidade ótima para micropelotização;
- Produzir o sinter;
- Avaliar o teor de FeO formado a partir da adição da carepa de laminação;
- Caracterizar o sinter produzido.

1.2 Justificativa

A destinação ambientalmente adequada aliada à menor exploração de fontes minerais de ferro é o propósito deste trabalho, em face de tendência em criar processos mais limpos e com alto valor agregado. Assim, a busca pela realização de um processo produtivo com a reutilização de resíduos motivou a execução deste, aliado a forte justificativa ambiental.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Indústria Siderúrgica

2.1.1 Histórico

A Idade do Ferro é sucessora da Idade do Bronze e tem seu início datado por volta de 1200 a.C., onde o ferro foi difundido por todo o mediterrâneo. Esse marco histórico é atrelado a expansão territorial de diversos povos, pois a alteração do material propiciou a fabricação de armas e utensílios de melhor desempenho. O refino do minério de ferro iniciou em fornos de lupa, com aquecimento muito abaixo da temperatura de fusão e os processos até então conhecidos não diferenciavam de forma efetiva os utensílios de ferro dos de bronze e cobre. (MOTA, 2009)

A resistência dos produtos oriundos do ferro foi modificada ao longo dos anos, quando novas técnicas foram descobertas para modificação do material. Técnicas de aquecimento e a adição de calcário à mistura são exemplos deste desenvolvimento (IBS, 2008).

No Brasil, as primeiras explorações de ferro remetem ao século XVI. A intensificação das atividades siderúrgicas ocorreu em meados do século XIX e no ano de 1941 a Companhia Siderúrgica Nacional foi implantada no país, a qual introduziu o coque ao processo nacional. Além disso, esta ascensão da indústria siderúrgica brasileira foi possibilitada pela crescente produção automobilística dos anos 60 (MOTA, 2009).

Atualmente a indústria de transformação do ferro é de grande importância no cenário mundial, a qual atende setores diversos da economia. Ademais, vários padrões de transporte, construção civil, eletrônicos etc., são dependentes deste material (MOTA, 2009).

2.1.2 A indústria siderúrgica no estado do Pará

A introdução do desenvolvimento minero-metalúrgico na Amazônia está ligada às estratégias de industrialização presentes nos planos de desenvolvimento regional

de governos militares. A implantação dos grandes projetos na região amazônica foi marcada pelo incentivo do governo, com programas governamentais para instalação de empresas nacionais e multinacionais com intuito de explorar diversos recursos naturais, minerais e florestais. (SANTOS, 2015)

O Programa Grande Carajás (PGC) possibilitou a instalação de grandes siderúrgicas em Marabá por meio do ato executivo nº 1.183 de 24 de novembro de 1980, o qual era usado como objeto para a industrialização da Amazônia por meio da mineração e do processamento de minérios, em particular. O PGC fomentou ainda a produção do ferro gusa com objetivo de exportação, o que levou a instalação de diversas indústrias ao longo da ferrovia de Carajás. (SANTOS, 2017)

Sob responsabilidade da Companhia Vale do Rio Doce, criada em 1942 por Getúlio Vargas, iniciou-se o Projeto Ferro Carajás com incentivo financeiro do PGC. O Projeto Ferro Carajás passou a operar em 1985 e auxiliou a cadeia produtiva do minério com a implantação de empreendimentos que agregassem valor à cadeia. O projeto atingiu a produção de 35 milhões de ton/ano de minério de ferro em 1994. Hoje a produção de Ferro no Pará ultrapassa 193,6 Mton/ano. (SANTOS, 2015; SANTOS, 2017; ANM, 2018)

De acordo com dados da ANM (2018), a produção mineral paraense é liderada pelo minério de ferro. Este fato é atrelado a expansão das minas da VALE. Além disso, o minério de ferro compreende 75,9% da exportação mineral do estado do Pará. Atualmente a indústria de transformação do ferro é uma das principais provedoras de postos de trabalho no estado.

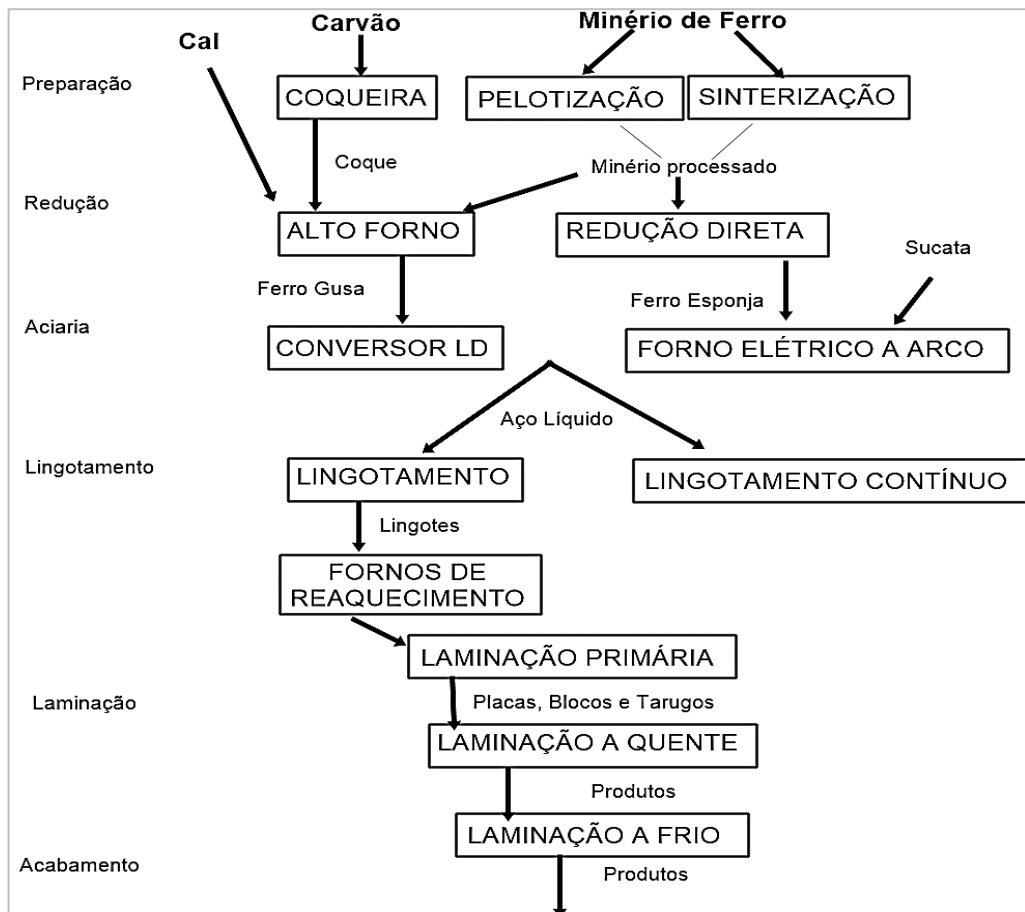
2.1.3 Processo siderúrgico

A siderurgia é considerada o conjunto de processos que envolve desde a extração da matéria prima até a produção do ferro gusa, que é a matéria prima para fabricação do aço. O ferro gusa é o produto básico da redução do minério, o qual ocorre por meio da ação de agentes redutores (carvão vegetal ou mineral) em um processo de oxidação (GENTILE, 2002). O carvão, que atua como combustível, permite o alcance de altas temperaturas necessárias a fusão do minério, o qual se apresenta em forma de óxido de ferro (MOTA, 2009).

A obtenção do ferro gusa é a primeira etapa do processo clássico da indústria siderúrgica. O gusa é uma liga de ferro-carbono que possui alto teor de carbono após a redução do minério de ferro em alto forno, além de possuir uma pureza em torno de 90%. Para compor a etapa de redução no alto forno utiliza-se basicamente minério de ferro, combustível e fundente. Esta etapa acarreta a geração de diversos resíduos, como escória, poeira e gases (FURMANSKI, 2016).

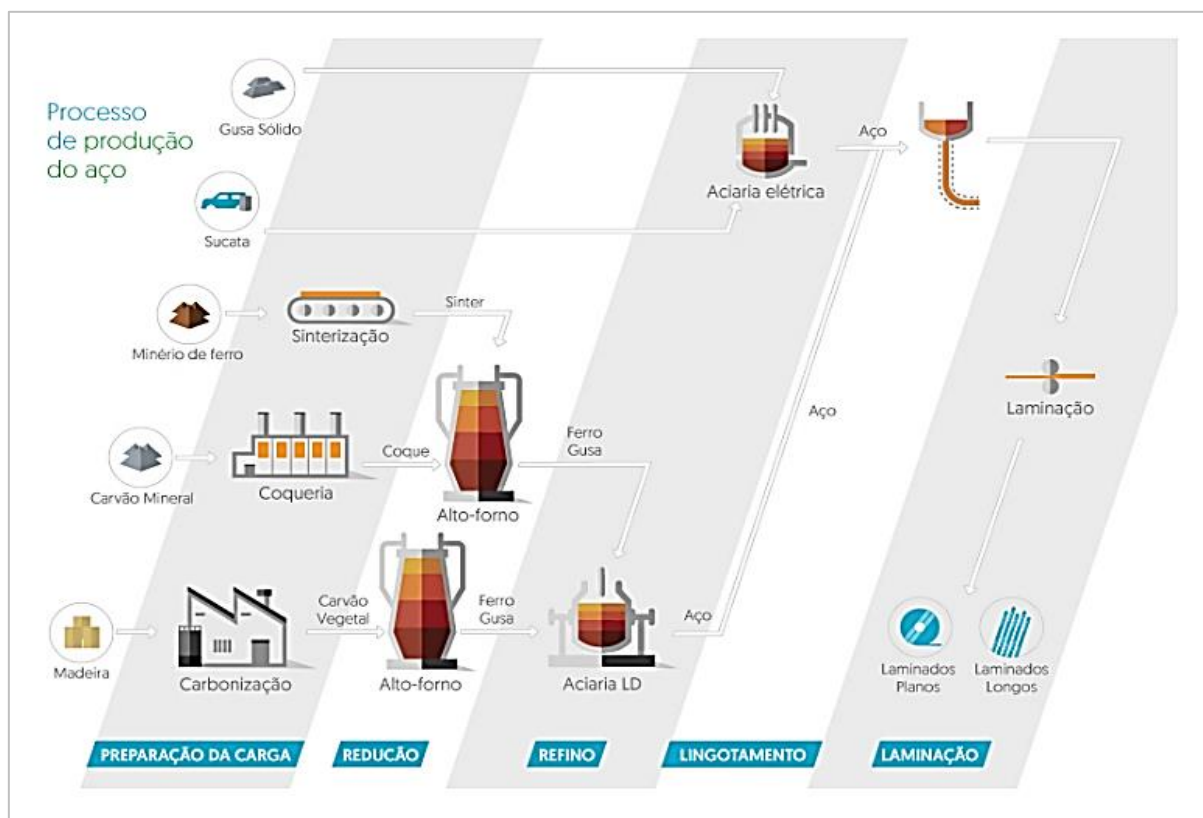
De modo geral a indústria siderúrgica possui duas rotas tecnológicas de obtenção para o aço, as usinas integradas e semi-integradas, a principal diferença entre as duas é que a rota semi-integrada não possui a etapa de redução (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2018). As Figuras 1 e 2 apresentam o esquema clássico das rotas de obtenção e do processo de produção do aço, respectivamente.

Figura 1 - Fluxograma esquemático das rotas do processo de obtenção do aço.



Fonte: Adaptado de MOTA, 2009

Figura 2 - Fluxograma esquemático da cadeia de produção do aço.



Fonte: Instituto Aço Brasil, 2018.

As siderúrgicas são uma das maiores produtoras de resíduos entre as indústrias de transformação. Dados do Instituto Aço Brasil mostram que em 2017 para cada tonelada de aço produzida 607 Kg de coprodutos foram geradas. Grande parte desses produtos são reaproveitados pela própria indústria siderúrgica ou pelas indústrias de cimento.

Os coprodutos e resíduos gerados pela indústria siderúrgica possuem grande potencial de reaproveitamento dentro das próprias plantas de produção. Além disso, os processos de aglomeração são de fundamental importância para o reaproveitamento de matérias primas e resíduos.

A Figura 3 mostra dados do Instituto Aço Brasil quanto ao consumo de materiais primas produzidas dentro da planta de produção das indústrias entre os anos de 2014 e 2017.

Figura 3 - Uso de matérias primas produzidas internamente.

CONSUMO DE MATÉRIAS-PRIMAS PRODUZIDAS INTERNAMENTE* [10 ³ t]	2014	2015	2016	2017
Coque	8.579	8.475	8.582	8.887
Sinter	32.312	31.128	28.395	31.495
Ferro-gusa	25.822	26.995	25.145	27.486
Sucata de ferro e aço	2.969	3.446	2.779	3.166
Cal calcítica / dolomítica	821	721	642	657
TOTAL	70.589	70.964	65.710	71.691

Fonte: Instituto Aço Brasil, 2018.

2.1.4 Resíduos industriais

A Política Nacional de Resíduos Sólidos, baseada na Lei 12.305/2010, define que resíduos sólidos só são considerados rejeitos após todas as possibilidades de tratamento e recuperação, por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, forem esgotadas. Esta política inclui indústrias geradoras de resíduos, como as do setor siderúrgico, priorizando o tratamento do resíduo em detrimento da destinação final ambientalmente adequada.

A indústria siderúrgica é uma das principais geradoras de resíduos sólidos industriais, esses resíduos precisam de um descarte ambientalmente correto, conforme exige a legislação ambiental vigente (FURMANSKI, 2016).

Assim, as empresas geradoras de resíduos buscam alternativas para disposição final adequada, com menor custo possível (AISSE, 2006). Entretanto, os coprodutos gerados comumente podem ser reaproveitados como matéria prima no mesmo ou em outros processos industriais (CASAGRANDE et al., 2008). Os métodos

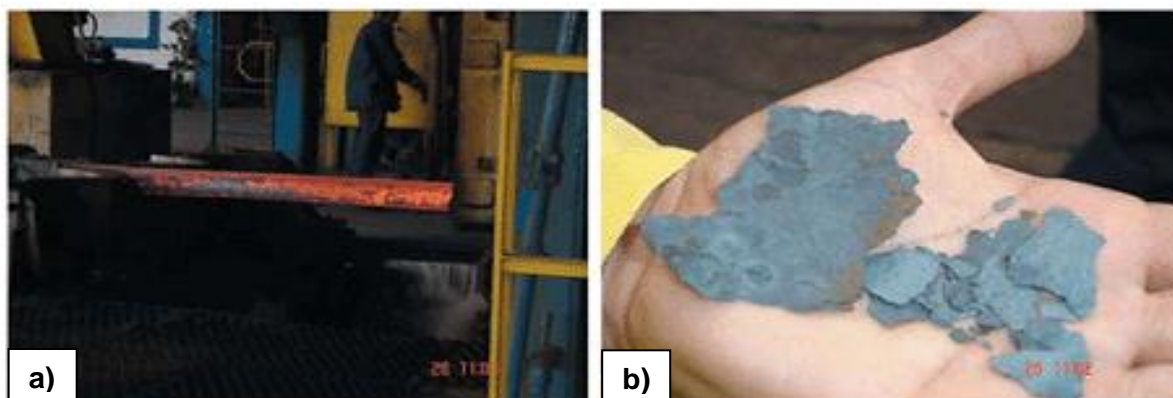
de caracterização são importantes no auxílio da classificação dos resíduos, estes métodos permitem a melhor destinação do material (MOLIN, 2010).

A classificação segundo a periculosidade dos resíduos é definida pela ABNT NBR 10004/2004. Esta norma classifica os resíduos em classe I (perigoso), classe II A (não perigoso e não inerte) e classe II B (não perigoso e inerte).

2.1.5 Resíduo – Carepa de Laminação (CL)

Como já mencionado, a indústria do aço é uma grande produtora de resíduos, que podem ser classificados em lamas de alto forno e aciaria, escórias, pós, carepas e finos de carvão e minério. Este trabalho tem como resíduo para adição, a carepa de laminação (CL). A Figura 4 apresenta como a carepa fica presente no aço recém-laminado.

Figura 4 - Carepa de Laminação. a) Carepas na superfície do tarugo de aço e b) carepas eliminadas pelo processo.



Fonte: CUNHA, 2006.

A carepa é um coproduto oriundo da oxidação da superfície do aço, quando submetido ao gradiente térmico, ao meio corrosivo ou a simples ação do tempo. Este resíduo é resultado do lingotamento contínuo e laminação dos produtos de aço. (FURMANSKI, 2016)

De acordo com a NBR 10004/2004, a carepa é considerada um resíduo perigoso, classe I, com geração elevada e diferentes composições. O resíduo é constituído basicamente por óxidos de ferro, gerados durante o processo de

aquecimento das placas, no qual a camada superior do aço é oxidada por conta do gradiente térmico de alguma reação com o meio externo. (FURMANSKI, 2016)

As carepas podem ser do tipo primária, removida antes do processo de laminação e resultado da oxidação superficial do aço, secundária, gerada durante a deformação nos cilindros laminadores, e terciária, formada na fase de acabamento ou resfriamento e retirada por meio de decapagem. (LOBATO, 2015)

A qualidade do aço é afetada pela presença da carepa, por isso é importante que a mesma seja retirada para que não ocorram inclusões, as quais afetam processos de conformação plástica e mecânica (PEREIRA et al., 2011). Pelo elevado teor de ferro a carepa é considerada uma matéria prima secundária de alto valor, além de apresentar baixo percentual de impurezas e composição química estável para aplicação na indústria siderúrgica. (ANMED et al., 2009)

A carepa tem diversas aplicações tecnológicas comprovadas, como na indústria siderúrgica, cerâmica e na produção de pigmentos. Shatokha et al., (2011) mostra que é possível utilizar a carepa de laminação no processo de sinterização. Martins (2006) sugere que a carepa pode ser usada como matéria prima para substituição total ou parcial do minério. Já Bagatini (2011) viabilizou o uso da carepa em briquetes autorredutores. Estes estudos mostram que a carepa tem a capacidade de favorecer a combustão e diminuir o tempo dos processos na qual foi inserida.

2.2 Processos de aglomeração

Os processos de aglomeração consistem basicamente em produzir cargas que possam ser usadas no alto forno com características adequadas ao uso. As operações reúnem minério de ferro, fundentes e combustíveis em uma massa aglomerada com resistência mecânica, formato definido e com garantia de percolação dos gases do alto forno, para que o processo de redução ocorra com eficiência.

Estes processos podem ser divididos em briquetagem, pelletização e sinterização, este último é o foco deste trabalho.

2.2.1 Briquetagem

A briquetagem consiste em aglomerar finos por meio de pressão, o produto originado deste processo é chamado de briquete. A aglomeração por briquetagem é muito usada para reciclagem de resíduos siderúrgicos, os quais são reaproveitados na própria planta de produção do aço. (LEMOS, 2015)

Por conta da moldagem, maior dimensão e parâmetros mecânicos bem definidos os briquetes podem ser empilhados, o que acarreta a maior facilidade para transporte e armazenamento. A resistência dos produtos da briquetagem é influenciada por parâmetros como a pressão, teor de ligantes, tempo de cura, temperatura e umidade. (DANIEL, 2018)

A escolha do melhor método de briquetagem é influenciada pelo consumo de energia, produtividade e custos do processo. Entretanto, por conta dos métodos de compactação, os briquetes possuem baixa produtividade, o que inviabiliza a utilização da briquetagem para alimentação de alto forno. (DANIEL, 2018).

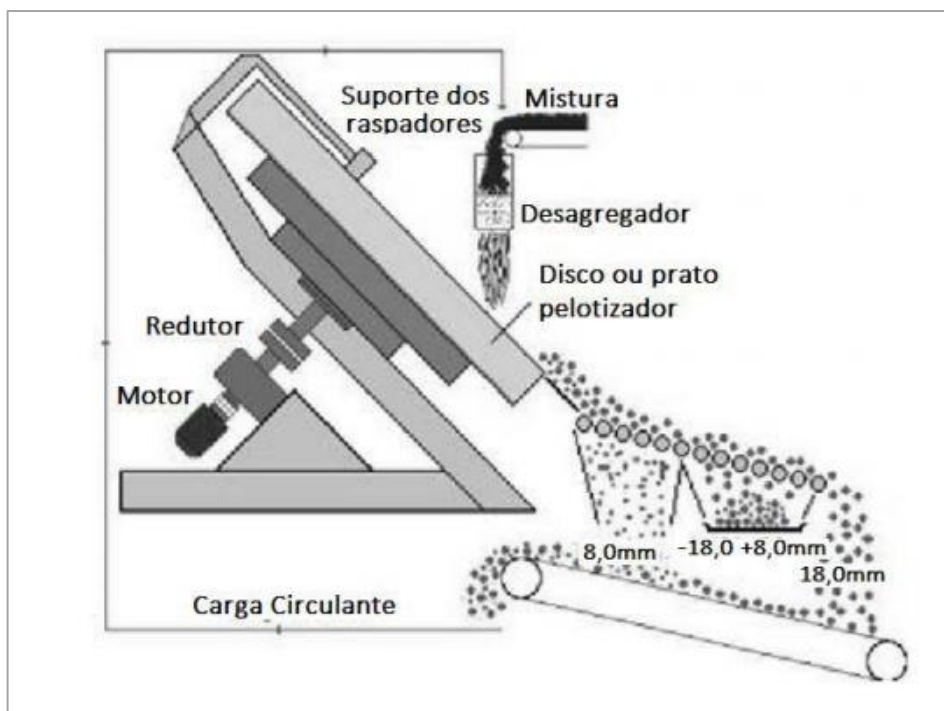
2.2.2 Pelotização

Outro processo de aglomeração de grande importância na siderurgia é o processo de pelotização. Os finos de minério de ferro aglomerados por meio da pelotização são conhecidos como pellet feed (pelota). As pelotas são formadas por meio de uma mistura úmida e apresenta-se em formato esférico. (SILVA, 2010)

A aglomeração por pelotização é mais onerosa do que a sinterização. A fração de finos é concentrada na faixa menor que 0,149 mm e quantidades predefinidas de aglomerante, óxidos básicos e energéticos são adicionados a mistura úmida, que é colocada em um sistema de rolamento de discos ou tambor. O aglomerado esférico se forma por meio de tensão superficial e apresenta um tamanho em 8 e 18 mm. (DUARTE, 2016)

O processo é mostrado na Figura 5, o qual utiliza um disco de pelotamento. As pelotas formadas passam por tratamentos térmicos, o que confere as esferas maior resistência mecânica e superiores propriedades metalúrgicas quando submetidas a redução. (DANIEL, 2018)

Figura 5 - Disco de pelotamento.



Fonte: FONSECA, 2003.

Por fim, a pelotização pode atuar como provedora da sinterização, por conta da formação de micropelotas sem tratamento térmico, as quais podem substituir o *sinter feed* e melhorar a permeabilidade do leito (TAKEHARA, 2004).

2.2.3 Sinterização

O processo de sinterização é uma etapa pirometalúrgica que tem como objetivo o aproveitamento de frações de minério de ferro e combustíveis, com granulometria inferior as adequadas ao uso em alto forno, a partir da aglomeração deles (LOPES, 2012).

Durante décadas a utilização do processo bateladas, também conhecido como Greenwalt, foi utilizado como o principal processo de sinterização. Industrialmente, utiliza-se o processo Dwight Lloyd, no qual a carga é sinterizada por meio de uma esteira, o que torna o processo mais produtivo. (TELLES, 2015)

Há ainda o uso do reator vertical de leito fixo, o qual é muito utilizado em indústrias de base, petroquímicas e de refino de petróleo (DANIEL, 2018). Neste tipo de reator o uso de material a ser sinterizado é reduzido, além do processo de combustão ser em escoamento unidirecional (MARTISN et al., 2010).

A propagação da combustão pode ocorrer em contra corrente ou em co-corrente, sendo a ignição e o suprimento de ar posicionado em lados opostos no primeiro tipo (RYU et al., 2006). O reator de leito fixo, com propagação contra corrente, foi adotado para execução deste trabalho.

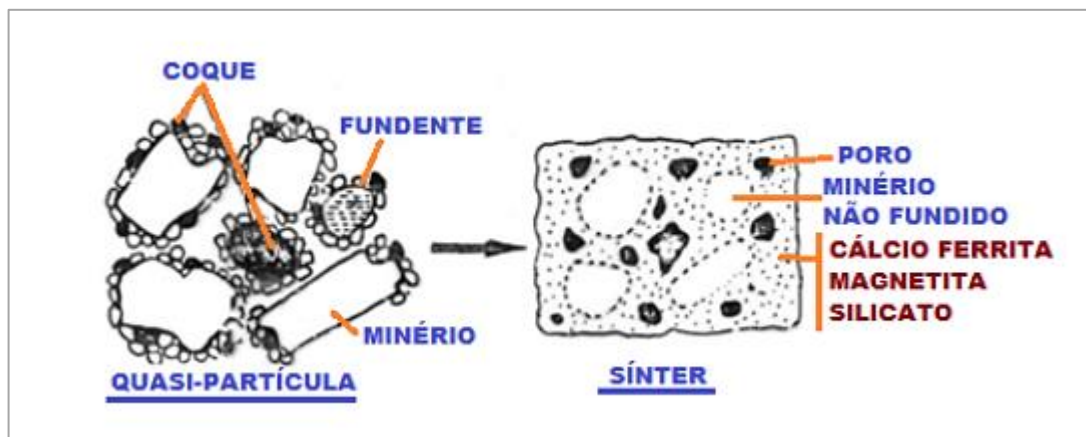
O escopo do sínter é a utilização destas frações como carga, de maneira que a permeabilidade do leito seja garantida, além de permitir a melhor percolação entre sólido e gás, aumentar a velocidade de reação e diminuir o consumo de combustível. (LOPES,2012)

A aglomeração é feita com finos de minério de ferro, de coque ou carvão vegetal, de fundentes, de sínter de retorno e água, além de outros resíduos portadores de ferro (LOPES, 2012). O aglomerado formado é submetido a temperaturas na faixa de 1300 °C e chega a um estágio de fusão parcial (PADULA, 2009).

Na sinterização é necessária a adição de água à mistura para que seja possível gerar tensão superficial para manter os grãos coesos, o que propicia a formação e crescimento de micropelotas, um dos parâmetros para a garantia da permeabilidade no leito de sinterização. Entretanto, aglomerantes são adicionados, pois a água não é suficiente para manter o aglomerado face a densidade das partículas e a evaporação durante o processo. (CASSOLA; MORAES, 2007)

O mecanismo de sinterização consiste em um processo difusional em estado sólido, o qual atua na diminuição da energia superficial das partículas frente às altas temperaturas empregadas no processo. A matéria prima aglomerada, denominada sínter, deve atender parâmetros para o uso, conforme a Figura 6.

Figura 6 - Esquema simplificado do processo de sinterização.



Fonte: USP, 2001.

Para Honorato (2005), o sinter deve apresentar as seguintes características indicadas:

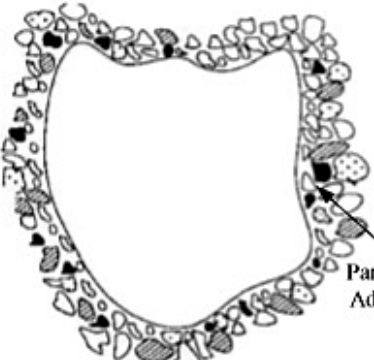
- Composição química estável;
- Sem elementos químicos indesejáveis;
- Alto teor de ferro;
- Baixo volume de escória;
- Elevada resistência mecânica;
- Baixa porcentagem de finos;
- Granulometria adequada;
- Baixo consumo de combustível;
- Alta redutibilidade.

Além disso, o produto aglomerado deve apresentar capacidade de aglomeração a frio, porosidade, densidade e crepitação (MACHADO, 2006). Existem, ainda, dois tipos de sinter, não auto fundente e auto fundente. O não auto fundente tem origem em ferros hematíticos ou magnéticos, sem acréscimos de base (CaO ou MgO). Já o auto fundente é acrescido de algumas bases para correção química (DUARTE, 2016).

A classificação das partículas das matérias primas que serão aglomeradas também deve receber certa atenção (LOPES, 2012). O pré-tratamento da mistura a aglomerar influencia diretamente na formação de micropelotas, o qual é um processo importante para a garantia da permeabilidade. A Figura 7 apresenta a classificação

dos tamanhos de partícula, que podem ser super grossas, nucleantes, intermediárias, aderentes e superfinas. (ISHIKAWA, 1982)

Figura 7 - Classificação das partículas de acordo com a capacidade de microaglomeração.

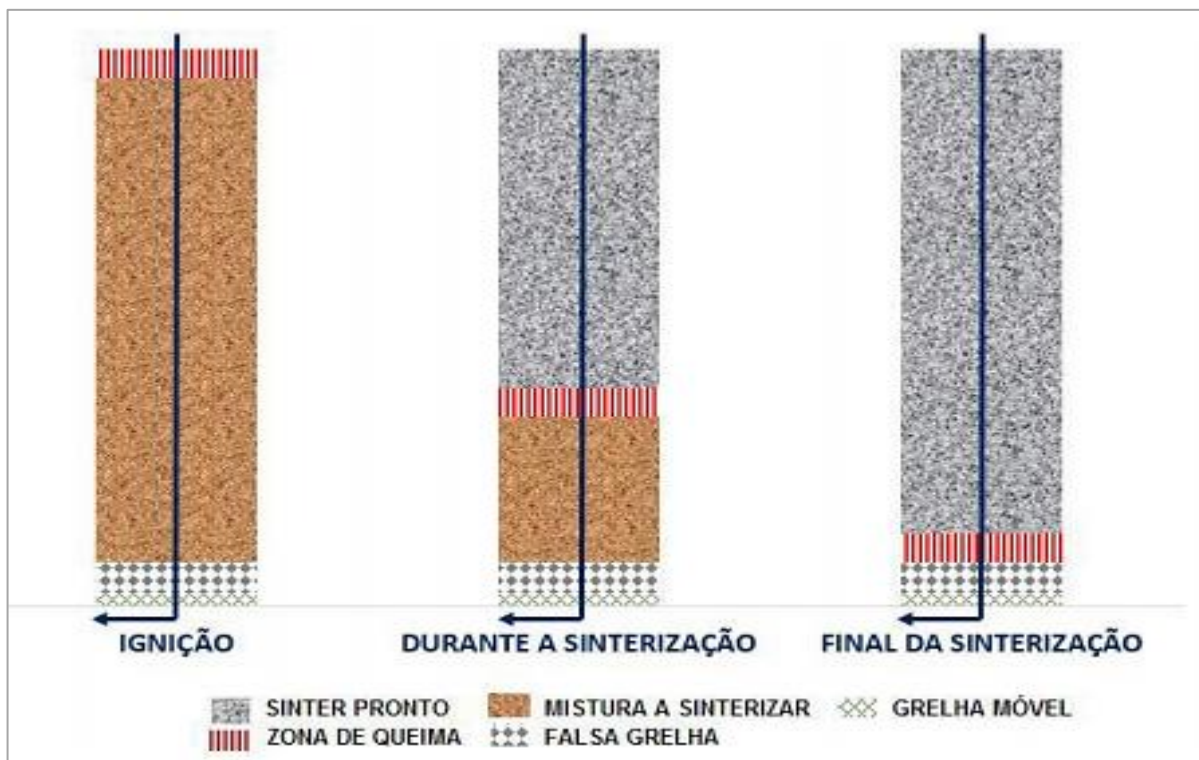
		Partículas do <i>sinter feed</i>	Estrutura ideal do microaglomerado (a frio)
6,3 mm		<p>Supergrossas</p> <p>Não apresentam a capacidade de aderir as partículas mais finas ao seu redor e não contribuem para o fenômeno de microaglomeração a frio. Devem ser minimizadas na composição da mistura a sinterizar.</p>	 <p>Partículas Aderente</p>
		<p>Nucleantes 2</p> <p>Nucleantes</p> <p>Apresentam a capacidade de aderir as partículas mais finas ao seu redor e constituem-se nos núcleos dos aglomerados.</p> <p>São partículas policristalinas anidras ou hidratadas e não devem participar efetivamente no fenômeno de formação de líquido durante a queima.</p> <p>Deve-se controlar a quantidade de partículas nucleantes goethíticas (altos valores de PPC e de P) de modo a evitar a alta contração e formação de grandes trincas no bolo de sinterização e aumento do teor de fósforo no sínter e no gusa.</p>	
3,0 mm		<p>Nucleantes 1</p> <p>São os nucleantes ideais, pois são mais efetivos com relação a capacidade de formar a camada aderente.</p> <p>Podem apresentar diferentes tipos de tramas, constituintes mineralógicos, tamanhos de cristais, graus de porosidade e tipos de superfícies. Essas características influenciam os parâmetros de redutibilidade, degradação durante redução e de amolecimento e fusão do sínter.</p> <p>Não devem conter sílica oclusa na sua estrutura ou mesmo na forma liberada.</p>	<p>Tramas das Partículas Nucleantes</p> <p>Granoblástica: Cristais xenomorfos de hematita complexamente intercrescidos (Ex. Minas de Mutuca, C. Feijão, Carajás, etc.)</p> <p>Lepidoblástica: Cristais orientados de hematita ao longo do plano basal (Ex. Minas de Andrade, Cauê, Morro Agudo, etc.)</p> <p>Mosaico: Cristais de bordas retas sem orientação preferencial. (Ex. Minas de Casa de Pedra, Cauê, Andrade, etc.)</p> <p>Microgranular: Hematita microcristalina disposta em uma trama granoblástica (Ex. Minas de Carajás e Corumbá).</p> <p>Treliça: Cristais alongados sem orientação preferencial (Ex. Minas de Carajás).</p>
1,0 mm ou 0,7 mm		<p>Intermediárias</p> <p>Essas partículas não se comportam nem como nucleantes e nem como aderentes. Devem ser minimizadas na composição da mistura a sinterizar.</p>	<p>Tipologia das Partículas Aderentes e Nucleantes:</p> <p>Especularísticas (Ex. Minas de Cauê, Andrade, etc.).</p> <p>Martíticas (Ex. Minas da Mutuca, C. Feijão, etc.).</p> <p>Granulares (Ex. Mina do Pico, etc.).</p> <p>Microgranulares (Ex. Mina de Carajás).</p> <p>Magnéticas (Ex. Mina de C. Feijão, etc.).</p> <p>Goethíticas (Ex. Minas de Alegria, Capanema, etc.).</p>
0,3 mm ou 0,2 mm		<p>Aderentes</p> <p>São partículas que formam a camada aderente ao redor do núcleo no microaglomerado. Podem apresentar diferentes características mineralógicas de modo a influenciar fortemente os fenômenos de aglomeração a frio e de formação da fase líquida durante a queima e na qualidade intrínseca do sínter formado.</p>	
0,105 mm		<p>Superfinas</p> <p>São partículas de <i>pellet feed</i>. Sua participação no <i>sinter feed</i> deve ser minimizada. Contribuem fortemente para diminuir permeabilidade do leito a sinterizar. A alumina nessa fração aumenta O RDI (<i>Reduction Degradation Index</i>) do sínter.</p>	

Fonte: ISHIKAWA, 1982.

As partículas super grossas, intermediarias e superfinas devem ser evitadas na composição da mistura, haja vista que as intermediarias não possuem capacidade de atuar como nucleantes ou aderentes, as superfinas interferem na permeabilidade do leito de sinterização e as super grossas não contribuem para a microaglomeração. (LOPES, 2012)

A frente de combustão do processo de sinterização evolui de cima para baixo, mesmo sentido da sucção de ar. O processo percorre toda a carga a ser sinterizada até atingir a base do leito, onde o processo é completado para que ocorra a saída do bolo de sínter. A Figura 8 descreve este processo.

Figura 8 - Evolução da frente de combustão dentro de um leito de sinterização.



Fonte: MACHADO, 2006.

2.3 Reações de sinterização

Para que o sínter seja formado diversas reações ocorrem durante o processo, dentre elas:

- Reações em estado sólido (sólido-sólido e sólido-gás);

- Fusão dos produtos das reações anteriores para formação do líquido primário;
- Dissolução de sólidos na porção fundida para formação de líquido secundário;
- Recristalização das fases minerais a partir dos líquidos formados.

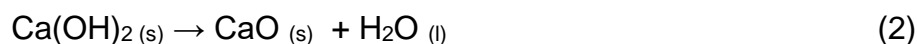
O processo é encerrado quando a temperatura cai para valores inferiores a 1100 °C, entretanto a pode ocorrer ainda alguma oxidação de wustita ou magnetita (DAWSON, 1993).

As equações de 1 a 14 representam as reações que ocorrem no processo de sinterização.

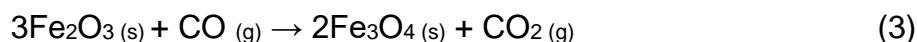
a) Etapa de secagem: até 300°C - vaporização da água livre



b) Desidratação dos hidróxidos de cálcio: 400 a 500°C - vaporização da água combinada



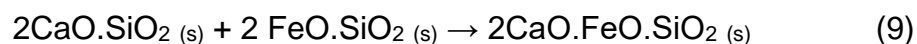
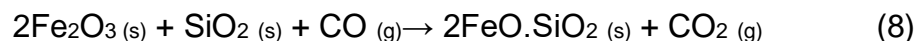
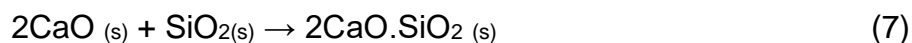
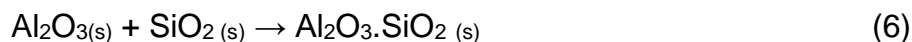
c) Redução superficial do minério de ferro



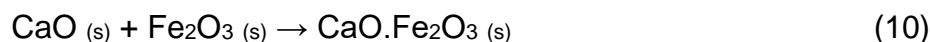
d) Decomposição de carbonatos: 600 a 1150°C



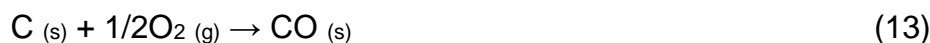
e) Formação de silicatos: 600 a 1300°C



f) Formação de Cálcio-ferritas: 1100°C



g) Combustão do Coque: 1300°C



h) Formação da magnetita:



2.4 Resistência mecânica do sinter

Diversos são os parâmetros que influenciam na resistência mecânica do sinter. Esta resistência está ligada principalmente as fases individuais dos minerais, composição química, índice de vazios, superfície específica e a formação de fase líquida. A propriedade diminui segundo a ordem:

- Hematita primária;
- Hematita secundária;
- Magnetita;
- Ferro silicatos de cálcio e alumínio;
- Fase vítrea.

Além disso, a basicidade pode influenciar na resistência do sinter. (TELLES, 2015)

Dentre os testes para determinar a resistência a abrasão do sinter, destaca-se o teste de tamboreamento (*Tumbler Test*) conforme a norma ABNT NBR ISO 3271/2018, o qual simula o contato do sinter com as paredes do alto forno e a carga e verifica a geração de finos a partir desta abrasão. (TELLES, 2015)

2.5 Redutibilidade

A redutibilidade é um importante fator para determinar a qualidade do sinter. Esta propriedade está diretamente relacionada a porosidade do aglomerado produzido. Isto ocorre por conta do aumento do contato entre a superfície sólida e os gases. Assim, macro e micro poros são importantes no material produzido. (TELLES, 2015)

Outro fator importante para a redutibilidade é a basicidade do sinter. Estudos mostram que o sinter apresenta maior redutibilidade quando a faixa de basicidade está entre 1,5 e 2,3. Além disso, a presença de FeO é outro parâmetro que influi na redutibilidade, quanto maior a presença de FeO menor é a capacidade redutora do sinter. (LOPES, 2012)

2.6 Materiais primas para produção do sinter

Para produção de sinter são utilizadas basicamente carga metálica (*sinter feed* – Finos de Minério de Ferro), combustíveis sólidos (Finos de Coque ou Carvão Vegetal) e fundentes (Óxidos Básicos).

2.6.1 Minério

O termo utilizado para o minério de ferro empregado especificamente na sinterização é *sinter feed*, o qual deve apresentar características físicas e químicas adequadas. O *sinter feed* apresenta, principalmente, duas variações minerais com valor comercial: hematita e magnetita (SILVA, 2011).

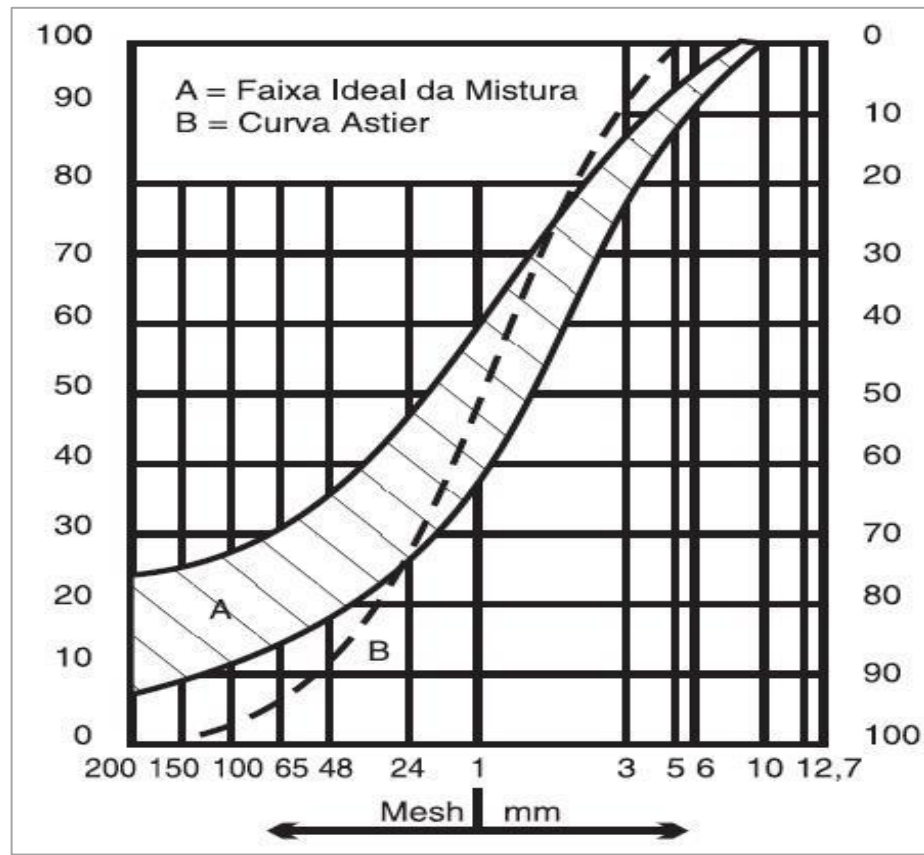
A hematita é um óxido que apresenta em sua composição aproximadamente 70% de ferro, é a principal fonte mineral de ferro das jazidas de Carajás, no Pará, e é a principal utilizada na siderurgia. Já a magnetita é um óxido de ferro altamente magnético e auxilia na exclusão de elementos indesejáveis do minério. (DUARTE, 2016)

Quimicamente, o *sinter feed* deve apresentar características específicas, como teor de escorificáveis e o teor de impurezas, como o fósforo e o enxofre (PADULA, 2009). Além disso, evita-se a utilização de fontes com alto teor de sílica nas parcelas mais grossas, visto que o volume de escória é afetado por conta do não envolvimento de toda sílica nas reações de sinterização.

Outro fator importante é controle no teor de alumina, a qual difunde-se na rede de hematita secundária, o que afeta diretamente na formação de finos durante a sinterização. Este comportamento faz com que a permeabilidade do leito seja comprometida. (PADULA, 2009)

A principal característica a ser analisada de um minério de ferro a ser sinterizado é a distribuição granulométrica (DANIEL, 2018). Os finos de minério de ferro, devem apresentar a faixa granulométrica de acordo com a curva de Astier, representada na Figura 9.

Figura 9 - Faixa granulométrica ideal para o *sínter feed*.



Fonte: HONORATO,2005.

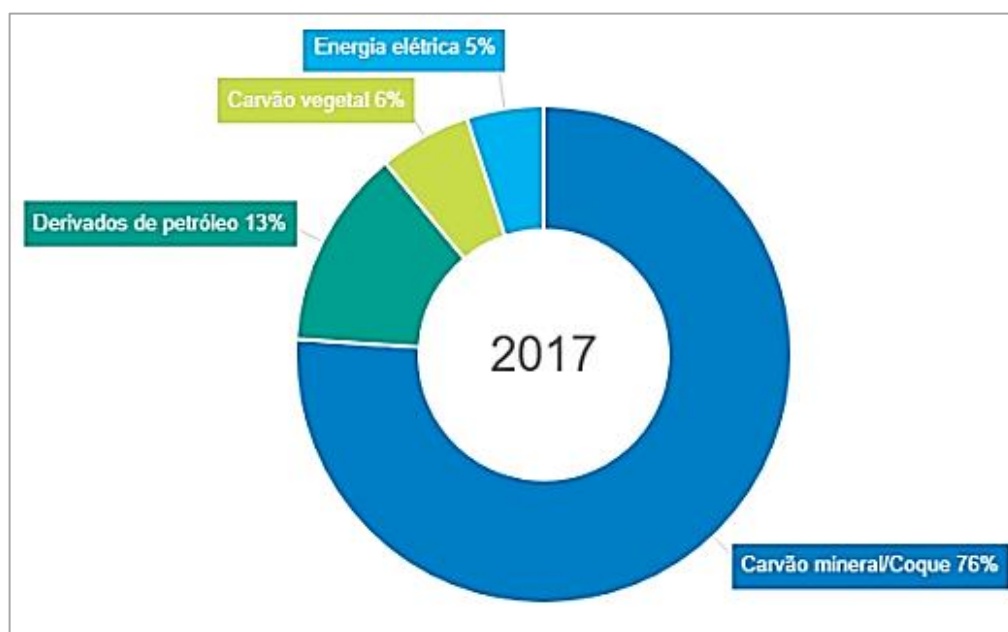
A curva define a dimensão máxima de 6,35 mm e mínima de 0,106 mm (150 Mesh) para as partículas de *sínter feed*. De acordo com Honorato (2005) a distribuição granulométrica do material a ser sinterizado não deve conter partícula maiores que 9,5 mm e partículas com dimensões entre 1,0 e 6,5 mm devem compor a maior parte da mistura.

2.6.2 Combustível

O fornecimento de energia para o processo de sinterização é feito pela adição de combustíveis, os quais sustentam o a frente de queima e garantem a ignição do processo (TELLES, 2015). O principal objetivo da adição de combustível à mistura é o de fornecer calor ao processo. (LOPES, 2012)

Combustíveis sólidos são empregados nesta função, dentre eles os principais são a moinha de carvão vegetal, coque e antracito. O coque ainda é o combustível mais utilizado nas plantas de sinterização (LOPES, 2012). Em 2017 a produção de aço utilizou 76% de coque nas plantas de produção, como apontado na Figura 10.

Figura 10 - Matriz energética para a produção de aço em 2017.



Fonte: INSTITUTO AÇO BRASIL, 2018.

A granulometria dos combustíveis utilizados na sinterização deve estar na faixa de 1 a 3 mm, isso porque o tamanho das partículas de combustível influencia na formação de fases, porosidade, redutibilidade e resistência do sinter. Os combustíveis devem ter reatividade e poder calorífico suficiente para manter o processo (UMADEVI, 2008).

A substituição do coque por carvão vegetal é uma tendência face a fatores econômicos e ambientais. O coque possui reservas escassas, além de ser uma matéria prima mineral e a combustão contribui para a geração de gases do efeito estufa. (TELLES, 2015)

Já o carvão vegetal é proveniente da carbonização da madeira e os danos de extração podem ser minimizados por técnicas de reflorestamento e remediação. Ademais, os teores de enxofre e nitrogênio são baixos neste combustível, o que gera menores emissões de gases associados a estes elementos. A vantagem de ser

renovável é outro fator importante para o carvão vegetal, visto que o CO₂ gerado no processo é capturado no ciclo da biomassa. (TELLES, 20015)

Ainda assim, o uso do carvão vegetal em detrimento do coque causa uma diminuição nos picos da temperatura de sinterização e o carvão vegetal possui menor teor de carbono fixo. (LOVEL, 2009)

2.6.3 Fundente

A finalidade do uso de fundentes no processo de sinterização é a escorificação de impurezas presentes na mistura. Os fundentes podem ser ácidos, portadores de SiO₂ ou Al₂O₃, ou básicos, portadores de CaO ou MgO. De acordo com as impurezas da carga é determinada o tipo de fundente a ser usado, para que a basicidade seja conciliável com a operacional do alto forno. (DANIEL, 2018; HONORATO, 2005)

Os fundentes mais utilizados na sinterização são o calcário, cal, dolomita, serpentinito, quartzito e olivina (MOURÃO, 2006). A granulometria do fundente, principalmente do calcário, é importante pois pode modificar a composição química no leito de sinterização (SILVA, 2014).

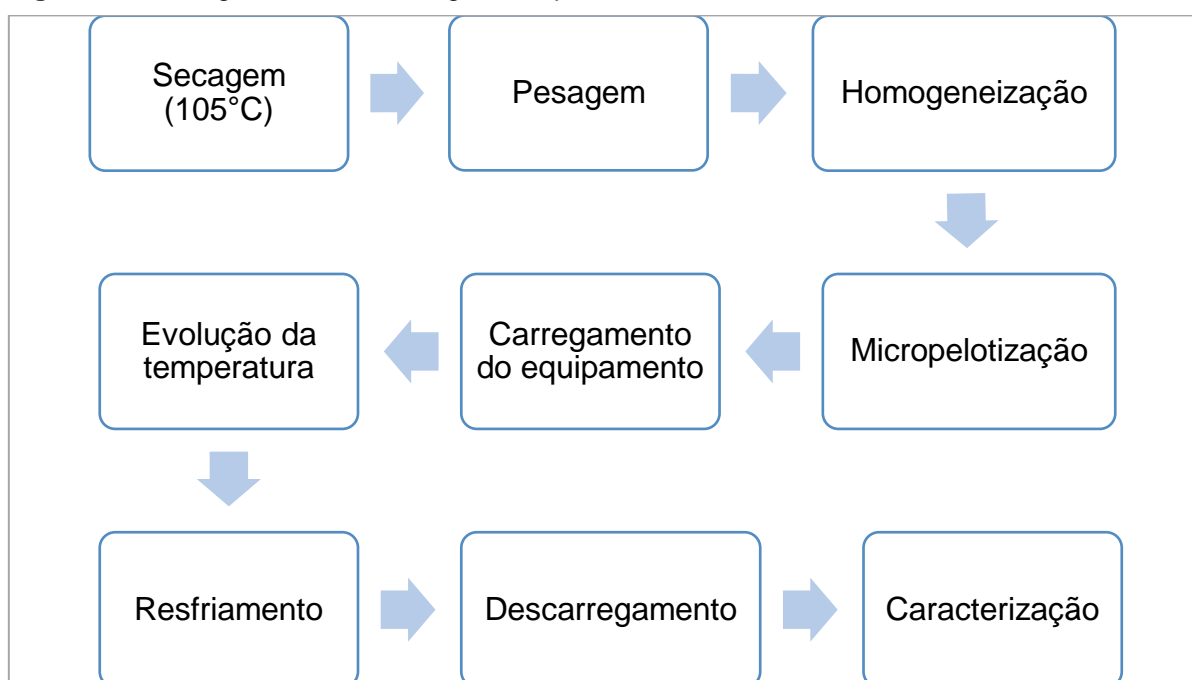
Assim, é importante que a dosagem de fundente a ser adicionado a mistura seja bem mensurada, para que o sinter possa ter uma boa estrutura e as características metalúrgicas melhoradas. (DANIEL, 2018)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A execução dos experimentos para a produção dos sínteres (sinterização) foi realizada na Usina de Materiais, do Laboratório de Engenharia Química (LEQ) da Universidade Federal do Pará - UFPA.

De modo geral, as etapas utilizadas neste trabalho são exibidas no fluxograma mostrado na Figura 11.

Figura 11 - Fluxograma da metodologia do experimento.



Fonte: Autor, 2019.

3.1 Montagem do equipamento

Para que o processo fosse realizado o reator de leito fixo foi primeiramente vedado com auxílio de argila e silicone, e a câmara de isolamento preenchida com vermiculita e lã de rocha. Em seguida sete termopares foram posicionados no reator, para verificação das temperaturas atingidas, conforme a Figura 12.

Figura 12 - Reator vertical de leito fixo pronto para o experimento.



Fonte: Autor, 2019.

Após a colocação dos termopares, o exaustor e a grelha foram fixados, com objetivo de reter o material micropelotizado e dar passagem ao ar. Além disso, a verificação da velocidade de entrada do ar dentro do reator foi feita com auxílio de um anemômetro, Figura 13.

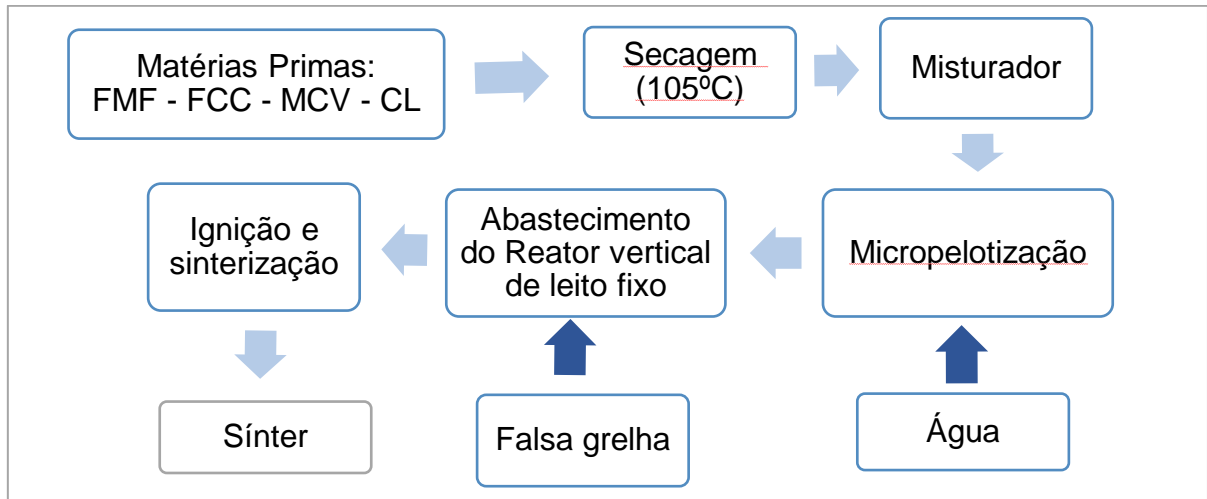
Figura 13 - Anemômetro.



Fonte: Autor, 2019

Posteriormente, o reator foi carregado com a matéria prima pré-tratada, além de ter sido adicionada a falsa grelha (sínter com granulometria de 12 mm, cedido pela SINOBRAS) com a função de proteger a grelha do reator. A Figura 14 exibe um fluxograma com as principais etapas deste procedimento experimental.

Figura 14 - Principais etapas do processo sinterização experimental.



Fonte: Autor, 2019.

Para que houvesse a ignição do combustível foi utilizado um maçarico que esteve fixado na entrada superior do reator, o mesmo possui um regulador para a chama e foi posicionado no centro do diâmetro da câmara de combustão. Além disso, o maçarico foi acoplado a uma mangueira alimentada por gás liquefeito (GLP). O sistema é mostrado na Figura 15.

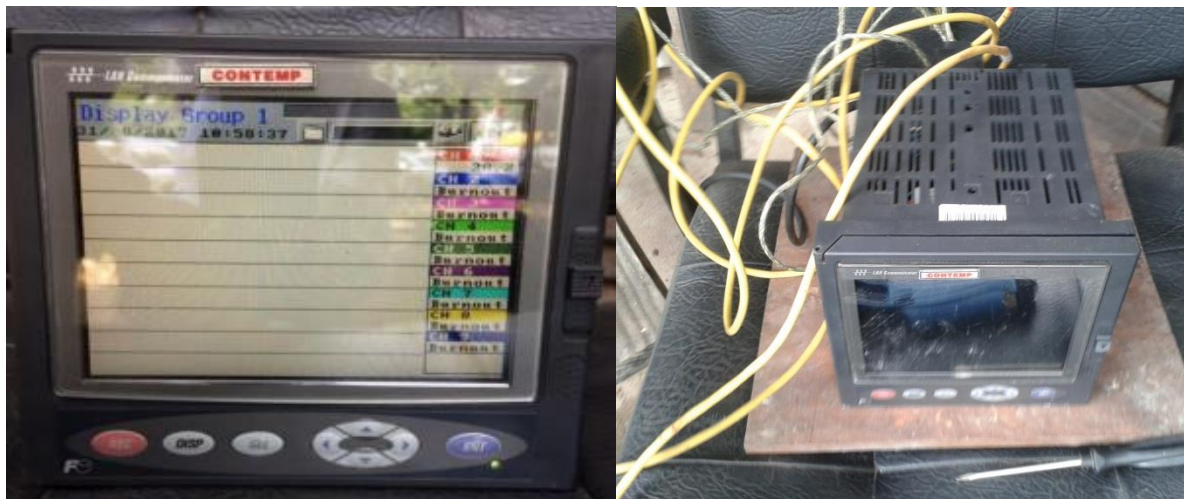
Figura 15 - Posicionamento do maçarico.



Fonte: Autor, 2019.

A coleta de dados relacionados a temperatura foi feita pelo aparelho *Paperless Recorder* conectado aos termopares, os quais forneceram os dados da evolução de temperatura da frente de combustão, conforme a Figura 16.

Figura 16 - Equipamento de registro de temperatura *Paperless Recorder*.



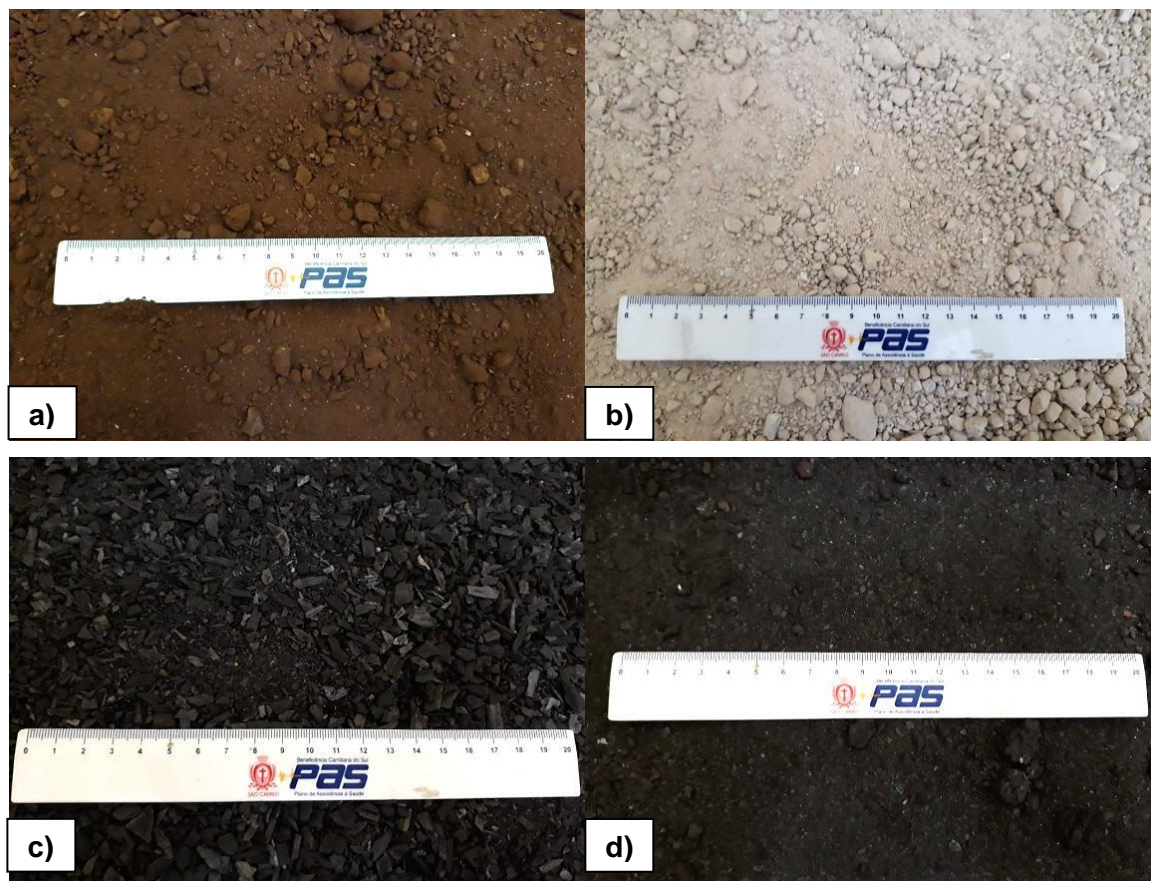
Fonte: Autor, 2019.

3.2 Matérias primas

As matérias primas utilizadas foram cedidas pela SINOBRAS, siderúrgica integrada localizada no município de Marabá/PA, e tratadas de acordo com o estudo feito por Daniel (2018), e os materiais cedidos foram: Finos de Minério de Ferro (FMF), Finos de Calcário Calcítico (FCC), Moinha de Carvão Vegetal (MCV) e Carepa de Laminação (CL). Na mistura, o FMF teve a função de *sínter feed*, o FCC atuou como fundente e a MCV como combustível. Já a CL atuou como material de adição à carga que seria sinterizada.

A Figura 17 a seguir, apresenta as matérias primas utilizadas no procedimento experimental.

Figura 17 - Matérias primas utilizadas para o processo de sinterização. a) FMF, b) FCC, c) MCV e d) CL.



Fonte: Autor, 2019.

As matérias primas apresentaram umidade, diante disso, realizou-se o processo de secagem a 105°C em estufa com recirculação de ar durante 24 h, após a esta etapa, as massas foram pesadas de acordo com a necessidade de utilização para o experimento.

3.3 Análise granulométrica das matérias primas

Para determinar a granulometria das matérias primas para a sinterização, baseou-se na metodologia aplicada por Daniel (2018), mediante o processo de peneiramento em um conjunto de peneiras com malhas de 6,35 mm; 4,0 mm; 2,83 mm; 1,68 mm; 1,0 mm; 0,5 mm; 0,297 mm; 0,210 mm; 0,149 mm; 0,105 mm e 0,53

mm (Figura 18), de acordo com as normas ABNT NBR 7181: 2016 e NBR ISO 4701:2009.

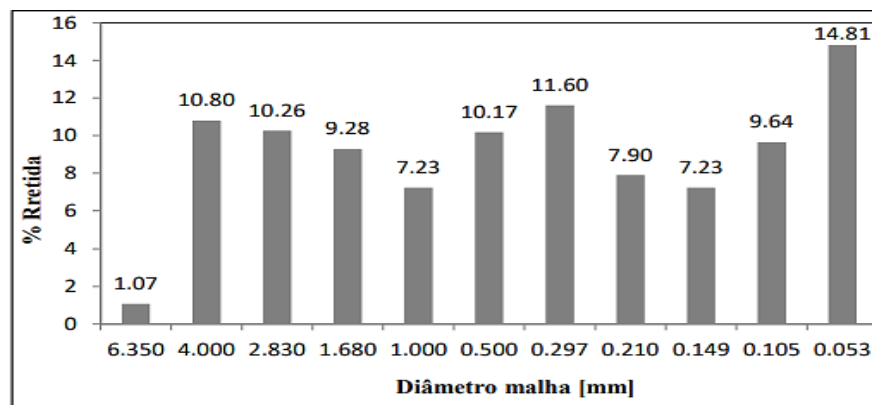
Figura 18 - Equipamento de peneiramento (Ro-Tap) e as peneiras.



Fonte: Autor, 2019.

Segundo Daniel (2018), a análise granulométrica é importante, pois é preciso garantir a permeabilidade do leito de sinterização. Ainda segundo o estudo, as partículas de FMF devem ser analisadas, pois partículas muito grossas podem fragilizar o sinter e as partículas muito finas acabam prejudicando a permeabilidade do leito. Ambas as condições interferem na eficiência da frente de sinterização. A Figura 19 representa a análise granulométrica para o FMF.

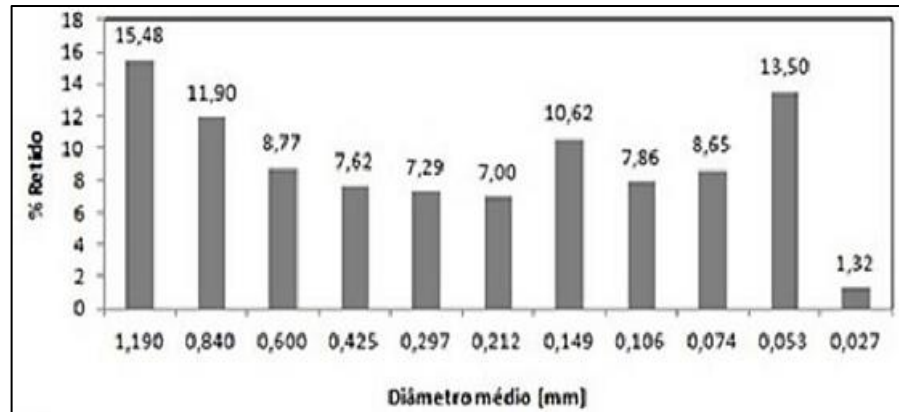
Figura 19 - Análise granulométrica do FMF.



Fonte: Daniel, 2018

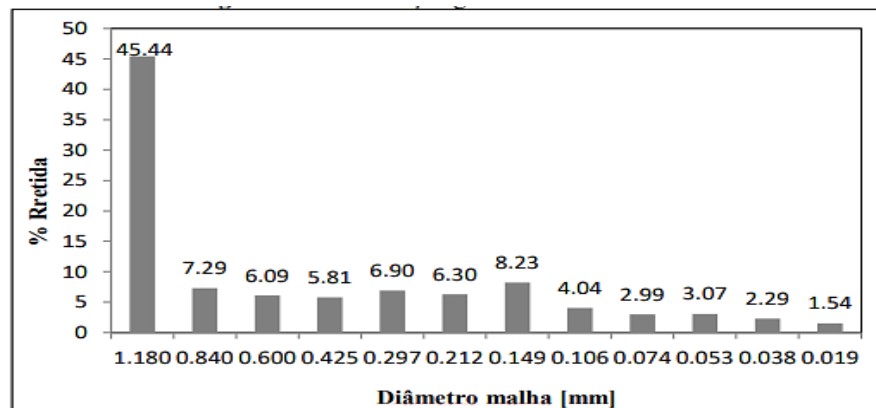
A análise granulométrica das adições, combustíveis e fundentes também é importante para eficiência do processo. Daniel (2018) elucida que a distribuição eficiente permite a elevação na resistência do sínter, com ganhos de produtividade e rendimento. Assim, nas Figuras 20, 21 e 22, seguem as análises granulométricas da CL, MCV e FCC, respectivamente.

Figura 20 - Análise granulométrica da CL.



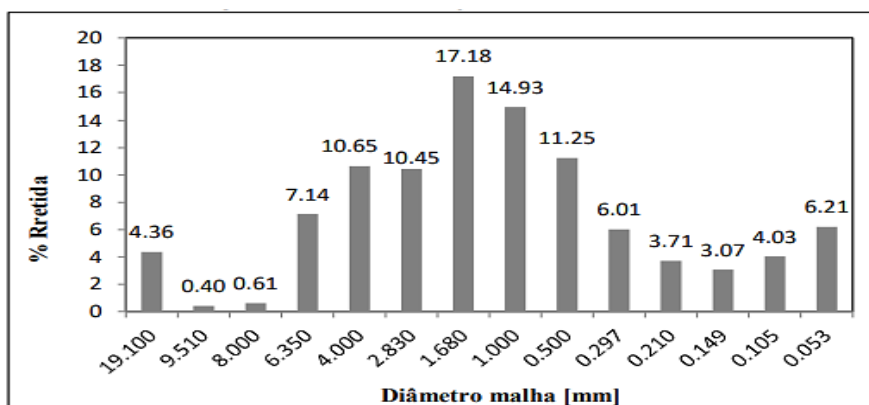
Fonte: NEVES, 2016.

Figura 21 - Análise granulométrica da MCV.



Fonte: DANIEL, 2018.

Figura 22 - Análise granulométrica do FCC.



Fonte: DANIEL, 2018.

3.4 Teor de umidade ótima para a micropelotização

Para esta etapa, as matérias primas foram pesadas e secas durante 24 horas, a 105°C e em estufa, conforme as informações da Tabela 1.

Tabela 1 - Massas das matérias primas.

Materiais	M_{UMIDA} (g)	M_{SECA} (g)	M_{UTILIZADA} (g)
FMF	800	750	700
FCC	200	195	100
MCV	200	150	80
CL	250	243	120
Total			1000

Fonte: Autor, 2019

A massa úmida (M_{UMIDA}) foi pesada em uma quantidade maior do que a necessária, por conta da provável redução das massas após a secagem. Para o controle do procedimento, as massas após a secagem (M_{SECA}) foram pesadas e utilizou-se a massa adequada (M_{UTILIZADA}) para a homogeneização de 1 Kg de material, para a formulação de: 70% FMF, 10% FCC, 08% MCV E 12% CL.

As matérias primas foram homogeneizadas com auxílio de uma betoneira, e houve a adição de umidade de forma gradual. A cada 5 minutos, 1% de água foi adicionado e as massas pesadas com auxílio de um recipiente de vidro, com volume de 287,16 cm³, conforme a Figura 23.

Figura 23 - Processo de Micropelotização.



Fonte: Autor, 2019.

Por fim, a média das três massas pesadas foi usada para determinação da massa específica, conforme a Equação 15.

$$M_{esp} = \frac{M_{media}}{V_{recipiente}} \quad (15)$$

O estudo do teor de umidade ótimo auxilia no cálculo da massa total a ser carregada no reator. Utiliza-se a massa específica encontrada no experimento e o volume do reator para o cálculo da massa total, conforme a Equação 16.

$$M_{total} = M_{esp} \times V_{reator} \quad (16)$$

Para determinar a capacidade do reator a fórmula para calcular o volume do cilindro foi utilizada, o diâmetro adotado foi de 15 cm e a altura de 45 cm, conforme o estudo feito por Daniel (2018).

3.5 Abastecimento do reator vertical de leito fixo

Mediante o estudo do teor de umidade ótima a quantidade de água para homogeneização da massa a ser sinterizada foi calculado. A massa a ser carregada

no reator foi misturada com auxílio de uma betoneira e após o procedimento levada ao reator e colocada na câmara de combustão, sobre a falsa grelha (Figura 24).

Figura 24 - Abastecimento do leito com a mistura micropelotizada.



Fonte: Autor, 2019.

Uma camada de MCV foi colocada sobre a carga, para que a ignição pudesse ocorrer. O exaustor é ligado após o início da combustão para que a transferência de calor, realizada por Machado (2006), pudesse acontecer. A chama só foi desligada após a temperatura do primeiro termopar se estabilizar, como mostra a Figura 25.

Figura 25 - Chama de ignição.

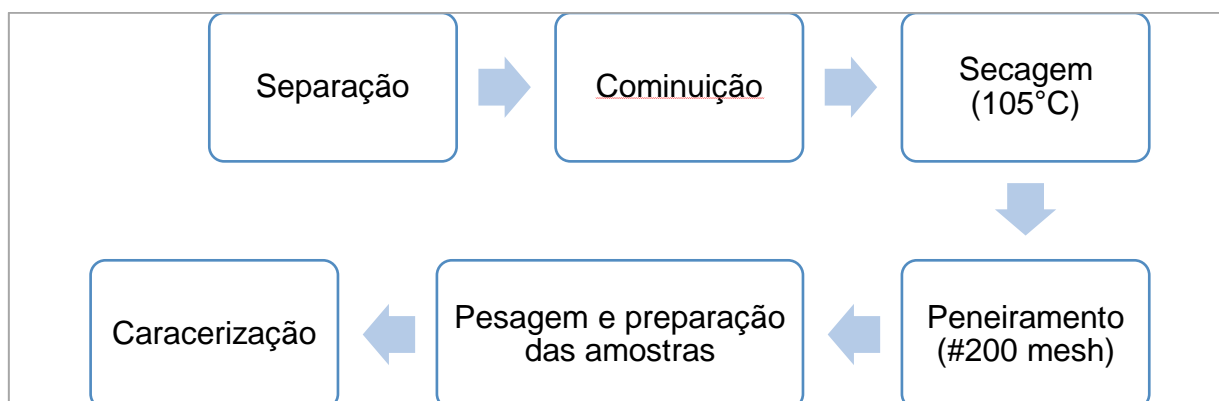


Fonte: Autor, 2019.

3.6 Caracterização do sínter

Para as técnicas de caracterização, as amostras foram preparadas de acordo com que cada procedimento exigia (Figura 26).

Figura 26 - Fluxograma das etapas de preparação das amostras para a caracterização.



Fonte: Autor, 2019

As matérias primas e os sínteres produzidos (Sínter 1 e Sínter 2), foram caracterizados física-quimicamente por meio de análises em MEV, MEV/EDS, FRX, DRX, permeabilidade magnética (FeO-metter), para que as características mineralógicas, químicas, morfológicas fossem avaliadas, frente a importância destas para a qualidade do produto.

Para a caracterização mecânica, o teste de tamboreamento foi realizado de acordo com Telles (2015) e adaptado por Daniel (2018). Ademais, a norma que padroniza este teste é a ABNT NBR ISO 3271/2018, a qual utiliza 20 Kg de sínter para o teste.

Mas o experimento foi adaptado conforme Daniel (2018), com 1 kg de cada sínter produzido, com a granulometria retida em peneiras com abertura de 7,93 mm e 9,52 mm, em seguida a amostra foi levada à betoneira e iniciou-se o procedimento de contato abrasivo entre as partículas. Após ser submetido a rotações na betoneira por 7 minutos, o material foi classificado em peneira com abertura de 6,35 mm. Os resultados foram expressos em porcentagem de material retido.

4 RESULTADOS

4.1 Teor de umidade ótima

O estudo do teor de umidade ótima é um importante método para formação de micropelotas e determinação da menor massa específica aparente, visto que este é um parâmetro significativo em relação a porosidade do sínter produzido. A Tabela 2 mostra os resultados obtidos no experimento realizado com a adição de CL.

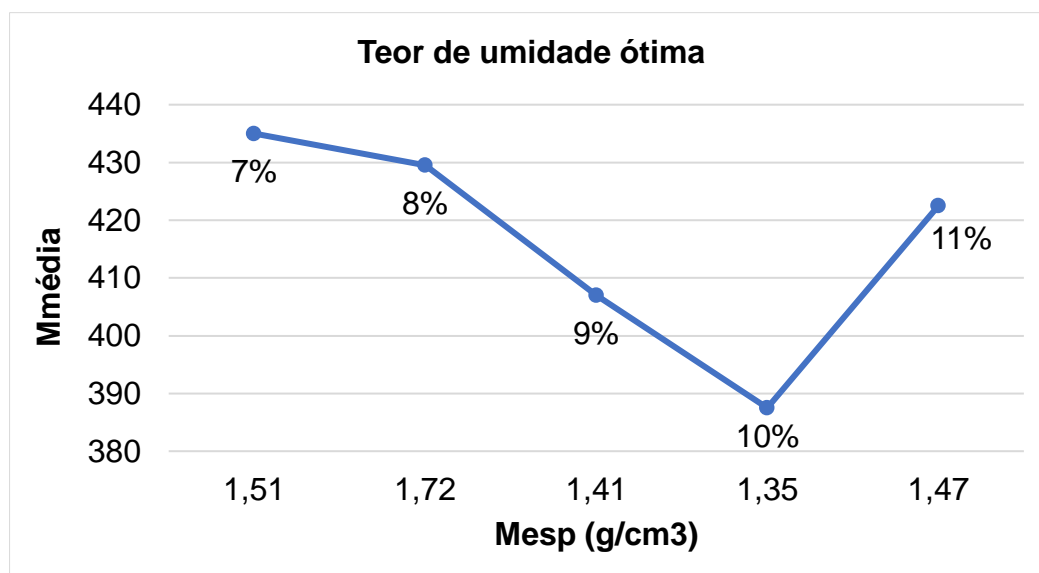
Tabela 2 - Determinação do teor de umidade ótima.

Amostra	Massa Média (g)	% Água	M _{esp} (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: Autor, 2019

Os valores obtidos com a média das massas das amostras e da massa específica aparente, para a determinação do teor de umidade ótima, podem ser vistos na Figura 27.

Figura 27 - Teor de umidade ótima.



Fonte: Autor, 2019.

O teor de umidade de 10% foi o selecionado como a umidade ótima baseado nos estudos de Telles (2015) e Daniel (2018), os quais utilizaram teores de umidade ótima de 8% e 10%, respectivamente. Além disso, as micropelotas foram formadas e agregadas com esse teor, como mostra a Figura 28.

Figura 28 - Material micropelotizado.



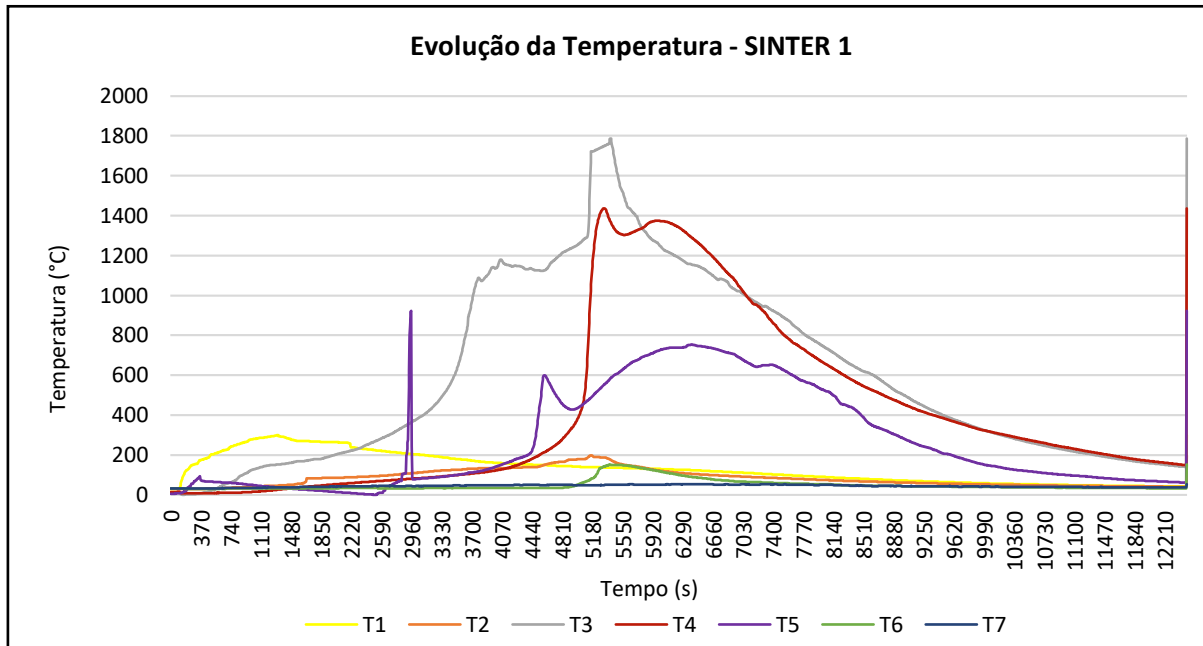
Fonte: Autor, 2019

4.2 Temperatura

A permeabilidade no leito de sinterização faz com que o tempo do procedimento seja diminuído por conta da maior vazão dentro do leito. Além disso, os picos das temperaturas de sinterização tendem a aumentar. (TELLES, 2015)

Para o Sínter 1 produzido, com velocidade do ar de 0,62 m/s, a evolução da temperatura é mostrada na Figura 29.

Figura 29 - Evolução da temperatura na produção do Sínter 1.

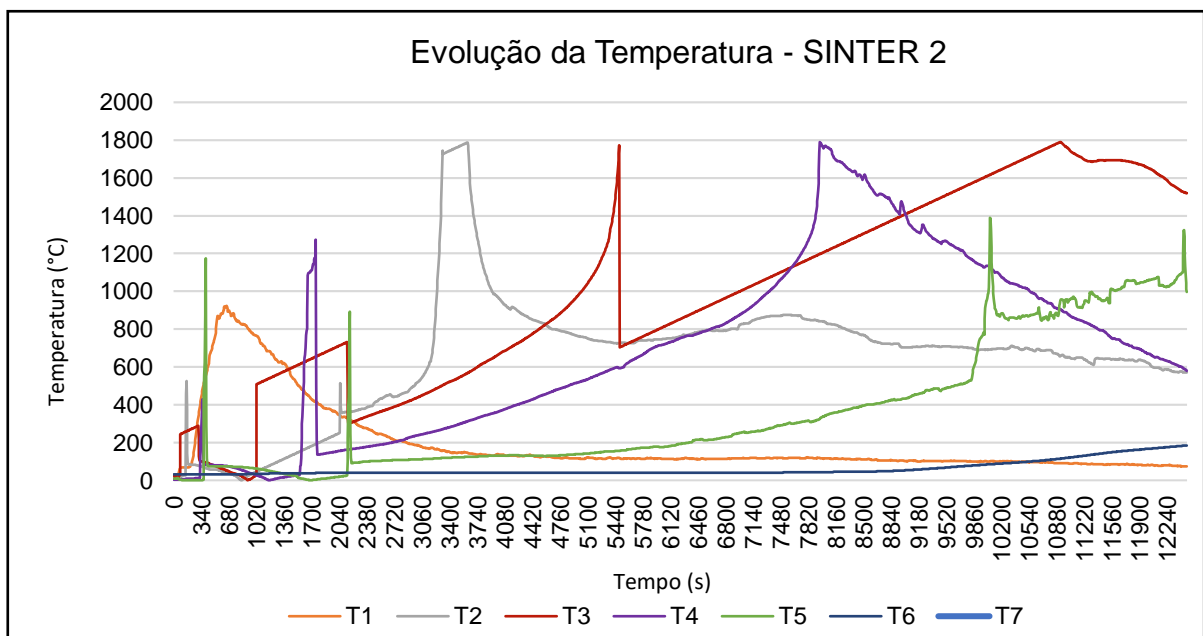


Fonte: Autor, 2019.

É possível observar que a frente de temperatura de sinterização evoluiu de forma gradual. A temperatura máxima atingida foi de 1786,4°C após aproximadamente 1 hora e 30 minutos de experimento.

Para o segundo experimento, Sínter 2, com a mesma velocidade do ar de 0,62 m/s, apresentou a evolução de temperatura de acordo com a Figura 30.

Figura 30 - Evolução da temperatura na produção do Sínter 2.



Fonte: Autor, 2019.

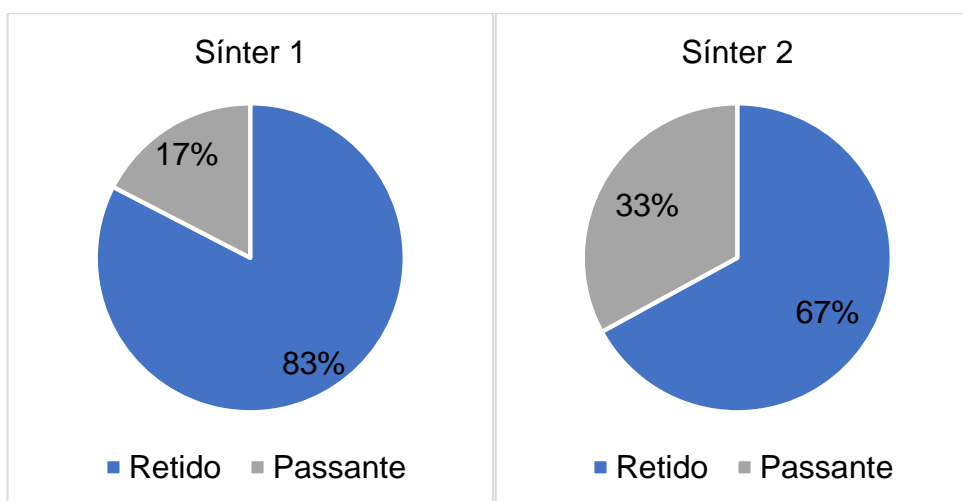
O segundo experimento não apresentou a evolução de temperatura tão gradual comparado ao primeiro experimento, acredita-se que esta diferença pode ter ocorrido devido ao ambiente úmido decorrente do tempo chuvoso no dia do experimento, o que pode ter gerado resistência a combustão da moinha de carvão vegetal contida na mistura a ser sinterizada e também por algum erro de leitura de alguns termopares durante o procedimento. A temperatura máxima atingida foi de 1787,7°C, em 1 hora e 20 minutos após o início do experimento.

4.3 Caracterização do sínter

4.3.1 Tamboreamento

A Figuras 31 apresenta os valores obtidos por meio do teste de tamboreamento para o sínter 1 e 2, respectivamente.

Figura 31 – Resultado do Teste de tamboreamento Sínter 1 e do Sínter 2.



Fonte: Autor, 2019

Os dados mostram que ambos os experimentos apresentaram resultados dentro da norma estabelecida, ABNT NBR ISSO 3271. Entretanto é possível observar que o Sínter 1 apresentou melhor resistência (83% de massa retida), pois produziu menos finos em relação ao Sínter 2 (67% de massa retida).

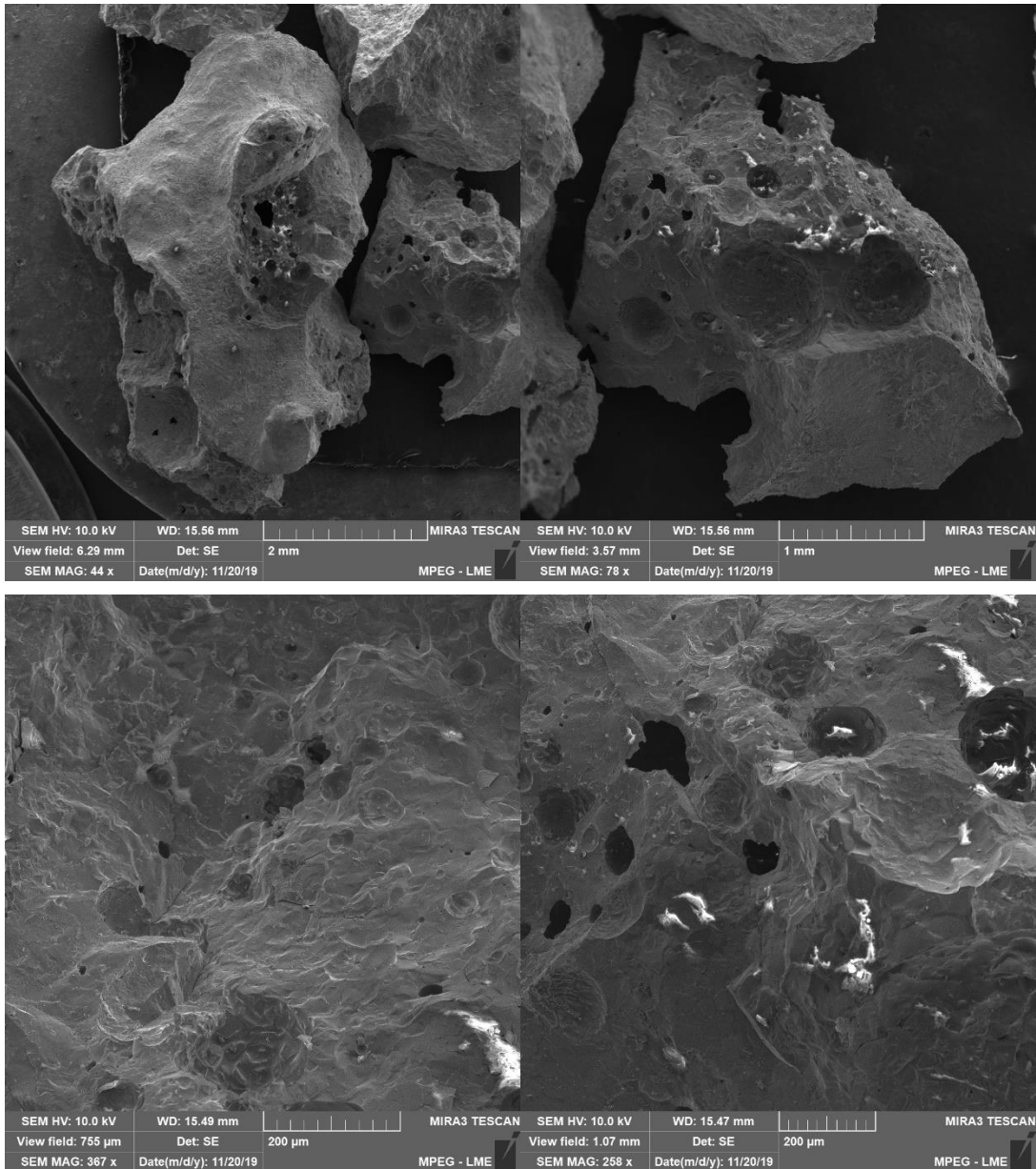
A resistência é um fator importante visto que as exigências de esforços para o carregamento em alto forno são grandes, assim o sínter deve apresentar boa resistência para não gerar finos e comprometer a percolação dos gases.

4.3.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Os sínteres produzidos foram analisados por meio de microscopia eletrônica de varredura, a qual é de fundamental importância para caracterização morfológica dos materiais.

Essa caracterização é importante pois a microestrutura dos elementos que são carregados no alto forno influencia nas propriedades do ferro gusa e, conseqüentemente, do aço. A morfologia do Sínter 1 é apresentada na Figura 32.

Figura 32 - Micrografias de uma amostra do Sínter 1.

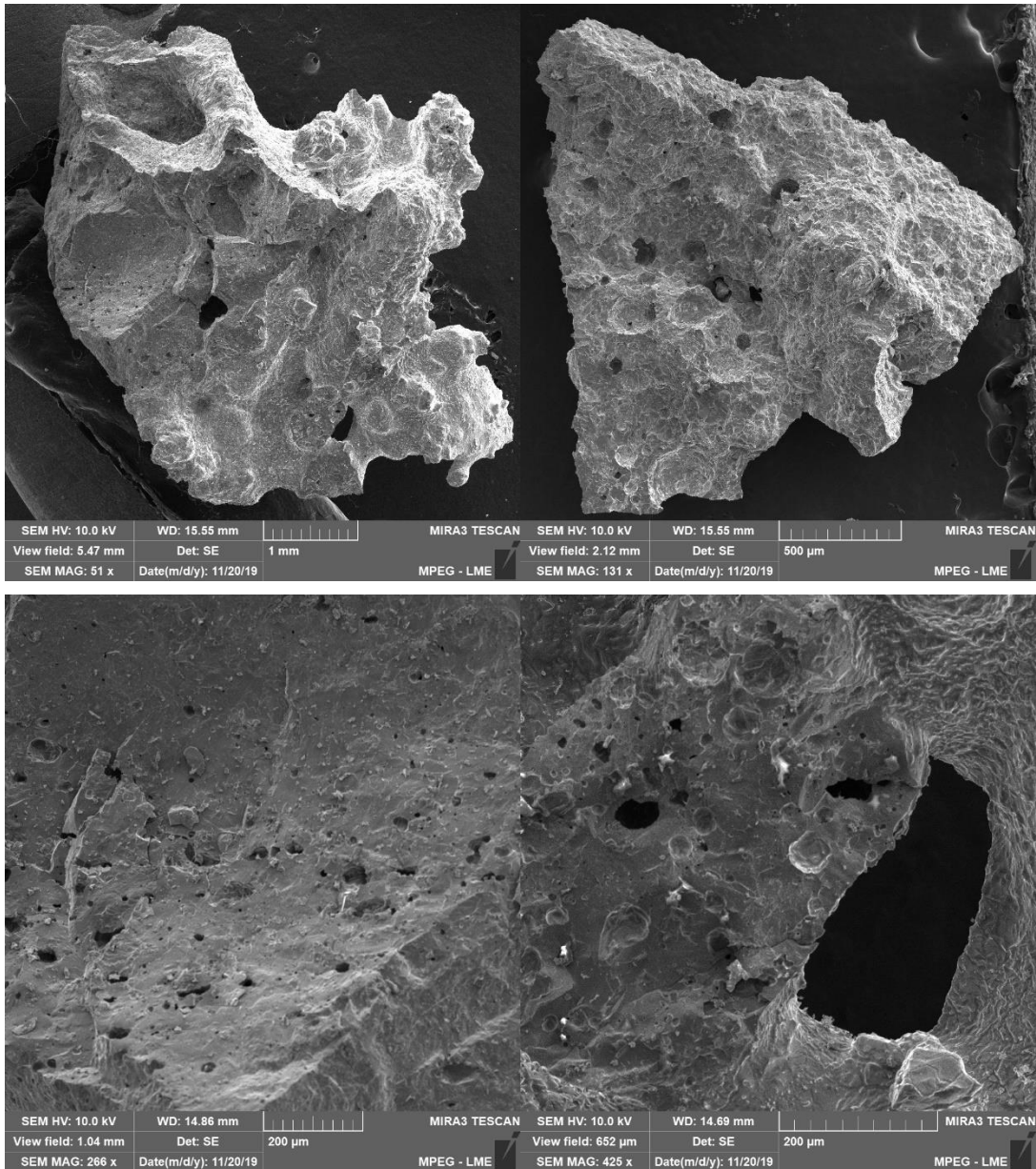


Fonte: Autor, 2019.

Por meio da micrografia é possível observar a presença de macro e microporos, microcavidades e de áreas com partículas de material não sinterizado. Além disso é possível observar a presença de micro trincas na amostra, possivelmente formadas pelo processo de solidificação do material durante o resfriamento do sínter, e também se observa a existência de regiões com presença de calcário não sinterizado na superfície do material.

O sínter 2 apresentou características similares, conforme exhibe a Figura 33.

Figura 33 - Micrografias de uma amostra do sínter 2.



Fonte: Autor, 2019.

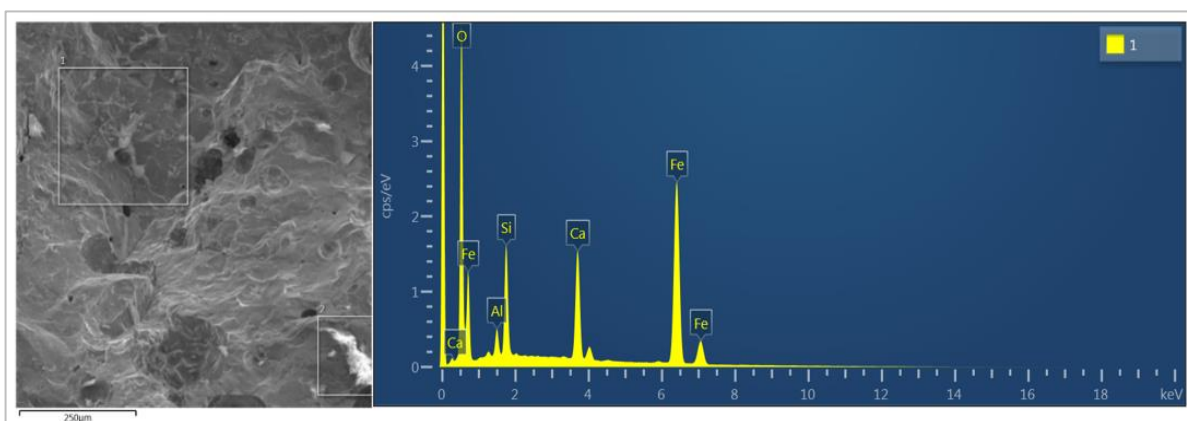
Entretanto, a presença de macroporos foi menor comparado ao Sínter 1. O aparecimento de áreas de aglomeração e regiões de nucleação também pode ser notado. A eficiência da frente de sinterização pode ter influenciado neste resultado.

A importância da porosidade no bolo de sínter é fundamental para que o sínter seja de boa qualidade. Além disso, a presença de microporos é um dos parâmetros para o aumento do índice de redutibilidade. (BHAGAT, 2006)

4.3.3 Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS)

A análise por EDS foi realizada para que se tivesse um estudo quantitativo em relação aos elementos encontrados nos dois sinteres. Para o sinter 1 a composição foi de 48,02% de ferro, 36,06% de oxigênio, 8,88% de cálcio, 5,54% de silício e 1,50% de alumínio. Estes resultados corroboram com os resultados obtidos via DRX e FRX, além de serem mostrados na Figura 34.

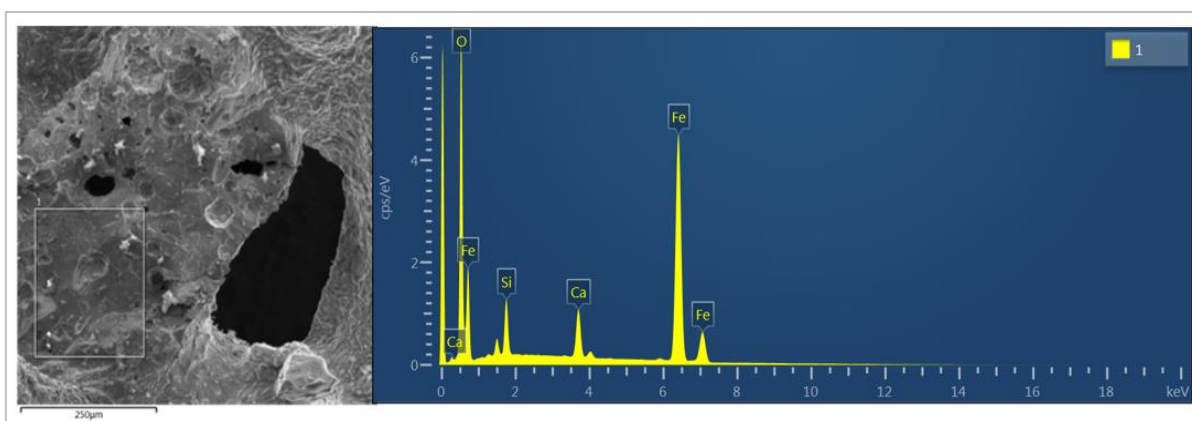
Figura 34 – MEV/EDS do Sinter 1.



Fonte: Autor, 2019

O sinter 2 apresentou maior teor de ferro na área analisada com porcentagem de 62,42. O teor de cálcio foi de 4,02%, o de silício correspondeu a 3,14% e o de oxigênio 30,43%. Os resultados também foram compatíveis com os obtidos pelas análises químicas e mineralógicas. A Figura 35 apresenta estes resultados.

Figura 35 – MEV/EDS do Sinter 2.



Fonte: Autor, 2019

A heterogeneidade do sinter é responsável pela diferença na proporção de elementos em diferentes áreas do sinter, como elucidada Telles (2015).

4.3.4 Fluorescência de Raios-X (FRX)

As análises feitas por FRX e perda ao fogo, demonstram a composição química dos materiais. Esta análise foi feita para as matérias primas e sínteres produzidos. A Tabela 3 apresenta os dados de FRX das matérias primas usadas neste trabalho.

Tabela 3 - FRX das matérias primas.

FCC		CL		FMF		MCV	
Comp.	%	Comp.	%	Comp.	%	Comp.	%
Fe ₂ O ₃	3,46	Fe ₂ O ₃	51,4	Fe ₂ O ₃	80,6	Fe ₂ O ₃	1,06
SiO ₂	5,86	SiO ₂	0,79	SiO ₂	5,83	SiO ₂	10,9
K ₂ O	0,43	K ₂ O	0,15	K ₂ O	0,37	K ₂ O	0,49
CaO	54,03	CaO	0,41	CaO	1,81	CaO	1,73
Al ₂ O ₃	4,04	Al ₂ O ₃	0,29	Al ₂ O ₃	5,5	Al ₂ O ₃	2,6
MgO	3,14	MnO	0,29	MgO	0,31	MgO	0,41
TiO ₂	0,29	CuO	0,12	TiO ₂	0,33	TiO ₂	0,11
SrO	0,16	SO ₃	0,12	MnO	0,83	CuO	0,14
PF	28,44	PF	46,33	P ₂ O ₅	0,27	SO ₃	0,41
				PF	3,94	P ₂ O ₅	0,11
						Cl	0,1
						PF	81,9
Total	99,85	Total	99,99	Total	99,79	Total	99,96

Fonte: Autor, 2019

É possível concluir que a maior perda ao fogo foi a da MCV, com 81,9%, em seguida foi pela CL, 46,33%. Ademais o FCC apresentou composições características deste, com alto teor de CaO e presença de MgO, além de apresentar Fe₂O₃ na composição. O FMF teve como principal teor o óxido Fe₂O₃ e a menor perda ao fogo.

Por fim a fluorescência evidenciou o alto teor de ferro presente na CL, o qual alcançou 51,4%. Furmanski (2016) relata que os ensaios utilizam o óxido mais estável para realizar a análise, por isso o teor é apresentado em forma de hematita.

O resultado de FRX para os sínteres é mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 - FRX dos sínteres.

Sínter 1		Sínter 2	
Componente	%	Componete	%
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: Autor, 2019

Por conta das altas temperaturas para a produção do sínter, este material apresenta perda ao fogo de 0%. Os principais óxidos de ambos os sínteres foram SiO₂, CaO, Al₂O₃ e Fe₂O₃, sendo o principal óxido de interesse na composição do sínter.

As análises foram complementadas pelo teor de basicidade e de FeO dos sínteres produzidos, conforme a Tabela 5.

Tabela 5 - Basicidade e teor de FeO.

	Basicidade	FeO (%)
Sínter 1	1,68	11,7
Sínter 2	2,01	9,2

Fonte: Autor, 2019.

Os dois sínteres apresentaram basicidade dentro da faixa aceitável. A basicidade é importante para o índice de redutibilidade do sínter (LOPES, 2012). O teor de FeO é outro fator importante para esta propriedade. O Sínter 2 apresentou maior basicidade e menor teor de FeO comparado ao Sínter 1. Este resultado possivelmente está atrelado a sinterização menos eficiente do segundo experimento.

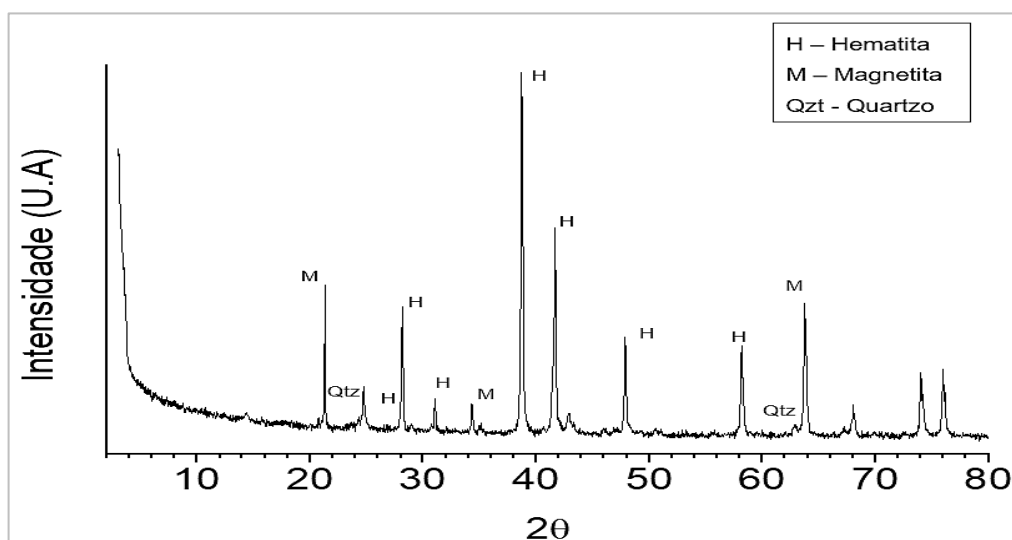
A possível baixa produtividade está relacionada a maior presença de CaO na amostra, além de não atingir os parâmetros necessários para formação de maiores teores de FeO.

4.3.5 Difratometria de Raios-X (DRX)

A difratometria é realizada para verificação das fases mineralógicas presentes no material. As fases cristalinas obtidas são mostradas nas figuras a seguir.

Para o FMF os principais picos foram de hematita (Fe_2O_3) e magnetita (Fe_3O_4). Isto confirma a origem hematítica do minério de ferro e corrobora com os dados obtidos no FRX. Outros picos foram observados, como mostra a Figura 36.

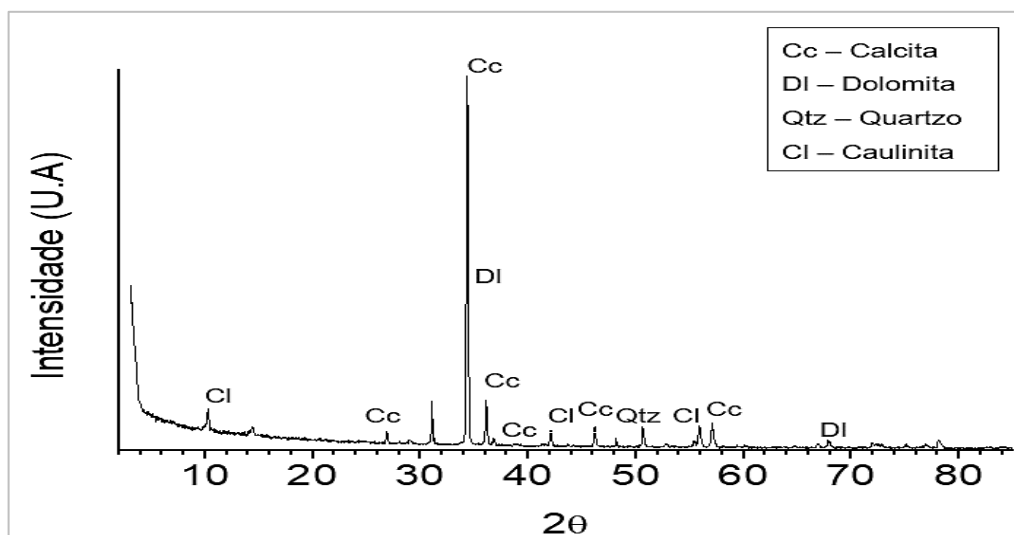
Figura 36 - DRX do FMF.



Fonte: Autor, 2019

O FCC apresentou a calcita como principal fase cristalina. Picos de dolomita e quartzo também foram observados. Os dados de DRX e FRX do FCC confirmam, pelo alto teor de CaO, que o material é de origem calcítica. Os principais picos são apresentados na Figura 37.

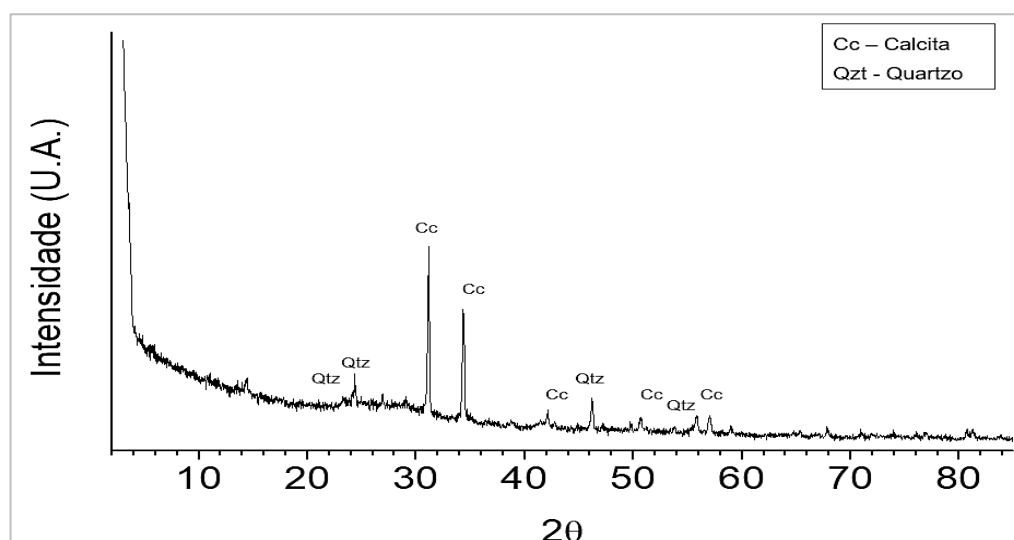
Figura 37 - DRX do FCC.



Fonte: Autor, 2019

Para a MCV o difratograma apresentou picos característicos de calcita. Podem-se observar picos de quartzo, provavelmente provenientes de contaminação de pátios de estocagem e também por ser um material que geralmente é encontrado nas cinzas de carvão vegetal. A Figura 38 mostra dos picos característicos obtidos por DRX.

Figura 38 - DRX da MCV.

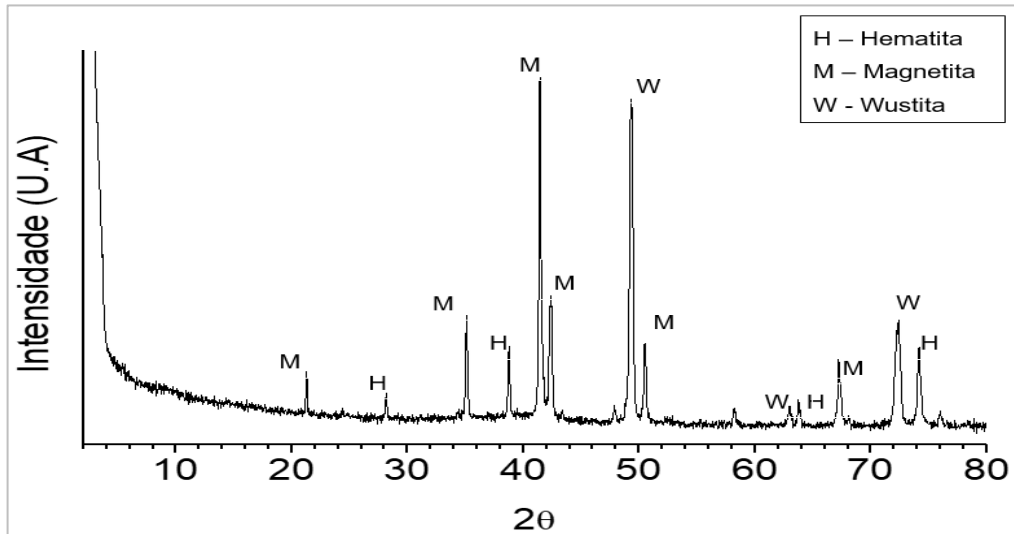


Fonte: Autor, 2019.

A CL apresentou fases relacionadas ao ferro. Os principais picos foram de hematita (Fe_2O_3), magnetita (Fe_3O_4) e wustita (FeO). Assim, o FRX realizado para a CL corroborou com os dados obtidos no DRX, os quais mostram as principais fases e teores com presença de ferro. A wustita (FeO) é um óxido que se esperava encontrar

pois é característico da CL devido a oxidação do ferro por variação brusca de temperatura. O difratograma da análise de DRX é mostrado na Figura 39.

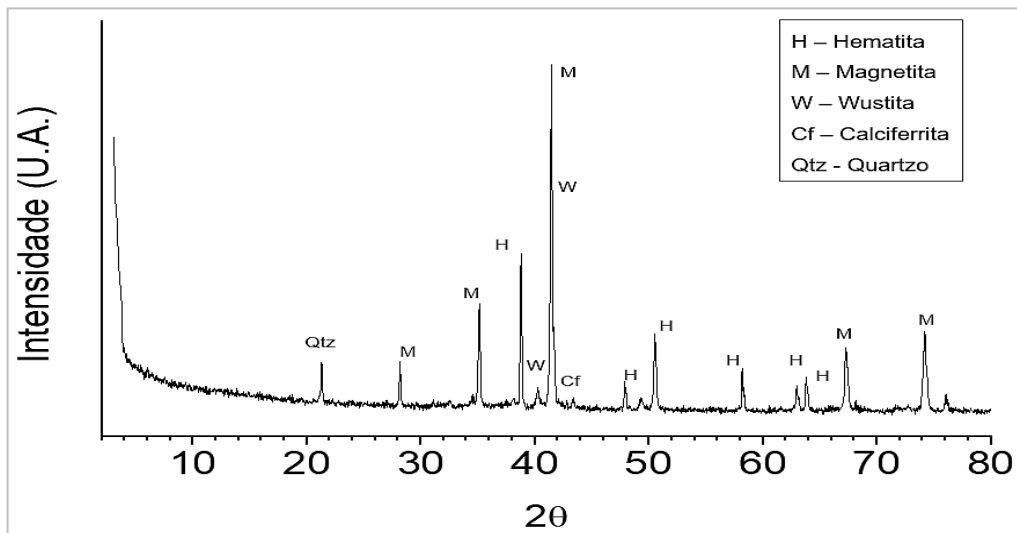
Figura 39 - DRX da CL.



Fonte: Autor, 2019

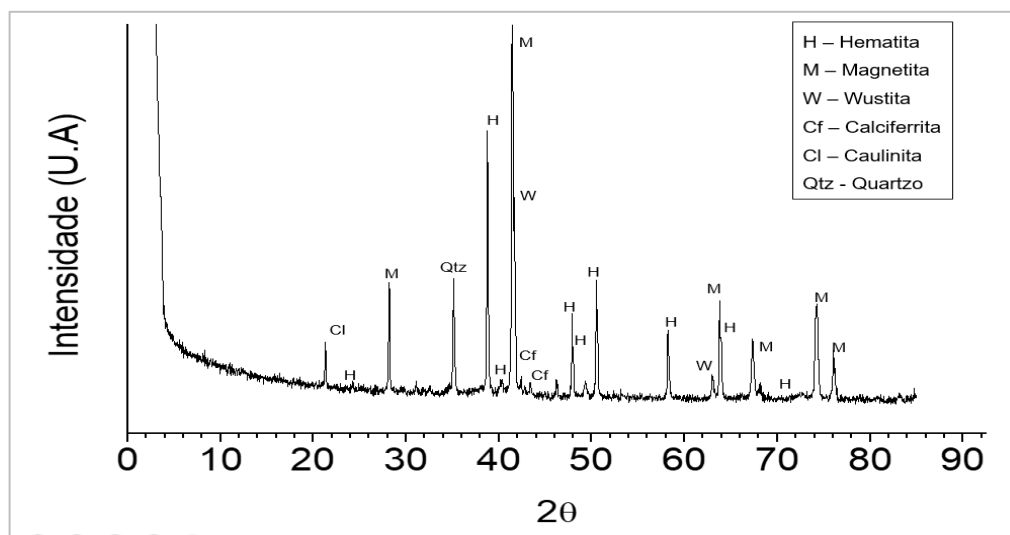
As difratometrias dos sinteres são apresentadas nas Figuras 40 e 41.

Figura 40 - DRX do Sínter 1.



Fonte: Autor, 2019

Figura 41 - DRX do Sínter 2.



Fonte: Autor, 2019

Ambos os sinteres apresentaram como as principais fases presentes, a hematita e a magnetita. Entretanto é possível observar a formação de fases diferentes entre os dois. Ademais a intensidade dos picos de wustita são maiores no Sínter 1. Isso pode ser consequência da adição de carepa, a qual propicia a formação desta fase. (FURMANSKI, 2016)

4.3.6 Análise visual do Sinteres produzidos

Os sinteres apresentaram diferentes características. O primeiro experimento, Sínter 1, teve como resultado um bolo de sínter bem formado e uniforme, diferente do segundo experimento, Sínter 2, que apresentou pedaços de diferentes tamanhos e sem a formação de um bolo. A Figura 42 mostra os sinteres produzidos neste trabalho.

Figura 42 - Sínteres produzidos. Sínter 1 (esquerda) e Sínter 2 (direita).



Fonte: Autor, 2019

A diferença na formação e solidificação pode ter sido influenciada pela eficiência da frente de combustão, a qual pode não ter sido suficiente para sinterizar toda a massa do experimento 2.

5 CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos foi possível concluir que a adição de 12% de carepa de laminação se apresentou como uma carga de adição favorável ao processo de sinterização.

Os resultados de resistência corroboraram para possível aplicação dos sínteres em alto forno, além de ambos apresentarem parâmetros que garantem a boa redutibilidade do sínter e a garantia de permeabilidade do leito.

A comparação entre o primeiro e o segundo experimento permitiu concluir que a segunda sinterização não ocorreu como o previsto, o que propiciou ao sínter menor rendimento aliado a maior geração de finos.

Além disso, os resultados de análise química contribuíram para conclusão de que as matérias primas do Sínter 2 não foram tão bem sinterizadas como as do Sínter 1. Dessa maneira a maior basicidade pode ter ocorrido pela maior presença de FCC e o menor teor de FeO justificado pela ineficiência da frente de combustão, ambos os fatores são decorrentes da sinterização ineficaz.

O sínter 1 apresentou todos os parâmetros avaliados dentro das normas. O bolo formado teve bom rendimento e resistência, composições químicas favoráveis e aspecto poroso satisfatório.

6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Por meio deste estudo algumas sugestões para novos trabalhos são listadas a seguir:

- Comparação da substituição da MCV por coque;
- Análise das regiões centrais do sinter, por meio de micrografia da fratura;
- Avaliação da influência da velocidade do ar no leito de sinterização;
- Utilização de outras porcentagens de carepa de laminação.
- Comparação da caracterização morfológica por MEV com elétrons secundários e retroespalhados.
- Análise através de RI (índice de redutibilidade) e RDI (índice de degradação sob redutibilidade)

REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994, “**NBR 8652: Grandezas e unidades de medida na sinterização de minério de ferro – Padronização**”, Rio de Janeiro.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004, “**NBR 10004: resíduos sólidos – classificação**”, Rio de Janeiro.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009, “**NBR ISO 4701: Minérios de ferro e pré-reduzidos - Determinação da distribuição granulométrica por peneiramento**”, Rio de Janeiro.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009, “**NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente**”, Rio de Janeiro.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009, “**NBR NM 53: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água**”, Rio de Janeiro.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2011, “**NBR ISO 3082: Minérios de ferro - Procedimentos de amostragem e preparação de amostras**”, Rio de Janeiro.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013, “**NBR 16214: Minérios de ferro - Método simplificado para a determinação do teor de umidade para controle de processo**”, Rio de Janeiro.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2018, “**NBR 7181:2018 Solo - Análise granulométrica**”, Rio de Janeiro.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2018, “**NBR ISO 3271: Minérios de ferro como insumo para alto-forno e redução direta — determinação dos índices de tamboreamento e abrasão**”, Rio de Janeiro.
- AISSE, M. M.; COHIM, E.; KIPERSTOK, A.. **Reuso urbano e rural**. In: SANTOS, M. de L. F. dos; BASTOS, R. K. X.; AISSE, M. M. (Coord.). **Tratamento e utilização de esgotos sanitários**. Rio de Janeiro: ABES, 2006. p. 111-154.
- ALVES, D. S., **Construção e Simulação Física do Sinterizador Piloto Tipo Greenawalt**. Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Marabá, p. 66, 2017.
- ANM – AGENCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO, 2019, “**Informe Mineral do Pará 2018.**”, Belém.
- ARAUJO, L. A. **Manual de Siderurgia**. São Paulo: Arte e Ciência, 1997. v. 1.
- BAGATINI, M. C. **Estudo de reciclagem da carepa através de briquetes autorredutores para uso em forno elétrico a arco**. Tese, Pós Graduação em

Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade do Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015 f, 2011.

BALL, D. F.; DARTNELL, J.; DAVISON, J.; GRIEVE, A.; WILD, R. **Agglomeration of Iron Ore**, London, 1973. (Heinemann Educational Books Limited).

BHAGAT, R.P. **Porosity of sinter its relation with the sintering indices**. Isij International, Índia, v. 46, n. 11, p.1728-1730, 2006.

CAMPOS, A. R.; FONSECA, V. O. **Centro de Tecnologia Mineral - Parte II: pelotização**. Rio de Janeiro, Cap. 16, p. 683-750. 2010.

CARDOSO, C. G. L. **desenvolvimento e caracterização de sínter a partir de resíduos sólidos siderúrgicos para aplicação em aciaria**. 86 p. 2016. Dissertação (Mestrado) – UniFOA/Volta Redonda, 2016.

CASAGRANDE, M. C.; SARTOR, M. N.; GOMES, V.; DELLA, V. P.; HOTZA, D.; OLIVEIRA, A. P. N. de. **Reaproveitamento de resíduos sólidos industriais: processamento e aplicações no setor cerâmico**. Cerâmica Industrial, v. 13, n. 1/2, p. 34-42, 2008.

CASSOLA, M.S.; MORAES, S. L. **Aspectos tecnológicos do efeito de aglomerantes na microestrutura de Pelotas de concentrados de minério de ferro**. Revista Metalurgia e Materiais da ABM, v. 63, setembro de 2007, São Paulo, Brasil.

COELHO, L. H. **Rendimento na Sinterização em Função da Mineralogia do Sínter Feed**: Rede Temática em Engenharia e Materiais. Ouro Preto: UFOP; CETEC; UEMG, 2002.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Mineração e economia verde**. Brasília: CNI, 2012.

CUMMING, M.J.; THURLBY J.A. **Developments in Modelling and Simulation of Iron Sintering**, Ironmaking and Steelmaking, v. 17, n. 4, (April, 1990), p. 245- 254, ISSN 0301-9233.

CUNHA, A. F. 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, B. T. F. **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 (Graduação em Bacharelado Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia) – Universidade Federal do Pará, Ananindeua, 2018.

DAWSON, P. R. **Part 2 - Research studies on sintering and sinter quality**. Ironmaking and Steelmaking, v. 20, n.2, p. 137-143, 1993.

DEDAVID, B.A.; GOMES, C.I.; MACHADO, G. **Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.

DIAS, F. O. ; CAUX, A. C. P. S.; SANTOS, R.; SOBRINHO, P. J. N. **Reciclagem de lama de aciaria através de aglomeração para utilização em altos-fornos**. Vila Velha: ABM, 2011.

DIXON, A. **An improved equation for the overall heat transfer coefficient in packed beds**, Chemical Engineering and Processing, Department of Chemical Engineering, Worcester Polytechnic Institute, Worcester, MA 01609, USA, v.35, p.323-331. 1996.

DUARTE, A. S., **Síntese e caracterização de sínter utilizando resíduos siderúrgicos com foco na resistência mecânica**. Dissertação (Mestrado) – UniFOA / Mestrado Profissional em Materiais, Volta Redonda, 2016.

FONSECA, V.O. **Envelhecimento de pelotas de minério de ferro com diferentes basicidades e teores de MgO**. 2003. 253 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais), REDEMAT – Ouro Preto, 2003.

FURMANSKI, L. M. **Estudo e utilização da carepa de laminação de aço em processo de obtenção de sulfeto ferroso**. 115p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2016.

GEERDES, M. et al.; Livro: **Práticas Modernas para Operação de Alto-Fornos**. Coordenação da edição Brasileira. p. 17- 28, 2007.

GEERDES, M., TOXOPEUS, H., VLIET, C. V. D. **Modern blast furnace ironmaking - an introduction**. New York: Ijmuiden, 2004.

GENTILE, E. F. et al. **Siderurgia para não siderurgistas**, São Paulo, ABM, p.310, 2002.

HINKLEY, J. et al.; **An Investigation of Pre-ignition Air Flow in Ferrous Sintering**. International Journal of Mineral Processing. Australia, v 42, p. 37-52, 1994.

HONORATO, E. P. **Adequação granulométrica das matérias primas e do sistema de segregação contínua (I.S.F), para melhorias na produtividade e qualidade do sínter para os Altos-Fornos**. 154 f. 2005. Dissertação (Mestrado) – UFMG/ Belo Horizonte, 2005.

IBS. **Anuário Estatístico 2008**. Instituto Brasileiro de Siderurgia, Rio de Janeiro, 2008a.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Estatística preliminar 2019**, n. 052. Disponível em: http://www.acobrasil.org.br/site/arquivos/estatisticas/Preliminar_Agosto_2019_99679_8864.pdf. Acesso em 30 de novembro de 2019.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório de sustentabilidade 2018**. Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/sustentabilidade/assets/pdfs/A%C3%A7o%20Brasil%20%C2%BB%20Completo.pdf>. Acesso em 30 de novembro de 2019

ISHIKAWA, Y. **Recent progress in the sintering technology – high reducibility and improvement of fuel consumption**. Ironmaking Conference Proceedings, **AIME**, Pittsburgh, EUA, v. 41, p. 80-89, 1982.

JANUZZI, A. **Análise da aglomeração a frio no processo HPS (Hybrid Pelletized Sínter) com ênfase nas matérias-primas envolvidas**. 145f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - UFMG/ Belo Horizonte, 2008.

KESTENBACH, H.J.; BOTA FILHO, W.J. **Microscopia eletrônica transmissão e varredura**. São Paulo: ABM, 1994.

KÖPERN – Briquetting with roller presses (Prospecto). Specialists in Hot and Cold Briquetting. Germany. p. 24, 2017.

LAURENTINO, C. L. **Transferência de calor em leitos fixos com aplicação em reatores de fermentação em estado sólido**. 103 f. (Dissertação), UNESP, 2007.

LE MOS, L. R.. **Produção de briquetes de resíduos siderúrgicos para utilização em altos-fornos**. Belo Horizonte: UFMG: 2015.

LOBATO, N. C. C.. **Gerenciamento de resíduos sólidos da indústria siderúrgica**. Belo Horizonte: Dissertação de mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas a Universidade Federal de Minas Gerais, 2015.

LOPES, M. V. **Caracterização do sínter para uso em altos-fornos a carvão vegetal**. 2012. 80 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais, Itajubá, 2012, p. 14-25.

LOVEL, R. **The influence of fuel reactivity on iron ore sinter**. Isij International. Japan, v. 49, n. 2, p. 195-202, 2009.

LU, L; HOLMES, R.J; MANUEL, J.R. **Effects of alumina on sintering performance of hematite iron ores**. Isij International, Japan, v. 47, n 3, p. 349-358, 2007.

MACHADO, M. L. P. **Apostila de siderurgia - da matéria prima ao aço laminado**. Vitória: CEFETES, 2006.

MAGALHÃES, M. S., BRANDÃO, P. R. G., TAVARES, R. P. **“Types of goethite from Quadrilátero Ferrífero's iron ores and their implications in the sintering process”**. Mineral Processing and Extractive Metallurgy: UFMG, 2007.

MARTINS, F. M. **Caracterização química e mineralógica de resíduos sólidos industriais minerais do estado do Paraná**. 2006. 140 f. Dissertação (Pós-Graduação em Química). Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

MARTINS, M.F.; SALVADOR, S.; THOVERT, J.F., DEBENEST, G. **Co-current combustion of oil shale – Parte 2: structure of the combustion front**. France: Université de Toulouse, 2010.

MOLIN, 2010 apud MANTOVANI, F.; ERHART, R. L.; KULAKOWSKI, M. P. **Estudo para pigmentação em matriz cimentícia: métodos de caracterização e análise de coprodutos da fabricação de aço (carepa de aço, pó de aciaria e lodo de fosfatização)**. In: Anais do 2º Seminário Nacional de Construções Sustentáveis – SNCS. Passo Fundo/RS: NEPES/IMED, 2013. 10 p.

MONHOL, F. A. F.; MARTINS, M. F. **“Cocurrent Combustion of Human Feces and Polyethylene Waste”**. Waste and Biomass Valorization, Suíça, v. 6, n. 3, p. 425–432, 2015.

MOTA, A. C. F. V. **“Pólos Minero-siderúrgicos no Brasil: A contribuição da avaliação ambiental estratégica no caso de Corumbá”**, p. 149, Dissertação (Mestrado), UFRJ/ COPPE/ Programa de Planejamento Energético, Rio de Janeiro, 2009.

MOURÃO, J. M. **Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico: 2008-2025**. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2008. 50 p. [Nota técnica].

MOURÃO, M.B. **Introdução à siderurgia**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2007, 428 p.

MUKHERJEE, T. **Structure of fluxed sinter**. Iron and steel making, London, England, v. 12, no. 4, p. 15,11,55, 1985.

MUKHERJEE, T; DE, A; GUPTA, S.S.; CHATTERJEE, A. **Possibility of Dunite Usage in Sintermaking: studies at Tata Steel**. Ironmaking and Steelmaking, London, England, v. 22, n. 1, 1995.

NAGATANI, T. et al.; **Development of an ultra high resolution scanning electron microscope by means of a field emission source and inlens system**. Scanning Microsc, USA, v.11, p. 901-909, 1987.

NAJAR, F.J; SANTOS, J.F. **Curso de Sinterização**. Ipatinga: USIMINAS, 1981. p. 32-66,

NASCIMENTO FILHO, V. F., **Técnicas analíticas nucleares de fluorescência de raios X por dispersão de energia (ED-XRF) e por reflexão total (TXRF)**. São Paulo: Departamento de Ciências Exatas, 1999.

NATAL, L. F. G; PEREZ, F. A; SILVA, M. H. R. T; SILVA, A. L; SERRA, A. R. **Utilização de olivina como fundente na sinterização da Cosipa**. Seminário de Redução de Matérias Primas Siderúrgicas, São Paulo , 1995, p. 185-197.

OLIVEIRA, L. G.; LIMA, W. C. P. B.; LIMA, A. G. B. **Transporte de calor em regime permanente em um reator cilíndrico circular de leito fixo: um estudo experimental**. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, Paraíba v.6. n. 1, p. 48-

58, 2011.

OLIVEIRA, S.S. **Estudo preliminar do uso de finos de topo na formulação de sínter para alto forno.** Marabá: Universidade Federal do Pará, 2009, p. 39.

OOI, T. C. **The effect the charcoal combustion on iron-ore sintering performance and emission of persistent organic pollutants.** Combustion and Flame, Australia, n 158, p. 979-987, 2011.

OYAMA, N.; SATO, H.; TAKEDA, T. **Development of Coating Granulation Sintering Process for Improving Productivity and Reducibility.** Isij International. Japan, v. 45, n. 6, p. 817-826, 2005.

PADULA, V. P. **Caracterização tecnologica de um siter feed hemtitico contend diferentes proporções e tipos de silica nas frações aderentes, intermediarias e nucleantes.** 2009, p. 93, Dissertação (Mestrado), Escola Minas, Universidade de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

PEREIRA, F. M.; VERNEY, J. C. K. de; LENZ, D.M. **Avaliação do emprego de carepa de aço como agregado miúdo em concreto.** Metalurgia e Materiais, v. 64, n. 4, p. 463-469, 2011.

PIETSCH, W. **An Interdisciplinary Approach to Size Enlargement by Agglomeration.** Powder Technology, USA, v.130, p. 8-13, 2003.

QUARESMA, D. S. **Estudo da Sinterização em Reator Vertical de Leito Fixo: Desenvolvimento de Processo para Produção de Agregado Sintético a Partir de Cinza Volante e Biomassa.** Tese de Doutorado – PRODERNA. Universidade Federal do Pará, 2016, p. 159.

ROCHA, S. H. F. S. **Agglomeration of Steelmaking Residues and the Implication of its Use in Blast Furnace and Direct Reduction Processes.** International Steel Conference on new Developments in Metallurgical Process Technologies, Düsseldorf, 2007, p. 1010-1017.

RYU, C., Y. B. YANG, A. KHOR, N. E. YATES, V. N. SHARIFI, and SWITENBANK, J.. **"Effect of fuel properties on biomass combustion: Part I. Experiments—fuel type, equivalence ratio and particle size."** Fuel 85, no. 7-8 (May 2006): 1039-1046.

SANTOS, M. M.. **“Reflexões sobre a crise no setor siderúrgico do distrito industrial de marabá e as estratégias empresariais”** Revista confronteiras, v. 1, 2017.

SANTOS, M. M.. **A crise no setor siderúrgico do Distrito Industrial de Marabá e as estratégias empresariais.** 158 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Dinâmicas Territoriais e Sociedade na Amazônia, Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Pará, 2015.

SHATOKHA, V. I.; GOGENKO, O. O.; KRIPAK, M. **Utilising of the oiled rolling mills scale in iron ore sintering process.** Resources, Conservation and Recycling, v. 55, p. 435–440, 2011.

SILVA, A. C. **Simulação computacional da redução direta de minério de ferro em fornos MIDREX**. 158 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

SILVA, J. N. S.. **Siderurgia**. Belém do Pará: e-TEC Brasil - Escola Técnica Aberta do Brasil, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, 2011.

STARLING, A. R. D. A. R. **Avaliação de metodologias de simulação física**. 162 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2012.

SUGAWARA, K. **Influência da granulometria do coque na sinterização** – Informação Técnica do Plano de Assistência Técnica N.S.C para Usiminas, Minas Gerais, 1981.

TAKANO, C. **Estudo da influência de alguns combustíveis na sinterização de minério de ferro**. 1970. 110 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1970.

TAKEHARA, L. **Caracterização geometalúrgica dos principais minérios de ferro brasileiros – fração sinter feed**. 2004. 156 f. Tese (Doutorado em Geociência) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre 2004.

TELLES, V.B. **Estudo da influencia da sinterização de minérios de ferro na redução por hidrogênio**. 2015. 126 f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

THOMÉO, J. C., **Transferência de Calor em Leito Fixo: O Modelo a Dois Parâmetros Tradicional Revisitado**. Tese de Doutorado, PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, Brasil, 146p. 1995.

UMADEVI, T; DEODHAR, A. V; KUMAR, S; GURURAJ, P. C. S; RANJAN, M. **Influence of coke breeze particle size on quality of sinter**. Ironmaking and Steelmaking, London, England, v. 35, n. 8, p. 567-574, 2008.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Escola politécnica da Universidade de São Paulo. **Processos de aglomeração de minérios**. São Paulo, 2013.

VIEIRA, C.B; ROSIERE, C.A; PENA, E.Q; SESHADRI, V; ASSIS, P.S. Avaliação técnica de minérios de ferro para sinterizações nas siderúrgicas e minerações brasileiras: uma análise crítica. **REM**, Ouro Preto, v. 56, n. 2, p. 97- 102, 2003.

WANG, J. H., CHAO, C. Y. H. and KONG, W.. **"Experimental study and asymptotic analysis of horizontally forced forward smoldering combustion."** Combustion and Flame 135, no. 4 (December 2003): 405-419.