



REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP – UEMG



Dissertação de Mestrado

"Caracterização Tecnológica de Misturas de *"Sinter-feed"* e *"Pellet-feed"* Empregando Diferentes Rotas de Sinterização em Escala Piloto"



Autor: Fernando Luiz Câmara Campos Junior
Orientador: Prof. Dr. Paulo Santos Assis

Março de 2018



REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP – UEMG

Fernando Luiz Câmara Campos Junior

"Caracterização Tecnológica de Misturas de “Sinter-feed” e de “Pellet-feed” Empregando Diferentes Rotas de Sinterização em Escala Piloto"

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

Área de concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Paulo Santos Assis

Ouro Preto, março de 2018

C1986 Campos Júnior, Fernando Luiz Câmara .
Caracterização Tecnológica de Misturas de ?Sinter-feed? e de ?Pellet-feed?
Empregando Diferentes Rotas de Sinterização em Escala Piloto [manuscrito] /
Fernando Luiz Câmara Campos Junior. – 2018.
103f.:

Orientador: Prof. Dr. Paulo Santos Assis

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto. Pró-Reitora de
Pesquisa e Pós-Graduação. REDEMAT. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Materiais.
Área de Concentração: Processos de Fabricação.

1. Minério de ferro. 2. Sinterização Piloto. 3. Sinter-feed. 4. Pellet Feed. I.
Assis, Paulo Santos. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 62-5



**REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS
UFOP - UEMG**

Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Doutorado, Mestrado e Especialização



**"Caracterização Tecnológica de Misturas de "Sinter-feed" e
de "Pellet-feed" Empregando Diferentes Rotas de
Sinterização em Escala Piloto"**

Autor: Fernando Luiz Câmara Campos Júnior

Dissertação defendida e aprovada, em 27 de março de 2018, pela banca
examinadora constituída pelos professores:

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

Prof. Mauricio Covcevic Bagatini (Doutor)
Universidade Federal de Minas Gerais

Eng. Flávio de Castro Dutra (Doutor)
Vale

Prof. Claudio Batista Vieira (Doutor)
Universidade Federal de Ouro Preto

Agradecimentos

Agradeço a Deus pelo dom da Vida e do Conhecimento.

Agradeço aos meus Pais, Fernando Luiz Câmara Campos e Maria Zélia Lopes Campos por ser o exemplo de vida, integridade e por me apoiar sempre em tudo que fiz na minha vida até hoje.

Agradeço a minha amada Família, Beatriz Dornelas Barbosa Campos, minha esposa e as melhores partes de nós dois, Daniel Dornelas Barbosa Campos e Vinícius Dornelas Barbosa Campos, por ser a fonte de energia inesgotável para eu superar todos os dias os desafios que aparecem em minha vida. Por entender as minhas ausências, os meus destemperos e por sempre estar por perto quando eu preciso.

Agradeço aos meus familiares pelo apoio, aqui cito uma pessoa, sem medo de cometer falha ou injustiça, por tudo que ela representa na minha vida acadêmica, obrigado Tia Toninha por tudo!

Agradeço ao Professor Dr. Paulo Santos Assis, por todo apoio e orientação no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a REDEMAT pela extensão do ensino de qualidade que recebi da Universidade Federal de Ouro Preto/Escola de Minas.

Um agradecimento especial aos Amigos e Mestres Egídio de Pádua Gondim (Gerdau Açominas) e Edson Harano do Nascimento *in memoriam* (ArcelorMittal Tubarão), pelos muitos momentos de transferência de conhecimento, trocas de experiência e informações técnicas e claro, bons momentos de descontração. Saiba Harano que os seus e-mails com as piadas fazem muita falta, pois elas aliviavam um pouco do stress e pressão do dia a dia. Amigos, eu não seria metade do profissional que sou hoje se não fosse vocês, todo o conhecimento que tenho de sinterização de minério de ferro, devo a vocês.

A outra metade do profissional que sou hoje devo também a duas grandes personalidades do Universo da Pelotização, agradeço aos amigos Washington Mafra e Marcus Emrich, pelos muitos momentos de transferência de conhecimento, trocas de experiência e informações técnicas e claro, bons momentos de descontração. Mesmo após a minha ida para o Departamento de Pelotização da Vale, vocês continuaram e continuam sendo minha referência técnica. Foram bons momentos no CTF e eu agradeço por tudo.

Agradeço a Paul Wurth por acreditar nesta ideia e por me conceder a oportunidade de desenvolvê-la.

Um agradecimento especial aos amigos André Oliveira, Helênio Silva, Victor Oliveira e Gustavo Pereira da Paul Wurth do Brasil, amigos de profissão, pelas constantes trocas técnicas e boas discussões sobre a nossa amada área de redução.

Outro agradecimento especial ao amigo Georg Strüber da Paul Wurth Luxemburgo, pelas excelentes, calorosas e frutíferas discussões que tivemos sobre este trabalho, você faz parte de tudo que se fez deste trabalho, da concepção da configuração atual, da defesa junto ao conselho de P&D da Paul Wurth a agora do resultado final.

A empresa Ical Indústria de Calcinação, na pessoa do José Roberto Moreno Wardi que gentilmente doou as amostras de cal e calcário dolomito para realização dos testes.

A Vale, especialmente ao Departamento de Pelotização, nas pessoas do Luiz Torres Dantas, Virgínio Xavier, Misael Soza e Benito Souza, pela constante troca técnica e principalmente por terem doado gentilmente as amostras de calcário calcítico, bentonita, e antracito para realização dos testes.

A Vale, especialmente ao Centro de Tecnologia de Ferrosos, nas pessoas do Hamilton Porto Pimenta e Delciane Porfiro por terem viabilizado e disponibilizado as mostras de *pellet feed* e *sinter feed* para realização dos testes.

Agradeço aos membros da Banca Examinadora pelas excelentes discussões e contribuições para formatação do texto final da minha dissertação, em especial ao Dr. Flávio Dutra por ter ajudado de forma expressiva e sem poupar esforços e tempo de sua rotina para a revisão final e comentários do texto.

E para finalizar, mas sem desmerecer a importância de vocês neste trabalho, faço um agradecimento especial ao Alei Domingues, Fagner Soares, Everton Rocha, Claudionor Antônio, Carlos Valente, Maximiliano Silva e Arlindo Maciel da Planta Piloto de Sinterização e Pelotização do Cento de Tecnologia de Ferrosos da Vale. Meu muito obrigado! Sem o empenho e dedicação de vocês, este trabalho não seria possível.

Sumário

Resumo.....	VIII
Abstract.....	X
1 Introdução.....	1
2 Objetivo.....	5
3 Revisão Bibliográfica.....	6
3.1 Minério de Ferro	6
3.2 Sinterização de Minério de Ferro	10
3.3 Influências do Tamanho de Partícula no Processo de Preparação da Mistura	13
3.4 Influência da Água no Processo de Preparação da Mistura	16
3.5 Efeito da Dosagem de Aglomerantes no Processo de Preparação da Mistura	18
3.6 Efeito da Tecnologia no Processo de Preparação da Mistura	19
3.6.1 Nodulizador	21
3.6.2 Misturadores Intensivos	23
3.6.3 Processo HPS	24
4 Parte Experimental.....	27
4.1 Caracterizações das Matérias-Primas	29
4.2 Principais equipamentos de simulação – Descritivo geral	30
4.3 Procedimentos de Simulação Piloto – Avaliação de Desempenho de Aglomeração a Frio	34
4.4 Planejamento de Experimentos	37
4.5 Avaliação de Desempenho a Frio e Determinação de Umidade Ótima	39
4.5.1 Procedimento de Determinação do JPU	39
4.5.2 Procedimento de Análise Microscópica da Quase Partícula	40
4.5.3 Procedimento de Determinação de Umidade Ótima	41
5 Resultados e Discussão.....	44
5.1 Avaliação de Desempenho a Frio e Determinação de Umidade Ótima	45
5.2 Avaliação de Desempenho a Quente	67
6 Conclusões.....	81
7 Relevância dos Resultados Obtidos.....	82
8 Sugestões para Trabalhos Futuros.....	83
9 Referências Bibliográficas.....	84

Lista de Figuras

Figura 3.1: Evolução das jazidas de minério de ferro do quadrilátero ferrífero.	8
Figura 3.2: Esquema de troca de calor e segmentação dos acontecimentos e reações de sinterização.	11
Figura 3.3: Distribuição granulométrica ideal de um <i>sinter feed</i>	14
Figura 3.4: Descrição do tipos e tamanhos das partículas de <i>sinter feed</i>	14
Figura 3.5: Permeâmetro.	15
Figura 3.6: Efeito da umidade na permeabilidade de misturas.	16
Figura 3.7: Estados do Sistema água-partícula.	17
Figura 3.8: Influência da cal fina na permeabilidade e a eliminação dos finos da mistura.	19
Figura 3.9: Layout típico de uma sinterização convencional.	20
Figura 3.10: Característica típica de um misturador.	21
Figura 3.11: Ferramentas internas de um nodulizador tambor.	22
Figura 3.12: Layout típico de uma sinterização que possui misturador e nodulizador em série.	22
Figura 3.13: Tipos básicos de misturadores intensivos horizontais.	23
Figura 3.14: Tipos básicos de misturadores intensivos verticais.	24
Figura 3.15: Estrutura da pseudopartícula.	26
Figura 4.1: Simulador – Misturador e Nodulizador Tambor.	31
Figura 4.2: Simulador – Misturador e Nodulizador Intensivo Vertical.	31
Figura 4.3: Simulador – Disco pelletizador.	32
Figura 4.4: Simulador – Misturador e Nodulizador Intensivo Horizontal.	33
Figura 4.5: (A) Sistema Supervisório e (B) Planta Piloto.	34
Figura 4.6: Fluxo de simulação do processo HPS.	35
Figura 4.7: Fluxo de simulação do processo PWT.	36
Figura 4.8: Fluxo de simulação do processo ALT.	36
Figura 4.9: (1) Partícula ideal e (2) caso exemplo CTF.	40
Figura 5.1: Desempenho de aglomeração a frio da rota HPS.	47
Figura 5.2: Correlação entre a relação nucleante/aderente e o JPU.	49
Figura 5.3: Desempenho a frio da rota HPS e Variações.	50
Figura 5.4: Simulações - (1) rota HPS com misturador tambor e (2) rota HPS com MIH.	50
Figura 5.5: Registro de imagens do produto das simulações da rota HPS e variações.	52

Figura 5.6: Desempenho de aglomeração a frio da rota PWT.	56
Figura 5.7: Distribuição de partículas das misturas simuladas na rota PWT.	57
Figura 5.8: Desempenho a frio da rota PWT e variações.	58
Figura 5.9: Registro de imagens do produto das simulações da rota PWT e variações.	60
Figura 5.10: Aspecto do material preparado pela rota ALT após etapa de nodulização.	61
Figura 5.11: Desempenho a frio da rota ALT e variações.	62
Figura 5.12: Registro de imagens do produto das simulações da rota ALT e variações.	63
Figura 5.13: Evolução do desgaste das ferramentas do MIH.	64
Figura 5.14: Análise microscópica – rota HPS.	65
Figura 5.15: Análise microscópica – rota PWT 40% de finos.	66
Figura 5.16: Análise microscópica – rota PWT 60% de finos.	66
Figura 5.17: Análise microscópica – rota PWT 80% de finos.	67
Figura 5.18: Queima HPS com 80% de finos.	68
Figura 5.19: Queima PWT com 80% de finos.	72
Figura 5.20: Perfil de vazão durante o processo de queima.	73
Figura 5.21: Tempo de sinterização das condições simuladas.	74
Figura 5.22: Perfil de temperatura durante o processo de queima.	75
Figura 5.23: Correlação entre o volume de escória do sínter e a resistência mecânica.	76
Figura 5.24: Imagens de cada mistura após etapa de preparação.	77
Figura 5.25: Sínters produzidos	79

Lista de Tabelas

Tabela 1.1: Dados gerais – Plantas de Sinterização Nacionais - 2016.....	3
Tabela 3.1: Novos Projetos de produção de Minério de Ferro, investimento e capacidades.....	8
Tabela 3.2: Carga típica dos Altos-Fornos.....	26
Tabela 4.1: Planejamento de Experimentos.....	38
Tabela 5.1: Qualidade química das matérias-primas utilizadas para composição das misturas (%).....	44
Tabela 5.2: Análise imediata/química dos combustíveis sólidos (%).....	44
Tabela 5.3:Distribuição granulométrica.....	45
Tabela 5.4: Partição em massa (%) de cada componente da mistura – referência: base seca..	46
Tabela 5.5: Qualidade química dos sínters das condições simuladas na rota HPS (%).....	46
Tabela 5.6: Resultados de desempenho a frio tecnologia HPS.....	47
Tabela 5.7: Distribuição granulométrica das misturas antes de serem submetidas a rota HPS.	48
Tabela 5.8: Umidade Ótima da rota HPS e Variações.....	51
Tabela 5.9: Partição em massa (%) de cada componente da mistura – referência: base seca – PWT e ALT.....	53
Tabela 5.10: Qualidade química dos sínters das condições simuladas nas rotas PWT e ALT (%).....	53
Tabela 5.11: Resultados de desempenho a frio tecnologia PWT.....	54
Tabela 5.12: Resultados de desempenho a frio tecnologia PWT.....	56
Tabela 5.13: Umidade Ótima da rota PWT e Variações.....	58
Tabela 5.14: Resultados de desempenho a frio tecnologia ALT.....	61
Tabela 5.15: Resultados das queimas normais rota HPS.....	69
Tabela 5.16: Resultados das queimas normais rota PW – M40F – cal2,5.....	70
Tabela 5.17: Resultados das queimas normais rota PW – M60F – cal3,0.....	70
Tabela 5.18: Resultados das queimas normais rota PW – M80F – cal3,0.....	71
Tabela 5.19: Qualidade química dos sínters produzidos.....	71
Tabela 5.20: Qualidade metalúrgica dos sínters produzidos.....	78
Tabela 5.21: Distribuição granulométrica dos sínteres produzidos.....	79

Lista de Abreviaturas e Siglas

ALT - Alternativa

ASTM- *American Society for Testing and Materials*

B₂ - Basicidade Binária (%CaO/%SiO₂)

C.E.C - Consumo Específico de Combustível

Calcário cal. - Calcário calcítico

Calcário dol. - Calcário dolomítico

CSN - Companhia Siderúrgica Nacional

CTF - Centro de Tecnologia de Ferrosos

DIS – Disco Pelotizador

Fe_t - Ferro Total

HPS - *Hybrid Pelletized Sinter*

ISO - *International Organization for Standardization*

JFE - *Jeiefuī Hōrudingusu Kabushiki-gaisha*

JIS - *Japanese Industrial Standards*

JPU - *Japanese Permeability Unit*

MIH – Misturador Intensivo Horizontal

Mist. e Nod. Tambor- Misturador e Nodulizador Tambor

MIT - Misturador Tambor

MIV - Misturador Intensivo Vertical

MP - Mistura Parcial

MPS - *Mixing Pelletized Sinter*

MT - Misturador Tambor

N/A - Relação Nucleante (<6,35mm;>1,00mm) e Aderente (<0,150mm)

NIH - Nodulizador Intensivo Horizontal

NIV - Nodulizador Intensivo Vertical

NOT- Nodulizador Tambor

NT- Nodulizador Tambor

PPC - Perda Por Calcinação

PWT- *Paul Wurth Technology*

r - Coeficiente de Correlação de Pearson

RDI - *Reduction Degradation Index*

RSD - *Rotary Sample Divider*

TKCSA - ThyssenKrupp Companhia Siderúrgica do Atlântico

TM - Tamanho Médio

UNEP - Unidade de Ensino e Pesquisa Integrada

VE - Volume de escória

Resumo

Com a corrente transição dos depósitos minerais de ferro de hematíticos para itabiríticos e goethíticos no quadrilátero ferrífero, o *split* de produtos do beneficiamento de jazidas vem se alterando. As participações de minérios granulados e *sinter feed* vem se reduzindo com passar do tempo com o proporcional aumento da geração de *pellet feed*. Este fato se deve principalmente a característica friável dos minérios itabiríticos como também a necessidade de maior cominuição do minério. A cominuição é necessária para aumentar o grau de liberação e por consequência a recuperação metálica em processos de concentração.

Os *sinter feeds* que são gerados atualmente apresentam os teores de SiO_2 , Al_2O_3 e P mais elevados. Tem sido prática das mineradoras aumentar a participação de *pellet feed* blendados com *sinter feeds* para adequação da qualidade química. Com esta ação, o aumento de finos na mistura de minérios é inevitável e por consequência, a etapa de aglomeração a frio do processo de sinterização passa a ser mais exigida para manutenção dos níveis de produtividade e qualidade do síter. Logo, a siderurgia nacional necessita de soluções que possibilitem a manutenção de performance e qualidade do síter em mistura com elevadas participações de finos, pois na grande maioria das siderúrgicas integradas, o síter ainda é a principal carga metálica utilizada. Uma mudança drástica deste cenário implicaria na obsolescência da maioria das sinterizações, por ainda não estar apropriada a manusear grandes quantidades de *pellet feed* na mistura de minérios.

O objetivo do presente estudo foi desenvolver uma rota tecnológica conceitual, considerando concepções operacionais, layouts e tecnologias de mistura e nodulização que propiciassem a utilização de finos ($\% < 0,150\text{mm}$) na mistura de minérios em patamares acima dos 40%, consolidados industrialmente pela tecnologia HPS.

Para a avaliação e verificação das hipóteses consideradas durante o desenvolvimento do estudo, uma série de experimentos em escala piloto foram realizadas, simulando principalmente a etapa de preparação do processo de sinterização (homogeneização e granulação). Os melhores resultados destas simulações foram submetidos a avaliações a quente utilizando o *pot grate* para verificação dos impactos operacionais, possíveis dificuldades de processo, produtividade e qualidade do síter produzido, comparando os resultados obtidos com os resultados referentes da tecnologia HPS, referência deste estudo.

Dentre as possibilidades avaliadas, a rota utilizando disco (trabalhando em paralelo com o misturador e nodulizador tambor) atingiu 60% de participação de finos na mistura de minérios, com condições satisfatórias de processo e produtividade. Os resultados obtidos, considerando 80% de finos, ainda carece de ajustes, pois apresentou grande instabilidade do processo, principalmente em relação à qualidade física do sinter produzido.

Abstract

With current mineral deposit change of hematite to itabirite and goethite in the Iron Ore Quadrangle, the split of beneficiation products have been change over the time. The participation of lump ore and sinter feed has reducing with proportional increasing of pellet feed generation.

This fact whether mainly because of crumbly characteristic of the itabirite iron ores as well the need of further comminution of the ore to increase of release degree and consequently the metallic recovery.

The quality of the sinter feed that are still generated no shows quality as in the past, mainly SiO_2 content, Al_2O_3 and P is much higher and has been practiced of Mines increasing the pellet to participation of pellet feed for performing chemical sinter feed correction currently produced.

With this action, the fines increase in the iron ore mix is inevitable and by consequence, the agglomeration step of sintering process it becomes more required to maintain the productivity level and quality of sinter that feed the reactors.

Therefore, the national steel industry urgently needs of one solution that gives the possibility to increase considerable the fines participation in the ore mix without impacts in the productivity level and quality of sinter. At the national steel industry, the sinter is the main metallic burden used and a drastic change in this scenario will result in the obsolescence of the most sintering plants of the national steel industry, for not being suitable to handle large proportions of pellet feed(fines) in the ore mix.

The purpose of this study was to develop a technological concept of a route, considering the operational possibilities, layouts and mix and nodulizing that would result in the fines usage higher than 40% as was industrial consolidated by HPS technology.

To evaluate and certificate the considered hypothesis during the study development, a series of simulations were performed, simulating mainly the mix preparation step (homogenization and nodulation) were done together with the cold permeability evaluation on the bed resulted of the preparation step. The best results of these simulations were submitted to the sinter pot

grate evaluation to verify the operational impacts, some process problems, productivity and quality of the sinter produced, comparing the obtained results with the HPS references.

Among the possibilities evaluated, the route using the disk working in parallel with the mixer and drum nodulizer reached a 60% share of fines in the ore mixture, with satisfactory conditions of process and productivity. The results obtained considering 80% of fines still lack adjustments, since it presented instability of the process, mainly in relation to the physical quality of the sinter produced.

Therefore, exceeding 40% of fines in the ore mixture was possible, with beneficial results, mainly the chemical quality of the sinter. In order to obtain values higher than 60%, it is necessary to optimize the fuel dosage and the effect of the form factor (spherical particles) on the matrix consolidation process and on the influence of these conditions, mainly the physical quality of the sinter produced.

1 Introdução

O processo de beneficiamento do minério de ferro gera três tipos de materiais. Estes são classificados pela sua distribuição granulométrica, tais como:

- Granulados, com partículas entre 37,5mm e 6,35mm;
- *Sinter feed*, com partículas entre 6,35mm e 0,150mm;
- *Pellet feed*, com partículas <0,150mm;

No processo produtivo de ferro-gusa, através de reatores de redução como o Alto-Forno, somente o granulado pode ser utilizado diretamente sem causar danos e complicações ao processo, pois nestes reatores o agente redutor, na forma gasosa, trabalha em contra fluxo com carga.

Produtos com distribuição granulométrica como o *sinter feed* e *pellet feed* prejudicam o processo de “percolação” do agente redutor e não podem ser utilizados sem um processo prévio de adequação da sua granulometria.

Com a própria evolução do processo de beneficiamento mineral, verificando-se que o material <6,35mm, depositado anteriormente como rejeito, apresentava características químicas semelhantes ao granulado, e que com adequação de sua granulometria, poderia ser utilizado como fonte de Fe_t no processo de produção de ferro-gusa/aço, foram desenvolvidas tecnologias para fazer esta adequação.

O processo de sinterização e pelotização foram desenvolvidos para adequar a granulometria dos dois produtos da etapa de beneficiamento, o *sinter feed* e o *pellet feed* respectivamente.

De acordo com WIKIPEDIA^[1], o processo de sinterização com aplicação na siderurgia foi desenvolvido por Arthur Smith Dwight e Richard Lewis Lloyd em 1906, ainda com aplicações para minério de cobre. Neste ano os dois inventores fundaram a “*Dwight Lloyd Metallurgical Company*” em Nova York.

A primeira planta de sinterização de minério de ferro data de 1910 e foi fabricada nos Estados Unidos. De acordo com WIKIPEDIA^[1] em 1917 a empresa de engenharia alemã Lurgi

adquiriu os direitos de engenharia e fabricação desenvolvendo o primeiro projeto alemão em Bochum.

Segundo CAMPOS e FONSECA^[2], O processo de pelletização foi desenvolvido na Alemanha após a primeira guerra mundial em 1926 e ganhou grande utilização a partir de 1940, à medida que ocorria o desenvolvimento tecnológico da mineração, onde o processo de pelletização passou a ter um papel importante na rota de produção de aço, principalmente pelo potencial de agregar valor às reservas minerais menos compactas e mais friáveis (que geravam menos granulado e *sinter feed*, pela sua característica).

As reservas minerais de ferro vêm se modificando, principalmente as reservas nacionais do Quadrilátero Ferrífero, que eram predominantemente de minérios hematíticos para frentes de minérios itabiríticos e goethíticos. Esta modificação tem impactos significativos nas características dos produtos resultantes do beneficiamento mineral, a saber:

- Redução significativa de geração de granulados;
- Aumento, por consequência, da geração de *sinter feed* e *pellet feed* devido ao maior grau de liberação necessário para manutenção do teor de Fe_t e aumento da recuperação metálica nos processos de concentração;
- Redução do teor de Fe_t do *sinter feed* pela natureza da reserva mineral.

Este último será o foco do presente trabalho, pois a prática atual das empresas de mineração é aumentar a participação de *pellet feed* natural no *sinter feed*, visando à manutenção ou menor redução possível no teor de Fe_t deste produto. Esta prática tem um efeito negativo para o processo de sinterização, pois a incorporação de *pellet feed* ao *sinter feed*, para obter um teor de Fe_t total mais elevado afeta o comportamento deste material no processo de sinterização convencional. O parque siderúrgico nacional/mundial vem trabalhando para se adequar a esta situação e equipamentos que capacitam o sistema a manusear uma quantidade maior do que a usual (13% <0,150mm) já estão sendo instalados em plantas existentes para evitar perdas de produção e problemas operacionais relativos a este afinamento.

A Tabela 1.1 a seguir apresenta um panorama geral das plantas de sinterização em operação mostrando os dados de produtividades praticados em 2016, tecnologia de preparação de

mistura e percentual estimado de finos na mistura de minério. Importante salientar que os dados apresentados foram obtidos através de contatos informais com os especialistas das plantas citadas, sendo necessário entender que até mesmo por questões estratégicas e particulares de cada empresa, os dados podem apresentar variações entre a realidade praticada e corrente.

Tabela 1.1: Dados gerais – Plantas de Sinterização Nacionais - 2016

Empresa	Tecnologia de Preparação	%< 0,150mm	Produtividade Média (t/m².dia)
ArcelorMittal Molevade	HPS	30 – 35	40,0
ArcelorMittal Tubarão	Mist. e Nod. Tambor	20 – 25	32,0
CSN	MIH e Nod. Tambor	15 – 20	31,0
CSP	Mist. e Nod. Tambor	20 – 30	30,0
Gerdau Açominas I	HPS	35 – 38	33,0
Gerdau Açominas II	Mist. e Nod. Tambor	35 – 38	35,0
TKCSA*	MIV e NIV	20 – 25	25,0
Usiminas	Mist./ HIM e Nod. Tambor	15 – 20	33,5

** A planta se encontra reduzida devido à baixa demanda de sinter, restringida pela qualidade química.*

Tecnologias como o HPS, MPS, misturadores intensivos horizontais e verticais e nodulizadores intensivos horizontais e verticais vem sendo utilizados para propiciar o uso de *pellet feed* no processo de sinterização, sendo que algumas destas tecnologias permitem o uso de até 40% de material <0,150mm com manutenções dos níveis de produtividade e características metalúrgicas do sinter produzido.

Pela diversidade dos layouts das principais plantas de sinterização do Brasil, nota-se que já existe certa preocupação com o tema, e também as plantas já trabalham, em alguns casos,

acima dos 13% de material passante em 0,150mm, sendo este nível referência do *sinter feed* natural em tempos passados.

Por referências e dados técnicos, sabe-se que considerando um processo convencional de sinterização (misturador tambor e nodulizador tambor), acima de 15% de material passante 0,150mm, a performance de aglomeração pode-se ser afetada e otimizações são necessárias.

Elevação de dosagem do aglomerante e ajuste no nível de umidade são oportunidades já experimentadas e consolidadas como otimização possível, mas nada que resulte em mudança de patamar operacional ou recuperação da produtividade do sistema.

As plantas nacionais, não estão preparadas para absorverem altas participações de finos na mistura de minérios e algumas já operam próximo à condição tomada como *benchmark* (40% de finos). De acordo com informações dos profissionais da mineração nacional, essa condição pode piorar ainda mais em 2021, chegando ao ponto da onde seriam necessários à utilização da ordem de valores maiores do que 70% de *pellet feed* para tornar a produção de sínter tecnicamente viável do ponto de vista de composição química.

O constante afinamento dos *sinter feeds* tem um grande impacto na condição operacional das plantas de sinterização convencionais, pois a redução do tamanho médio, consequência do afinamento, resulta em um maior empacotamento do leito de sinterização reduzindo a permeabilidade do leito. Com a redução da permeabilidade, a frente de queima, gerada pelo processo de ignição superficial do leito tende a avançar em direção ao fundo dos carros com uma menor velocidade, sendo necessária a redução da velocidade de avanço da máquina, impactando diretamente a produtividade do processo. Outro impacto negativo do afinamento dos *sinter feeds* é na intensidade de queima e qualidade final do sínter produzido. A baixa permeabilidade pode resultar em apagamento da frente de queima, em alguns casos e isso resulta em aumento da geração de retorno e redução do rendimento do processo. Tal condição se tornaria catastrófica para o parque siderúrgico atual, pois a maioria dos produtores de aço de usinas integradas utiliza o processo de sinterização com fonte geradora de grande parte de sua carga metálica.

O presente trabalho tem como objetivo apresentar uma rota, baseada em tecnologias atuais, com uma concepção operacional diferente, que permita manusear quantidades de *pellet feed* acima de 40% na mistura de minérios.

2 Objetivo

- Desenvolver um conceito de uma rota para utilização de elevadas participações de *pellet feed* no processo de sinterização, baseando-se em:
 - Proceder simulações físicas em escala piloto para avaliação dos equipamentos existentes e desenvolvimento da melhor rota baseado em testes de aglomeração a frio e queimas em *pot grate*;
 - Identificar a melhor condição de processo dentre as rotas avaliadas que permitam elevadas participações de *pellet feed* no processo de sinterização, com a produção de um síter com qualidade adequada ao processo de redução.

3 Revisão Bibliográfica

3.1 Minério de Ferro

O minério de ferro é a matéria-prima básica para siderurgia, respondendo pelas unidades metálicas (Fe_t) de alimentação dos reatores convencionais de redução como Alto-Forno.

Segundo levantamento feito por QUARESMA^[3], o ferro compõe a litosfera em cerca de 4%, sendo relativamente abundante. Os principais minerais contendo ferro são: a hematita (Fe_2O_3 – 69,9% de Fe_t), a magnetita (Fe_3O_4 – 72,4% de Fe_t), siderita ($FeCO_3$ – 48,3% de Fe_t) e complexos hidratados, como a limonita e goethita, com teores de ferro, que dependem do grau de hidratação.

Durante o beneficiamento do minério de ferro, finos são gerados (material < 6,35mm), os quais são inadequados para serem utilizados de forma direta em reatores que utilizam gases redutores em contra fluxo à carga metálica, necessitando de serem aglomerados previamente.

TAKEHARA^[4] cita que no início do século XIX, a dificuldade de produzir somente minério do tipo granulado (*lump ore*) e de alto teor (ideais para uso direto nos Altos-Fornos) foi fator fundamental, por motivos estratégicos e econômicos, para o processamento de minério de granulometria mais fina e a concentração de minério de teores mais baixos, antes de serem introduzidos nos Altos-Fornos.

As formações ferríferas bandadas, com camadas alternadas de quartzo e hematita, denominadas itabiritos, constituem-se nos recursos minerais mais abundantes atualmente na região do quadrilátero ferrífero, em Minas Gerais. São formações primárias enriquecidas com ferro por meio de processos geológicos que resultam em depósitos muito ricos, com coexistência de hematita e magnetita.

De acordo com PADULA^[5] os *sinter feeds* utilizados nas plantas de sinterização e grande porte nacionais, com exceção da Siderúrgica do Pecém, são gerados no quadrilátero ferrífero.

Os principais parâmetros de qualidade de um *sinter feed* objetivados para o produto final são a química global e as frações granulométricas +6,35mm, +1mm e -0,150mm.

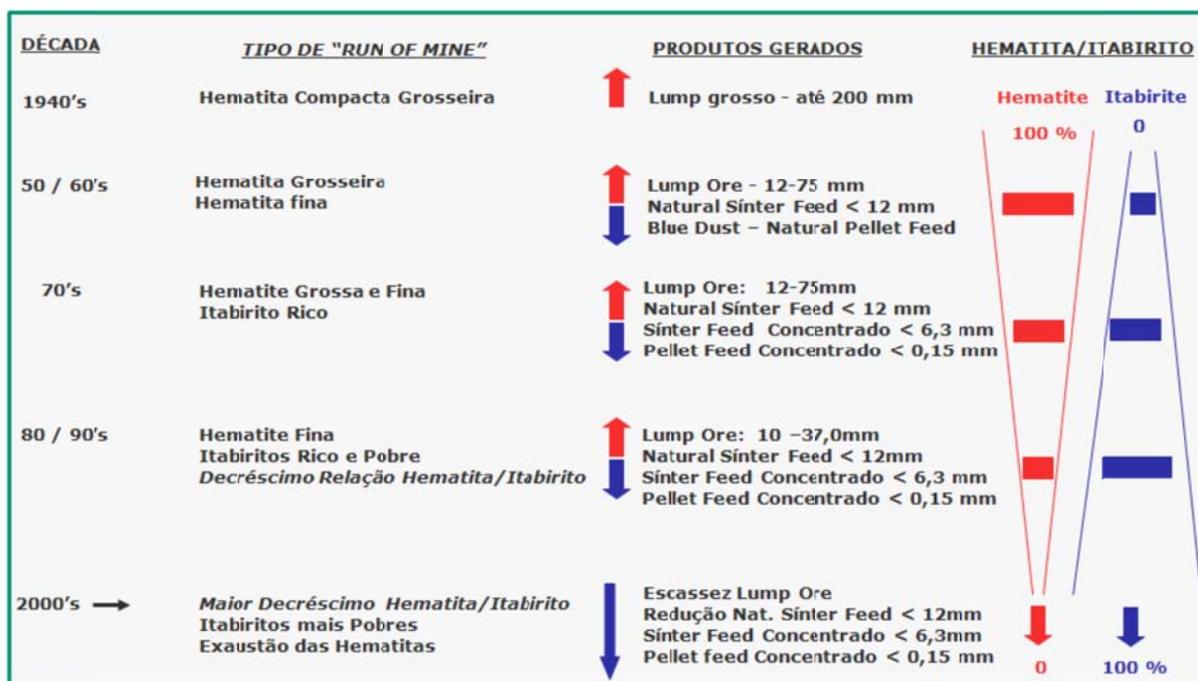
De acordo com MOURÃO^[6], as reservas mensuradas de minério de ferro dos últimos anos no Brasil apresentaram um ligeiro aumento, e que esse crescimento tem um grande peso dos itabiritos de Minas Gerais, mais especificamente do quadrilátero ferrífero. Novas pesquisas geológicas não têm relatado ocorrências de hematita compacta, em volume considerável. Ao contrário, muitos estudos têm apresentado que novos jazimentos são basicamente de itabirito, podendo gerar até 100% de *pellet feed* no processo de beneficiamento.

Segundo MOURÃO^[6] com a extinção das reservas de hematita do quadrilátero ferrífero, a produção de granulado irá diminuir, gradativamente, até a sua exaustão, na próxima década. Os minérios lavrados terão cada vez mais parcelas de itabiritos, o que aumentará custos e geração de finos tipo *sinter feed* e *pellet feed*.

Em seu estudo MOURÃO^[6] apresenta também uma avaliação qualitativa das reservas de minério de ferro do quadrilátero ferrífero a partir da década de 1950, que sinaliza a redução da participação hematita em contrapartida ao aumento do itabirito nas jazidas prospectadas com os seguintes destaques:

- As hematitas estão em processo de exaustão nas reservas conhecidas no quadrilátero e, por conseguinte, deverá haver escassez de granulado, em um futuro não muito distante;
- Sendo mais pobres em ferro, os itabiritos necessitam de usinas mais complexas de beneficiamento, com etapas concentração mais sofisticadas e com menores índices de recuperação metálica;
- A geração de minério ultrafino, tipo *pellet feed* (90% <0,150mm), estará aumentando, principalmente com adventos de novos projetos.

A Figura 3.1 apresenta a evolução das jazidas de minério de ferro do quadrilátero ferrífero.



Fonte: MOURÃO^[6]

Figura 3.1: Evolução das jazidas de minério de ferro do quadrilátero ferrífero.

Complementando o cenário de mudança no *split* de produtos oriundos do beneficiamento das jazidas minerais de ferro, MOURÃO^[6] exemplificou em seu trabalho que ao analisar os novos projetos de empresas estabelecidas e de potenciais emergentes, onde verificou-se que houve um acentuado aumento de *pellet feed*, significando, em alguns casos, futura produção. A Tabela 3.1 apresenta alguns destes projetos:

Tabela 3.1: Novos Projetos de produção de Minério de Ferro, investimento e capacidades.

Projeto	Capacidade (t x 10 ⁶)	Investimento (US\$/t/ano)	Produto % Pellet Feed
Carajás/Serra Sul	90	111	30-35
MMX Minas/Rio	27	102	100
Millenium Iron Range	15	113	100
Grange/Kermaman	6,6	128	100

Fonte: MOURÃO^[6]

MOURÃO^[6] cita em sua publicação referenciando a mineradora canadense Baffinland que, em mundialmente observa-se uma degradação das reservas de granulado, tanto em volume quanto em qualidade. Segundo o levantamento, em 1983 a produção mundial de granulado era de 107,5 milhões de toneladas e representava 45% do mercado transoceânico e 25% da

produção total de minério de ferro. Em 2000, a despeito do crescimento considerável da produção de minério, a quantidade de granulado já havia caído para 77,1 milhões de toneladas, representando apenas 19% do mercado transoceânico e 7,6% da produção mundial de minério. Quanto à qualidade, constatou-se uma redução progressiva na resistência e nas características químicas (redução do Fe_t , e aumento de Al_2O_3 , P e álcalis) dos granulados disponíveis no mercado.

Ao avaliar a condição dos minérios Australianos, principalmente aos *coarse sinter feeds*, verificou-se durante anos um *blend* interessante com os minérios produzidos no Brasil. Os *sinter feeds* Australianos contribuíam de forma significativa para o engrossamento da mistura e eram fundamentais para uma boa permeabilidade do leito de sinterização, mas eram minérios extremamente pobres, com altos teores de SiO_2 , Al_2O_3 e P. Os minério Brasileiros, mais ricos, faziam o balanço químico interessante e viabilizavam a utilizações de grandes participações dos minérios Australianos.

Essa prática tipicamente asiática foi adotada principalmente na China, porém a degradação da qualidade dos minérios Brasileiros vem deslocando os minérios Australianos das condições que foram utilizado no passado. A entrada do projeto S11D no mercado pode contribuir na retomada dessa prática operacional, porém é uma condição mais estratégica do que técnica e pode mudar de operação para operação.

Os concentrados Chineses são outro capítulo desta discussão, porém pelo baixo teor de Fe contido, SiO_2 e Al_2O_3 elevados, os mesmos ainda tem o fato de serem muito finos, se viabilizando somente em aplicações domésticas e bem diferente das práticas usuais do Brasil.

Em recente estudo realizado por LIMA e NEVES^[7], em 2014, o Brasil possuía 11,9% das reservas mundiais de Minério de Ferro, com um teor médio de 49%. A produção brasileira atingiu 411,8Mt, sendo 10% de granulado e 90% de finos, destes finos, 72% foram classificados como *sinter feed* e a massa complementar de *pellet feed*.

Devido à deterioração da qualidade química e física (granulométrica) dos *sinter feeds* e crescente aumento da geração de *pellet feeds*, vislumbra-se a necessidade de adequação do blend em um futuro próximo, para uso nas plantas de sinterização.

3.2 Sinterização de Minério de Ferro

A siderurgia Brasileira, em relação ao resto do mundo, está e continuará sendo suprida com os minérios com melhor qualidade química existentes no mercado, e precisa utilizar dessa condição para se diferenciar em produtividade e competitividade.

De acordo com PADULA^[5], o processo industrial de sinterização de minérios de ferro é uma operação unitária pirometalúrgica, realizada em batelada ou de forma contínua, com objetivo de transformar uma mistura de partículas finas em material aglomerado. Esta mistura, para produção do sinter produto, é submetida a uma fusão parcial em uma atmosfera redutora-oxidante e a um perfil térmico típico, cuja temperatura máxima é de aproximadamente 1300°C.

O processo de sinterização e os demais processos de aglomeração tratam da necessidade de adequar a granulometria das cargas metálicas, condição extremamente importante para operação de um reator de redução que trabalha com o gás redutor em contracorrente, pois se os finos fossem carregados diretamente no reator, a permeabilidade da carga seria reduzida dificultando a passagem do gás e a operação do reator.

Segundo MOURÃO^[8], no processo de sinterização, a combustão localizada provoca uma fusão parcial da carga na região mais quente e o gás gerado na combustão pré-aquece a carga logo abaixo. Trata-se de um processo com bom rendimento térmico. Mas depende de um bom controle da permeabilidade de carga.

Segundo TELLES et al^[9] a sinterização de minério de ferro é empregada no setor metalúrgico para transformar finos de minério, através da aglomeração a quente junto com outras matérias-primas em um produto dominado sinter.

De acordo com CASTRO^[10] no processo de sinterização são aglomerados finos de minério de ferro (granulometria entre 6,35mm e 0,149mm) e fundentes (calcário, dolomita, serpentinito), possibilitando obter, por fusão parcial à temperatura de 1300°C, um produto granuloso, poroso, com propriedades físicas, químicas e metalúrgicas ideais para o Alto-Forno.

Segundo AZEVEDO^[11] e NAJAR et al^[12], o mecanismo de sinterização compreende dois fenômenos, o de transferência de calor e as reações químicas. Estes fenômenos resultam na

formação de uma zona de reações termoquímicas interdependentes no leito da mistura a sinterizar, gerando outras zonas com características diversas, cujos desenvolvimentos formam o mecanismo global de aglomeração a quente.

A Figura 3.2 apresenta de forma esquemática o desenvolvimento dos fenômenos em um leito de sinterização. A transferência de calor é promovida pela sucção forçada de ar da camada superior para camada inferior do leito de sinterização, criando uma frente térmica, cuja velocidade de propagação é proporcional a vazão de ar e a queima do combustível sólido, que produz calor gerando uma frente de reação química.

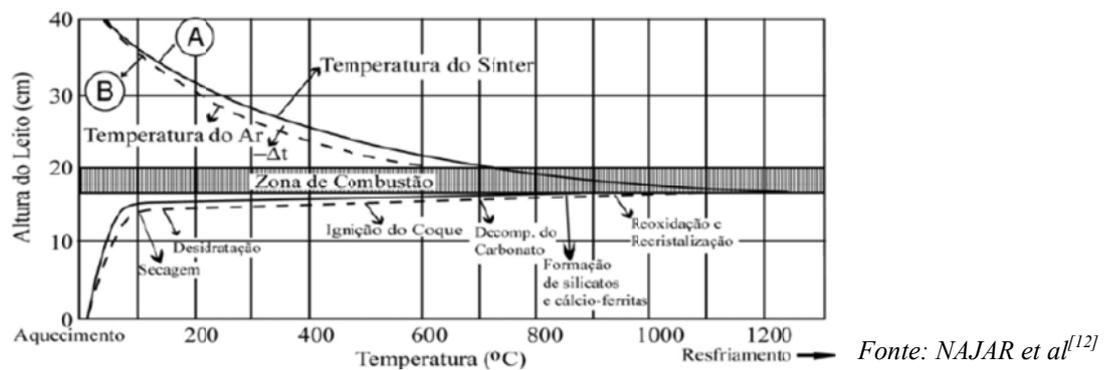


Figura 3.2: Esquema de troca de calor e segmentação dos acontecimentos e reações de sinterização.

De acordo com NAJAR et al^[12] e TAKEHARA^[2], as zonas presentes no leito de sinterização podem ser entendidas da seguinte forma:

Zona úmida: Acima de 100°C inicia-se a evaporação da umidade da mistura. O vapor é conduzido para as camadas inferiores e mais frias; ao passar por 60/70°C esse vapor é novamente condensado. Entre 60 a 100°C, forma-se uma região com umidade de mistura superior à média, sendo que acima desta inicia-se a zona de secagem.

Zona de Secagem: Compreende entre 100 a 500°C, região onde ocorre principalmente a vaporização da umidade da mistura e depois a desidratação dos hidróxidos. Entre 150 a 200°C toda umidade já foi vaporizada, sendo iniciado, acima 150°C a desidratação dos hidróxidos, ambas as reações (eq. 01 e 02) consumindo calor do processo:



Zona de Reação: Compreende toda região térmica acima de 500°C; inicia-se com a reação de combustão do combustível sólido (esta temperatura pode variar dependendo do combustível sólido utilizado no processo) e termina com o início do resfriamento de sinter. As principais reações do processo de sinterização ocorrem nesta zona e podem ser subdivididas em:

Queima do combustível sólido – inicia entre 500 a 700°C, elevando o nível térmico do leito e a temperatura média pode chegar à faixa de 1200 a 1400°C. A queima do combustível ocorre com excesso de O₂ tornado o ambiente predominantemente oxidante ocorrendo as principais reações (eq. 03 e eq. 04):



Reação de decomposição dos carbonatos – essas reações iniciam-se lentamente a 600°C, aumentando a cinética à medida que a temperatura se eleva, com forte absorção de calor, liberando os óxidos principalmente de cálcio e magnésio, que reagem com os óxidos de ferro formando as ferritas e também silicatos;

Reações na fase sólida – As reações ocorrem por substituição, são favorecidas pelo aquecimento da mistura e pelo contato entre as partículas de óxido de ferro, CaO, MgO e SiO₂. A intensidade dos contatos entre essas partículas é o fato mais importante, pois a mobilidade dos reagentes, neste estado, é muito pequena. Os compostos dessas reações são: óxido de ferro, cálcio e magnésio binários ou ternários e os silicatos, que variam mediante a concentração de sílica presente na mistura;

Reações de redução e reoxidação – iniciam na zona superior de aquecimento e só terminam com início do resfriamento. A reação de combustão do combustível sólido, além de produzir grande quantidade de calor, ainda torna o ambiente ligeiramente redutor, durante certo tempo, favorecendo a redução parcial dos óxidos de ferro presentes na mistura. Ao iniciar o resfriamento o ambiente se torna altamente oxidante, o que permite a reoxidação quase total dos óxidos reduzidos;

Reações de Formação do Magma – são reações que ocorrem na frente de queima, onde os componentes do leito, após sofrerem condicionamento pelas reações da fase sólida, entram em um estado de fusão incipiente e depois se recristalizam rapidamente.

Zona de Resfriamento – Inicia-se abaixo de 900°C, quando os ciclos de reações exotérmicas se finalizam, com a redução da temperatura, parte da matéria que sofreu a fusão incipiente, começa a se recristalizar, consolidando as propriedades do síter.

Após o processo de aglomeração a quente, o síter é tratado mecanicamente e classificado, onde a fração <5mm é recirculada no processo e a fração >5mm é direcionada para o reator de redução ou para um pátio de estocagem.

3.3 Influências do Tamanho de Partícula no Processo de Preparação da Mistura

De acordo com TAKERAHARA^[4], o Minério de Ferro é testado e classificado de acordo com as necessidades do processo, onde são observados: o índice de granulação, a distribuição granulométrica, qualidade química, disponibilidade e/ou custo.

Em relação a faixa granulométrica ideal da mistura de minérios aplicada à sinterização, a referência adotada quando se trabalhava com poucos minérios era a curva de Astier. A curva estabelecia que a granulometria deveria ser limitada pelas malhas 6,35mm e 0,105mm, considerando que aproximadamente 50% do material deveria ser acima de 1mm.

As condições já citadas e a necessidade de se trabalhar com um número muito maior de minérios na mistura, principalmente para atender as necessidades de qualidade química, volume e custo, a curva ideal proposta por Astier evoluiu para um intervalo proposto pela área “A” da Figura 3.3. Condição verificada por FURUI^[13] em 1977 e confirmada por CARNEIRO^[14] em 1984.

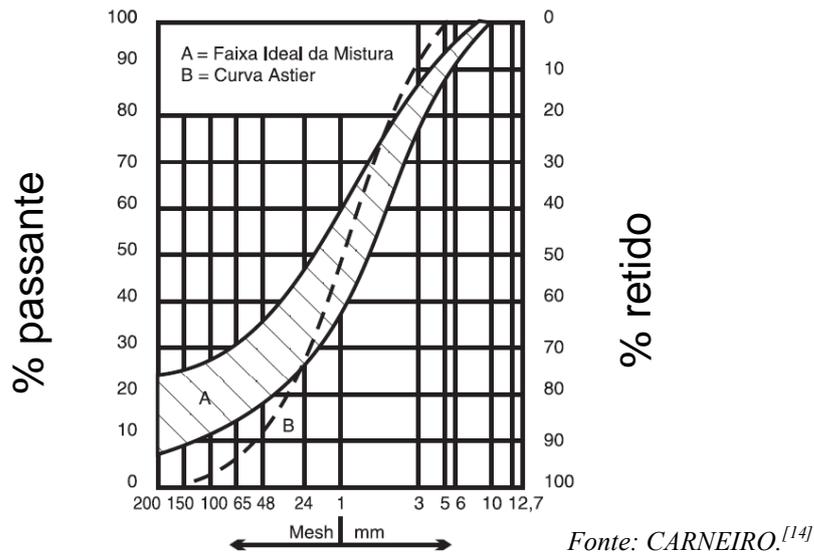


Figura 3.3: Distribuição granulométrica ideal de um *sinter feed*.

Segundo VIEIRA et al^[15], as partículas de minério de ferro são classificadas de acordo com sua faixa granulométrica em supergrossas, nucleantes, intermediárias, aderentes e superfinas. As partículas supergrossas não apresentam a capacidade de aderir às partículas mais finas ao seu redor e não contribuem para o fenômeno de microaglomeração. Já as partículas intermediárias não se comportam nem como nucleantes e nem como aderentes. As superfinas causam a perda de permeabilidade do leito de sinterização, mas podem ser utilizadas desde que estas passem por um processo adequado de aglomeração.

A Figura 3.4 apresenta de forma detalhada esta classificação:

Tipo de partícula	Faixa granulométrica (mm)	Descrição
Supergrossas	>6,3	Não apresentam a capacidade de aderir às partículas mais finas ao redor e não contribuem para o fenômeno de microaglomeração
Nucleantes	1,0 – 6,3	Apresenta a capacidade de aderir as partículas mais finas ao redor e constitui-se nos núcleos do aglomerados. Tamanho ideal de 1 até 3mm.
Intermediárias	0,3 – 1,0	Não se comportam nem como nucleantes e nem como aderentes
Aderentes	0,1 – 0,3	Formam a camada aderente ao redor do núcleo microaglomerado.
Superfinas	<0,1	Causam a perda de permeabilidade do leito de sinterização. Para serem usadas necessitam ser micropelotizadas.

Fonte: LOPES^[16]

Figura 3.4: Descrição do tipos e tamanhos das partículas de *sinter feed*.

Para uma avaliação prévia do comportamento a frio (aglomeração a frio) da mistura, o Índice de Permeabilidade Japonesa (*JPU – Japanese Permeability Unit*) é uma metodologia utilizada com frequência, pela simplicidade e facilidade de execução dos ensaios. Para esta avaliação, um diferencial de pressão é aplicado a um leito com dimensões conhecidas, registrando a vazão passada pelo leito, sendo o diferencial de pressão sempre constante para as avaliações. O JPU é calculado utilizando a seguinte equação 5:

$$JPU = \frac{Q}{A} \left(\frac{h}{\Delta P} \right)^{0,6} \quad \text{eq. (05)}$$

Onde:

JPU = *Japanese Permeability Unit* (adimensional)

Q = Vazão de gás que atravessa o leito (m^3/min)

A = área da máquina (m^2)

h = Altura de camada do leito (m)

S = depressão sob o leito (mmH_2O)

n = Expoente ligado ao tipo de escoamento gasoso ($n=0,6$)

LUDIVINE et al.^[17] utilizou esse procedimento para avaliação de performance de granulação, fazendo medições de permeabilidade em diferentes operações unitárias do processo de sinterização, através o aparato apresentado na Figura 3.5:



Fonte: LUDIVINE et al.^[17]

Figura 3.5: Permeômetro.

O conhecimento da permeabilidade como também os fatores que afetam o comportamento a frio da mistura à sinterizar são de extrema importância para as ações operacionais e de processo durante a produção de sínter.

A permeabilidade é a medida física de eficiência do processo de aglomeração a frio, onde o mesmo é afetado não somente pela distribuição granulométrica da mistura, mas por outros fatores como a umidade da mistura, dosagem do agente ligante, tecnologia utilizada no processo de aglomeração a frio (equipamentos) e também as características intrínsecas das matérias-primas.

3.4 Influência da Água no Processo de Preparação da Mistura

A umidade influencia significativamente a eficiência da etapa de aglomeração. A adição de água precisa ser controlada e pode variar com uma característica intrínseca das matérias-primas, por isso precisa ser estudada e monitorada nas operações.

Cada mistura à sinterizar apresenta o seu melhor desempenho segundo uma dosagem de água, esta dosagem confere a esta mistura o melhor desempenho quanto ao processo de aglomeração, e a este nível de dosagem de água se dá o nome de umidade ótima.

A umidade ótima pode ser influenciada por uma série de fatores, que variam desde qualidade intrínseca dos constituintes da mistura de minérios até variações da proporção entre nucleantes e aderentes na mistura total.

CARNEIRO^[14] em seu trabalho utilizou um método de medição de permeabilidade da mistura para identificação de umidade ótima da mistura, a Figura 3.6 apresenta uma curva característica deste tipo de avaliação.

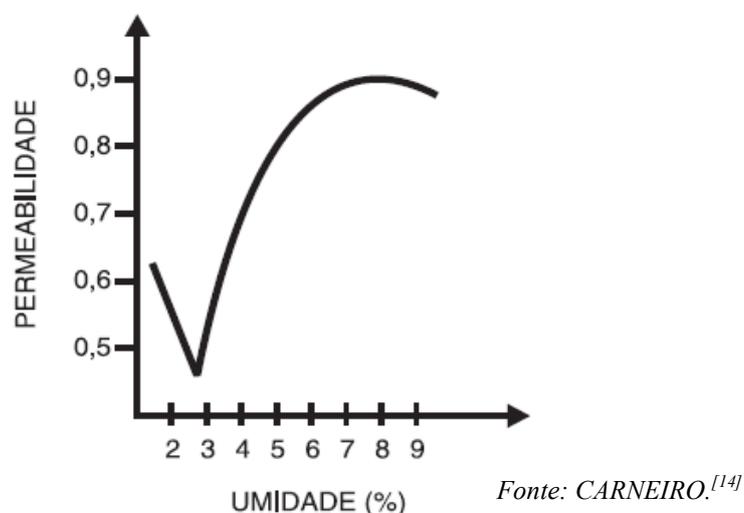


Figura 3.6: Efeito da umidade na permeabilidade de misturas.

Para o levantamento da curva experimental, CARNEIRO^[14] utilizou a mesma equação utilizada por LUDIVINE^[17] em sua avaliação de performance e controle da eficiência de granulação. No estudo realizado por CARNEIRO^[14] a umidade foi relacionada a permeabilidade do leito, sendo definido como umidade ótima da mistura em questão, a umidade que resultou a maior unidade de permeabilidade.

O comportamento da água em relação às partículas da mistura foi descrito por HONORATO^[18], onde foram definidos 4 estados da água empregada no processo de aglomeração. Estes 4 (quatro) estados do sistema água-partícula descrevem o comportamento da quase partícula dependendo do volume de água entre as partículas, conforme Figura 3.7:

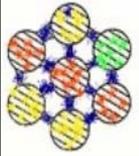
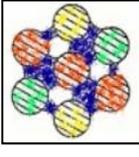
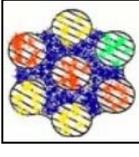
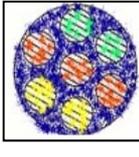
<p>➤ ESTADO PENDULAR - quando a água está presente apenas nos pontos de contato das partículas, formando uma ponte líquida. A tensão superficial mantém as partículas unidas;</p>	
<p>➤ ESTADO FUNICULAR - quando, além das pontes líquidas, alguns poros são totalmente preenchidos por água, havendo ainda a presença de ar em alguns poros;</p>	
<p>➤ ESTADO CAPILAR - quando todos os poros são ocupados pela água, porém a superfície não é recoberta por uma película de água;</p>	
<p>➤ EXCESSO DE ÁGUA - quando o excesso de água provoca o aparecimento de gotas d'água, com partículas no seu interior e também na superfície.</p>	

Figura 3.7: Estados do Sistema água-partícula. Fonte: VENTURINI.^[19]

LITSTER E WATERS^[20] estudaram os mecanismos de interação entre a água e as partículas dos minérios. Estes estudos mostraram que a adição de água favorece a ligação entre as partículas sólidas da mistura, constituindo uma ponte de ligação entre as mesmas, propiciando assim a formação das quase partículas. A tensão superficial da água aproxima as partículas sólidas aumentando a resistência dos grânulos. Ainda segundo LITSTER E WATERS^[20] a granulação da mistura de sinterização é uma etapa chave do processo, pois a distribuição granulométrica das quase partículas formadas afeta diretamente a permeabilidade do leito de

sinterização e conseqüentemente a produtividade e eficiência de queima dos combustíveis, impactando na qualidade do sinter.

As pseudopartículas apresentam uma distribuição granulométrica mais grossa e homogênea do que a apresentada pela mistura de sinterização segundo VENKATARAMANA^[21].

STARLING^[22] afirmou que a permeabilidade do leito mais elevada facilita o fluxo de gás ao longo de sua extensão, melhorando as condições de queima. Segundo a autora, diversos estudos buscam relacionar características da mistura de sinterização com a distribuição granulométrica das pseudopartículas e a conseqüente produtividade da sinterização.

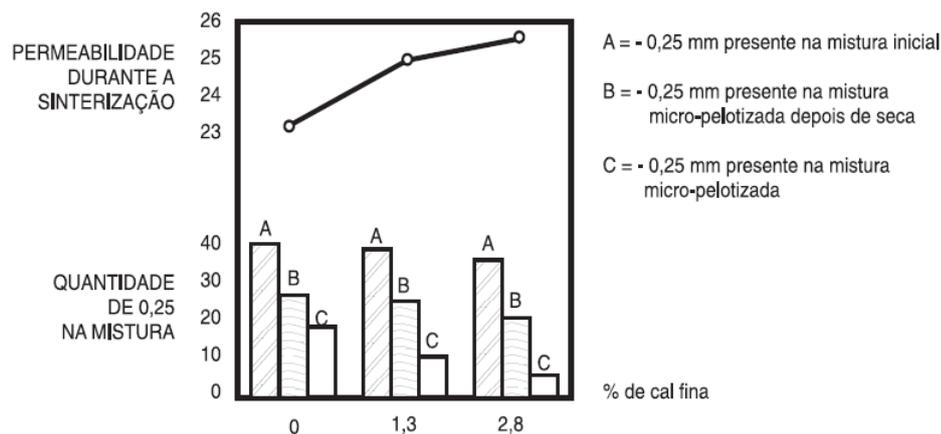
3.5 Efeito da Dosagem de Aglomerantes no Processo de Preparação da Mistura

A dosagem de aglomerante aumenta a resistência mecânica a frio do aglomerado formado pela ação da água e pelo trabalho realizado pela tecnologia empregada para formação das quase partículas.

No processo de sinterização de minério de ferro, a cal virgem é o principal aglomerante e o mais utilizado. Ocorrendo hidratação após a adição da água ao processo de aglomeração a frio, a cal atua na intensificação das forças de Wan Der Waals, conferindo ao aglomerado a frio maior resistência mecânica, necessária para que as quase partículas formadas resistam ao manuseio até a máquina de sinter.

De acordo com HONORATO^[18], a adição de aglomerantes na mistura a sinterizar visa acelerar a união das partículas no misturador, ao mesmo tempo em que aumenta a capacidade de adesão das partículas e evita a desintegração das quase partículas durante a compactação e secagem da mistura na máquina de sinter. Ainda segundo HONORATO^[18], a quantidade de partículas aglomeradas é diretamente proporcional ao percentual usado do agente aglomerante.

A Figura 3.8 apresenta tal comportamento para uma mistura específica.



Fonte: HONORATO.^[18]

Figura 3.8: Influência da cal fina na permeabilidade e a eliminação dos finos da mistura.

De acordo com a Figura 3.8, o aumento da porcentagem de cal adicionada à mistura diminui a quantidade de partículas menores que 0,25mm (livres) presente no material aglomerado, aumentando assim a permeabilidade da mistura.

HONORATO^[19] também afirmou que em termos de consumo específico de combustível, o uso da cal é benéfico ao processo de sinterização devido a substituição de um material carbonatado (calcário) por um material calcinado (cal) e também pela hidratação da cal que libera calor, aumentando a temperatura da mistura (em menor escala).

Pelos estudos avaliados e citações apresentadas, verificou-se a importância do agente aglomerante no processo de preparação da mistura a sinterizar. Porém, a máxima eficiência do processo de aglomeração também envolve a tecnologia de mistura e nodulização aplicada ao tratamento das misturas.

3.6 Efeito da Tecnologia no Processo de Preparação da Mistura

A tecnologia e equipamentos utilizados para preparação da mistura a sinterizar são parte integrante e fundamental para um bom processo de aglomeração a frio. Os equipamentos remetem-se a energia aplicada para efetivação da mistura propriamente dita e homogeneidade das espécies químicas, componentes e distribuição uniforme da água dosada no processo.

Alguns equipamentos específicos contribuem para o processo de formação da quase partícula, mas precisam do processo de mistura e homogeneização em um nível adequado para que

possam alcançar um bom desempenho de aglomeração, propiciando a mistura um aumento do tamanho médio, resultado da formação e crescimento destas partículas.

A tecnologia disponível atualmente capacita os sistemas de preparação de mistura para operarem com no máximo 40% de material $< 0,150\text{mm}$ e pelas atuais tendências elas precisarão estar aptas a trabalhar com proporções maiores do que 70% de *pellet feed* na mistura de minérios.

As plantas convencionais de sinterização de larga escala eram compostas somente de um sistema de dosagem de componentes da mistura, um misturador do tipo tambor (responsável pela homogeneização da mistura e microaglomeração) e a máquina de sínter, responsável pela ignição superficial da mistura e o processo de sinterização propriamente dito.

A Figura 3.9 apresenta um layout típico de uma planta de sinterização convencional. Porém, atualmente no Brasil, nenhuma planta de sinterização de grande porte apresenta este layout.

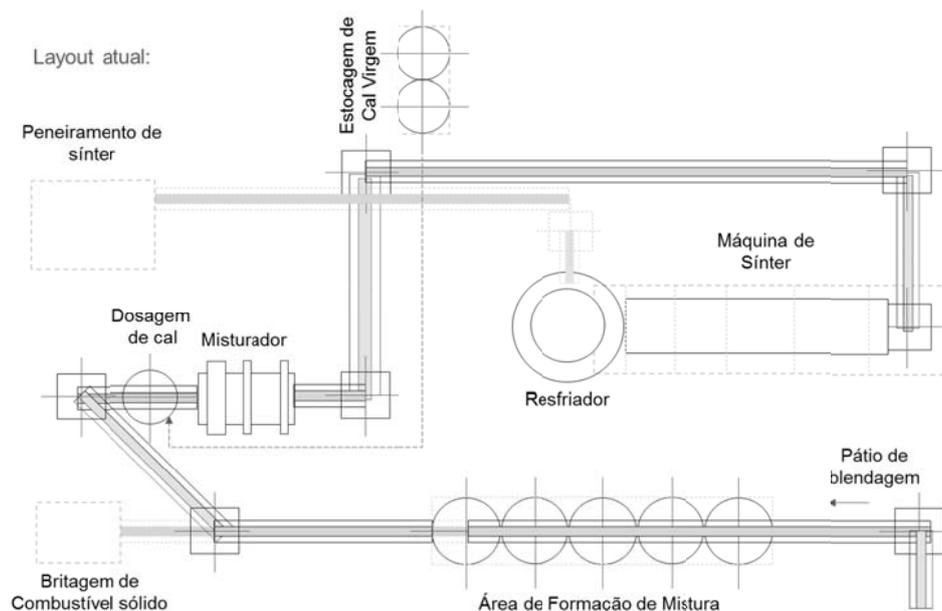


Figura 3.9: Layout típico de uma sinterização convencional.

Com a forte tendência de afinamento das misturas de minérios com passar dos anos, o layout das plantas foram se modificando para se adequar a condição de manuseio dos finos.

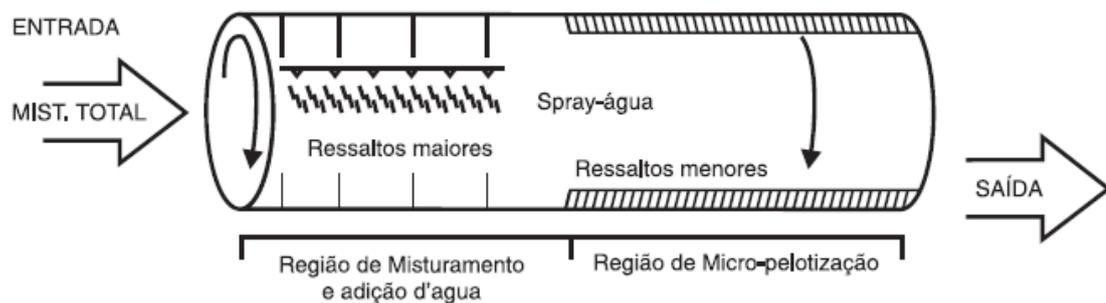
3.6.1 Nodulizador

O nodulizador foi desenvolvido para aumentar a eficiência de aglomeração de uma planta de sinterização convencional. Esse equipamento trabalha associado a um misturador tambor.

Nesta situação, o primeiro equipamento, o tambor de mistura atua somente na efetivação da mistura. Externamente o nodulizador é semelhante ao misturador, podendo às vezes ter maior comprimento do que o misturador, dependendo das necessidades de processo da planta.

O misturador convencional, normalmente traz em seu interior, na maioria dos projetos, pás revolventoras de material até a metade do seu comprimento. O objetivo destas pás é homogeneizar todo material, antes de começar o processo de aglomeração propriamente dito.

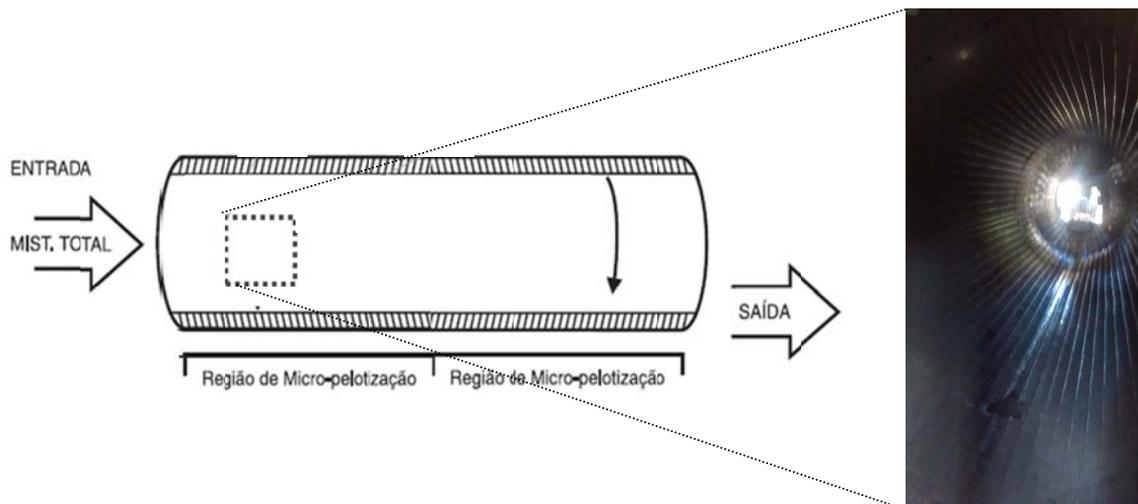
Em plantas de sinterização convencional, o processo de aglomeração é feito da metade para frente do misturador. A Figura 3.10 Apresenta de forma esquemática o misturador convencional.



Fonte: HONORATO.^[19]

Figura 3.10: Característica típica de um misturador.

Como citado, o que normalmente diferencia o misturador de um nodulizador é a ausência de ferramentas de mistura no nodulizador. Os ressaltos menores ilustrados por HONORATO^[19] são preenchidos por material e forma uma superfície que facilita o rolamento da mistura e o início do processo de formação da quase partícula. As Figuras 3.11 e 3.12 mostram respectivamente o interior de um nodulizador industrial e um layout típico de uma sinterização que opera com misturador e nodulizador em série.



Fonte: HONORATO^[18] adaptado pelo Autor

Figura 3.11: Ferramentas internas de um nodulizador tambor.

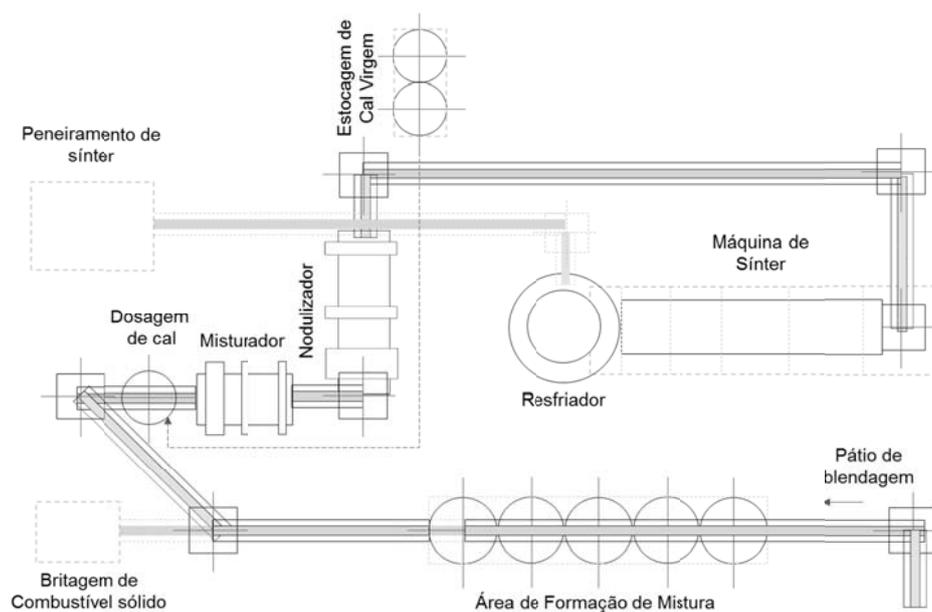


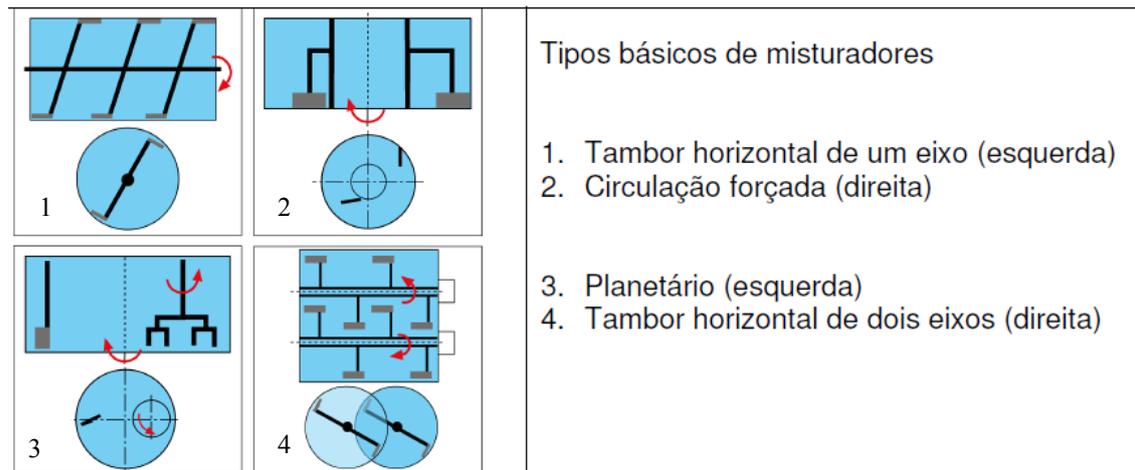
Figura 3.12: Layout típico de uma sinterização que possui misturador e nodulizador em série.

O presente layout pode propiciar à planta, com um rigoroso controle de processo, a utilização de no máximo 25% de material <0,150mm na mistura de minérios.

3.6.2 Misturadores Intensivos

A tecnologia de mistura intensiva vem se desenvolvendo com os adventos dos misturadores com ferramentas rotativas de alta velocidade.

De acordo com VARGAS E CABRAL^[23] os misturadores disponíveis no mercado derivam basicamente de quatro tipos de acordo com a Figura 3.13.

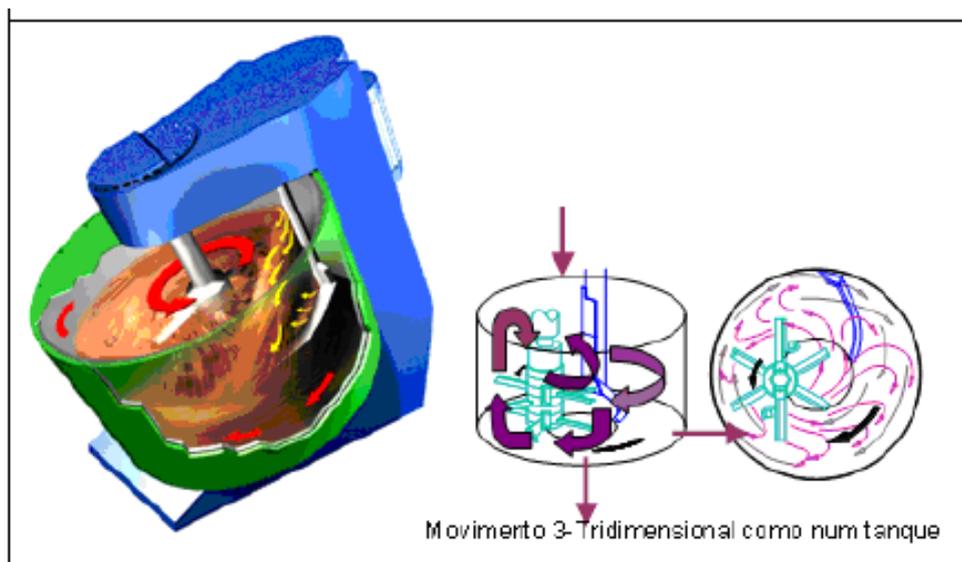


Fonte: VARGAS E CABRAL.^[23]

Figura 3.13: Tipos básicos de misturadores intensivos horizontais.

A diferença essencial entre os misturadores do tipo tambor simples e os misturadores intensivos é que nestes equipamentos o processo de mistura está separado do processo de transporte do material. Esta separação entre transporte de material e processo de mistura permite que a velocidade da ferramenta de mistura possa ser ajustada dentro de amplos limites. Tal condição permite variações de velocidades de 2m/s até 25m/s e que resultam em uma aplicação de energia específica e o aumento da performance da mistura.

Segundo VARGAS E CABRAL^[23], em 1903 a Companhia Eirich desenvolveu e construiu os primeiros misturadores de circulação forçada dedicada inicialmente a indústria de concreto. VARGAS E CABRAL^[23], em 1924, desenvolveu o primeiro misturador caracterizado com uma cuba de mistura rotativa, inovando o princípio único e sem similaridade de mistura em contra-corrente. Tal condição propicia a este equipamento uma condição de homogeneização diferenciada quando comparado a qualquer tipo de equipamento. A Figura 3.14 apresenta a maneira que o material é movimentado no interior do equipamento, mostrando sua eficiência.



Fonte: VARGAS E CABRAL.^[23]

Figura 3.14: Tipos básicos de misturadores intensivos verticais.

A ação das ferramentas de mistura promove um fluxo em corrente tridimensional, onde cada partícula presente é forçada a mudar de posição em larga escala no sentido horizontal e vertical. Segundo VARGAS E CABRAL^[23], a combinação dos vários elementos móveis de mistura, confere a mistura um alto grau de homogeneidade.

3.6.3 Processo HPS

De acordo com CAPPEL E LUNGEN^[24], o processo de pelletização foi inventado em 1912 por A. G. Anderson e C. A. Brackelsberg, e somente teve aceitação na indústria do minério de ferro quando, em 1926, uma planta piloto com capacidade para 120t/dia de pelotas foi construída nas instalações da Krupp Stahl em Rheinhausen na Alemanha.

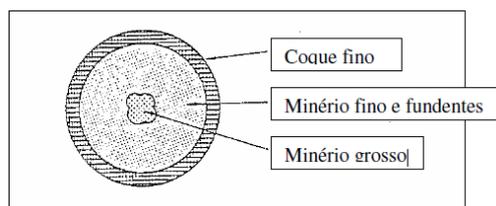
Um grande impulso para o processo de pelletização veio dos Estados Unidos quando no final da segunda guerra mundial o minério granulado da região de Minnesota, encontrava-se extremamente escasso. Os taconitos não substituíam o minério rico nos Altos-Fornos devido ao baixo teor de ferro (aproximadamente 30%) tendo como mineral predominante à magnetita. A moagem se fazia necessária para o beneficiamento e a faixa granulométrica exigida era de 85% abaixo de 0,044mm. De acordo com CAPPEL E LUNGEN^[24], na faixa granulométrica tão fina (< 0,045mm), o processo de sinterização não era aplicável, logo, o

desafio de uma inovação tecnológica se fazia presente e foi prontamente conduzido pela “*Mines Experimental Station of the University of Minnesota*” no ano de 1943. Segundo CAPPEL E LUNGEN^[24], em 1946, após tomar conhecimento dos estudos realizados em Minnesota, a Suécia estabeleceu um comitê para estudar a viabilidade de pelletizar os concentrados de minério de ferro existentes naquele país.

Citado na dissertação de JANUZZI^[25] o processo HPS foi idealizado a partir do ano de 1980 por Sakamoto e equipe conscientes de que o processo de sinterização convencional (curva de Astier) e pelletização ($85\% < 0,044\text{mm}$) necessitam de uma matéria-prima com uma distribuição granulométrica muito específica. Sakamoto e equipe sentiram a necessidade de melhorar a etapa de aglomeração a frio na sinterização convencional, agregando os discos pelletizadores e a etapa de recobrimento das quase partículas com combustível moído abaixo de 1,0mm, realizada em um tambor de mistura, denominada de etapa de recobrimento (*coke coating*) como forma de melhorar a transferência térmica e, por conseguinte reduzir combustível no processo, dentro da instalação do centro de pesquisa da Nippon Kokan Co., atual JFE com as seguintes metas:

- Possibilitar uma flexibilidade na distribuição granulométrica do minério;
- Possibilitar um aumento no teor de ferro já que o *pellet-feed* era geralmente oriundo de uma concentração, tendo, portanto, maior teor de ferro.
- Aumentar a produtividade e o rendimento sob condições de baixa sílica;
- Reduzir consumo de energia;
- Aumentar a redutibilidade do sinter produzido;
- Reduzir o RDI.

O processo HPS se caracteriza pela produção da pseudopartícula que é constituída por três camadas de cobertura (Figura 3.15), sendo o minério mais grosso no centro, o minério mais fino e o material de fluxo (calcário, cal, serpentinito) na segunda camada e o combustível sólido (coque/antracito) na camada de cobertura.



Fonte: JANUZZI.^[25]

Figura 3.15: Estrutura da pseudopartícula.

Desta forma, a matéria-prima para o processo HPS poderia ser consumida em uma faixa granulométrica mais ampla, justificando a mistura com o pellet-feed.

As combinações de algumas tecnologias de aglomeração a frio podem propiciar a utilização de maiores volumes de material <0,150mm na tentativa de melhora da qualidade química dos aglomerados e manutenção dos níveis de produtividade e qualidade física.

3.7 Cenário da Siderurgia Nacional

Uma alteração significativa no *Split* das minas em operação confere uma grande influência sobre o modo operacional das siderúrgicas integradas nacionais e grande parte das internacionais, pois existe uma necessidade de adequação das plantas de sinterização em operação, principalmente porque a composição da carga metálica dos reatores de redução destas plantas, com algumas exceções são compostas pela grande maioria de sinter, vide Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Carga típica dos Altos-Fornos.

País	% Sinter	% Granulado	% Pelota
Estados Unidos	10	3	87
Europa	65	15	20
Japão	75	20	5
China	75	19	6
Brasil (Integradas)	75	20	5
Brasil (Guseiros)	-	100	-

Fonte: MOURÃO^[4].

Segundo DAWASN^[26], nos Altos-Fornos a carvão vegetal a carga metálica ainda continua sendo predominantemente o minério de ferro granulado, nos Altos-Fornos a coque a carga principal é composta pelo sinter.

As empresas integradas nacionais estão se adequando a condição atual. Alguns exemplos podem ser citados como a ArcelorMittal Tubarão com a instalação de um Nodulizador Tambor (1994) em sua planta de sinterização, a Usiminas com a instalação de MIH (2002), a Gerdau Açominas com a implantação de um sistema HPS (2005) e a CSN com a implantação de MIV nas plantas 3 e 4 de sinterização (2013).

A Ternium Brasil (2008), por ser uma planta mais nova, já concebida com sistema de mistura composta por dois Misturadores Intensivos em série, sendo o primeiro funcionando estritamente como misturador e o segundo como nodulizador.

O desafio para os próximos anos, considerando o que se tem já sinalizado pelo setor de mineração Nacional é o afinamento ainda mais acentuado dos minérios de ferro que abastecem as plantas de sinterização do parque siderúrgico Nacional.

4 Parte Experimental

Na etapa experimental do estudo, considerou-se para as simulações físicas e caracterizações um minério de ferro classificado como *sinter feed* e um minério de ferro classificado como *pellet feed*, ambos os minérios comerciais fornecidos pela Mineradora Vale.

As outras matérias-primas utilizadas na etapa experimental, também são produtos comerciais, sendo a bentonita, o quartzito, o antracito e o calcário calcítico de fornecimento interno pelo Departamento de Pelotização da Vale. O calcário dolomítico e a cal virgem foram fornecidos pela Empresa Ical S.A.

O processo de sinterização em escala piloto foi simulado, considerando as alternativas tecnológicas adequadas para misturas com elevada participação de finos e utilizando equipamentos e conceitos capazes de viabilizar o aumento de participação de finos. Para promover o aumento da eficiência do processo de aglomeração a frio, uma etapa prévia de

granulação da mistura foi realizada com a finalidade de aumentar o tamanho médio das partículas da mistura a sinterizar.

Por definição, tomando-se como base a mistura de minérios, foi considerado finos a fração <0150mm. Torna-se importante esta definição pela própria variação presente na literatura em relação a faixa de distribuição granulométrica que define o *sinter feed* e o *pellet feed*.

A rota HPS que permite a participação de até 40% de finos de minérios na mistura à sinterizar foi considerada o ponto de partida do estudo. O desempenho desta rota foi considerado como referência comparativa as alternativas tecnológicas durante as simulações.

Tal definição estipulou como desafio inicial atingir valores maiores do que 40% de finos na mistura a sinterizar, haja visto que a prática de 40% de finos está consolidada e sendo utilizada atualmente no Brasil em duas sinterizações de grande porte (Gerdau Açominas e ArcelorMittal Monlevade). Por fim, teve-se como objetivo final ultrapassar pelo menos o valor de 60% de finos, devido à sinalização dos estudos e mapeamentos realizados, que relatam a situação do Quadrilátero Ferrífero para os próximos anos, de acordo com a revisão bibliográfica realizada.

A basicidade binária alvo do sinter simulado (razão entre o % de CaO e o % de SiO₂ presentes na composição química) foi definida como 1,80 como também o % de MgO contido no sinter de 1,20%, considerando a prática industrial média das sinterizações nacionais. A bentonita foi utilizada como ligante, 0,6% em peso, em relação a quantidade de *pellet feed* na mistura.

A variação gradual da participação de finos foi realizada através da substituição em massa do *sinter feed* pelo *pellet feed*, sendo os patamares adotados para o estudo de 40, 60 e 80%, em peso, sucessivamente considerado como base à mistura de minérios.

O processo de sinterização em escala piloto foi simulado mediante ao procedimento desenvolvido pelo CTF da Vale e foi adaptado mediante às rotas e tecnologias propostas durante o exploratório das simulações.

As configurações, rotas e equipamentos utilizados na simulação foram avaliados quanto ao seu desempenho a frio e a quente. As simulações a frio foram realizadas considerando as rotas e equipamentos definidos e seu desempenho avaliado de acordo com a permeabilidade do

leito. Para a etapa de simulação a quente, todo o processo a frio foi refeito, submetendo a mistura ao processo de queima, de acordo com o procedimento de queimas em *pot grate* do CTF.

Além da tecnologia HPS, outras duas rotas foram simuladas, considerando tecnologias de mistura e nodulização diferentes, como também condições operacionais diferentes, baseadas em experiências e nas próprias oportunidades de otimização já identificadas durante a execução das simulações.

4.1 Caracterizações das Matérias-Primas

As amostras, quando ao recebimento e pelos volumes recebidos, foram antes de serem caracterizados, preparados e homogeneizados utilizando o sistema de preparação de amostras. As alíquotas para caracterização foram retiradas utilizando um amostrador rotativo tipo RDS.

Os minérios foram caracterizados quanto à distribuição granulométrica a úmido (*sinter feed* e *pellet feed*) e o restante das matérias-primas foram caracterizadas quanto à distribuição granulométrica a seco, ambas utilizando a série de malhas definidas internamente por padrões da Vale, em peneiras vibratórias circulares de escala de laboratório. Para o *pellet feed* foi determinada a superfície específica utilizando o permeabilímetro de Fisher.

Todas as matérias-primas foram caracterizadas quanto à qualidade química considerando os seguintes compostos: Fe_t , SiO_2 , Al_2O_3 , Mn_t , P, CaO, MgO, TiO_2 , Na_2O e K_2O utilizando o método de espectrômetro de fluorescência de raios-x. A perda por calcinação foi determinada por uma balança analítica e um forno tipo mufla.

Os combustíveis sólidos (Coque *Breeze* e Antracito) foram caracterizados quanto ao carbono fixo contido, matéria volátil e cinza utilizando um forno de combustão.

Os procedimentos de preparação, homogeneização e caracterização foram todos realizados utilizando a estrutura do CTF.

4.2 Principais equipamentos de simulação – Descritivo geral

As execuções de todas as simulações foram fundamentadas considerando os seguintes equipamentos de mistura e/ou nodulização:

- Misturador tambor;
- Nodulizador tambor;
- Misturador Intensivo Vertical;
- Nodulizador Intensivo Vertical;
- Misturador Intensivo Horizontal;
- Nodulizador Intensivo Horizontal;
- Disco Pelotizador;
- Sistema de exaustão/queima.

Todos esses equipamentos têm o seu correspondente de simulação em escala piloto, que tende a se aproximar das condições industriais, porém sem nenhum compromisso de garantir a similaridade de fenômeno e escala, pois os resultados gerados são utilizados de forma comparativa entre eles, mas não para realização de uma comparação quanto ao fator de escala com um equipamento industrial.

Misturador/Nodulizador Tambor → Betoneira - O sistema de mistura de cimento é comumente utilizado para simular o misturador tambor em escala piloto, tem uma capacidade máxima de 120kg/batelada, com rotação variável de 0 a 18rpm que pode ser alterada através de um inversor de frequência instalado junto ao motor elétrico. Possui um sistema de dosagem de água, que simula o sistema de aspersão utilizado em misturadores industriais permitindo a dosagem de água durante o processo de mistura/nodulização.

O equipamento (Figura 4.1) possui ferramentas de misturas removíveis que podem ser instaladas e retiradas. Essa flexibilidade permite que o equipamento trabalhe como misturador e como nodulizador.



Figura 4.1: Simulador – Misturador e Nodulizador Tambor.

Misturador/Nodulizador Intensivo Vertical → Misturador Eirich – O misturador Eirich (Figura 4.2) de escala piloto é um misturador com inclinação fixa em 20°, capacidade de preparação de até 150kg/batelada, tem uma ferramenta de mistura em formato estrela com velocidade variável de 0 a 368rpm. A cuba tem velocidade fixa em 28rpm, mas pode trabalhar no sentido horário ou anti-horário com velocidade variável.

O misturador possui um sistema de dosagem de água, que simula o sistema de aspersão utilizado em misturadores industriais permitindo a umidificação durante o processo de mistura/nodulização.



Figura 4.2: Simulador – Misturador e Nodulizador Intensivo Vertical.

Disco pelletizador → Disco Lürgi – O disco pelletizador (Figura 4.3) de escala piloto tem diâmetro interno de 800mm, velocidade de rotação variando de 10 a 25rpm, podendo ser alterada através de um inversor de frequência instalado junto ao motor elétrico do equipamento e variação de ângulo de trabalho de 35° a 50°. Sua capacidade máxima pode chegar as 70kg de mistura e normalmente é controlada pelo operador que faz os ajustes de tempo de acordo com o tamanho objetivo da pelota ou quase-partícula a ser produzida.



Figura 4.3: Simulador – Disco pelletizador.

Misturador/Nodulizador Intensivo horizontal → Misturador Lödige – O misturador Lödige (Figura 4.4) de escala piloto tem velocidade de rotação do eixo principal variando de 0 a 120rpm, podendo ser alterada através de um inversor de frequência instalado junto ao motor elétrico do equipamento.

Para misturar, o padrão recomendado pelo fabricante é de uma velocidade de rotação do eixo de 119rpm e uma ocupação máxima de 114kg/batelada.

Para nodulização, o padrão recomendado pelo fabricante foi de uma velocidade de rotação do eixo de 80rpm e 80kg/batelada.



Figura 4.4: Simulador – Misturador e Nodulizador Intensivo Horizontal.

Sistema de exaustão/queima – O sistema (Figura 4.5 A e B) consiste na simulação do processo de sinterização de forma estática, replicando a altura do leito e as condições de perda de carga aplicada em um processo de sinterização industrial.

O sistema pode ser simulado a frio e a quente dependendo do objetivo do estudo e seus principais equipamentos são:

- Um ventilador de rotor centrífugo, com um rotor de diâmetro de 890mm e 12 pás e motor de fase tripla, responsável por imprimir a perda de carga desejada no sistema com capacidade máxima de 1800mmCA na caixa de vento do sistema;
- Uma panela, conectada ao restante do sistema, que propicia a transferência da perda de carga gerada pelo ventilador à panela. Esta panela pode apresentar variação em sua altura total e essa altura depende do objetivo do estudo desenvolvido e condições de processo durante a simulação.

O sistema conta com um supervisor e um banco de dados que permite armazenar e acompanhar os parâmetros de processo *online* durante os ensaios.

Logo, a parte de simulação referente aos ensaios de permeabilidade do leito e queima propriamente dito contam com um nível de instrumentação que permite a operação autônoma do sistema durante os ensaios.

A Figura 4.5 a seguir ilustra uma vista geral do sistema, considerando a panela, os dutos de conexão ao ventilador como também a tela principal do supervisório, onde os principais comandos e *setups* do sistema são acionados.

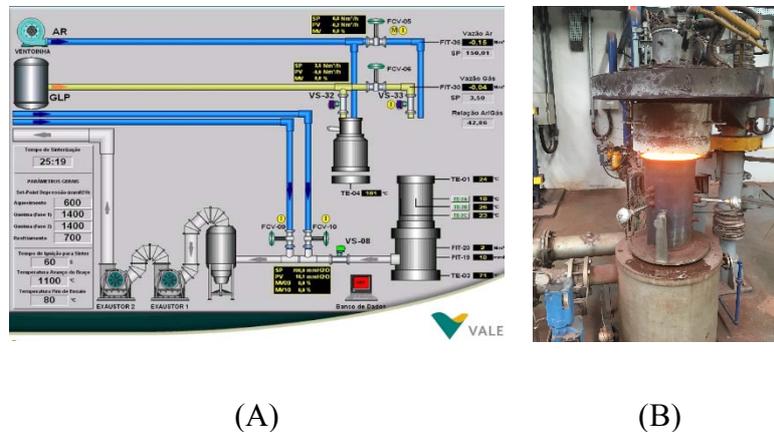


Figura 4.5: (A) Sistema Supervisório e (B) Planta Piloto.

A associação destes equipamentos foi utilizada de diversas formas para simulação de condições de interesse do presente estudo.

4.3 Procedimentos de Simulação Piloto – Avaliação de Desempenho de Aglomeração a Frio

Os procedimentos de simulação piloto utilizados foram baseados no procedimento desenvolvido e padronizado pelo CTF. Algumas adaptações foram necessárias devido à particularidade de rotas e/ou equipamentos utilizados durante a execução do plano de experimentos proposto.

Simulação da rota HPS – De acordo com cada balanço de massa referente a cada condição pré-determinada no plano de experimentos, a mistura a sinterizar foi submetida à sequência de equipamentos: (i) misturador tambor; (ii) disco; (iii) nodulizador tambor. A Figura 4.6 apresenta o fluxo principal da mistura durante o processo de simulação desta rota, apresentando os principais *setups* utilizados:

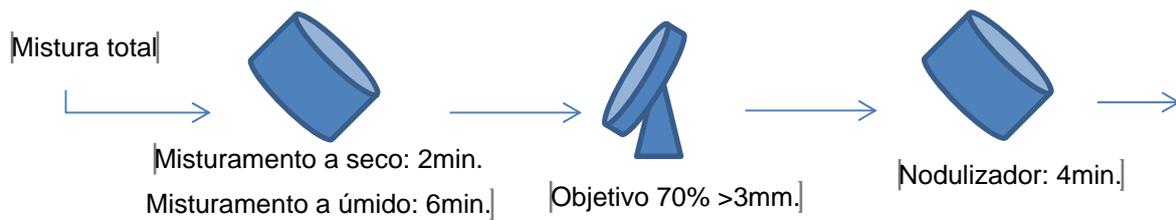


Figura 4.6: Fluxo de simulação do processo HPS.

Nesta condição foi considerada a substituição do equipamento misturador tambor pelo misturador intensivo horizontal com os seguintes parâmetros operacionais:

- Velocidade do eixo principal: 119rpm;
- Taxa de ocupação 40%, o que resultou aproximadamente 65kg de mistura a sinterizar, base úmida.

O objetivo principal desta substituição foi identificar algum *gap* de desempenho de mistura, se por acaso ele existisse.

Simulação da rota PWT (*Paul Wurth Technology*) – De acordo com o balanço de massa referente a cada condição pré-determinada no plano de experimentos (que será apresentado a seguir), as matérias-primas, separadas por definição, foram preparadas em duas rotas distintas, sendo o *pellet feed* e a bentonita preparados na rota sendo composta pelos equipamentos: (i) misturador intensivo vertical e (ii) disco. As outras matérias-primas que compuseram a mistura a sinterizar foram preparadas em outra rota, utilizando um misturador tambor.

O material resultante de cada rota de preparação foi unificado em um só fluxo que alimentou o equipamento nodulizador tambor, que teve nesta etapa a função de homogeneização dos fluxos de cada rota de preparação distinta. A Figura 4.7 apresenta cada fluxo distinto e a unificação dos fluxos, apresentando os principais *setups* utilizados:

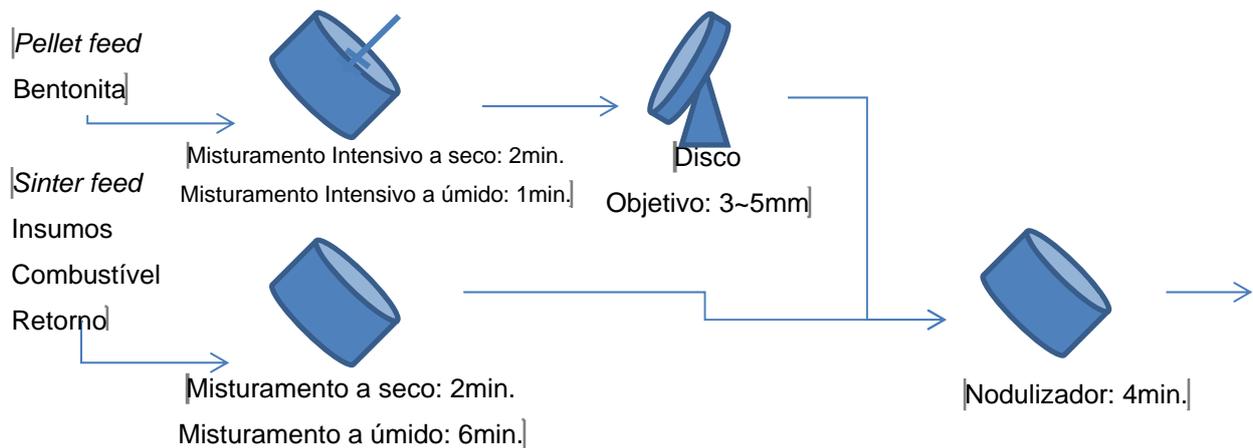


Figura 4.7: Fluxo de simulação do processo PWT.

Nesta rota, o misturador tambor também foi substituído pelo misturador intensivo horizontal com o mesmo objetivo de identificar algum *gap* de desempenho de mistura.

Simulação da rota ALT (Alternativa) – De acordo com o balanço de massa referente a cada condição pré-determinada no plano de experimentos, as matérias-primas foram preparadas em duas rotas distintas, sendo o *pellet feed* e a bentonita preparado na rota compoendo os seguintes equipamentos: (i) misturador intensivo vertical e (ii) nodulizador intensivo horizontal.

As outras matérias-primas que compuseram a mistura a sinterizar foram preparadas em outra rota, utilizando um misturador tambor. A Figura 4.8 apresenta cada fluxo distinto e a unificação dos fluxos, apresentando os principais *setups* utilizados:

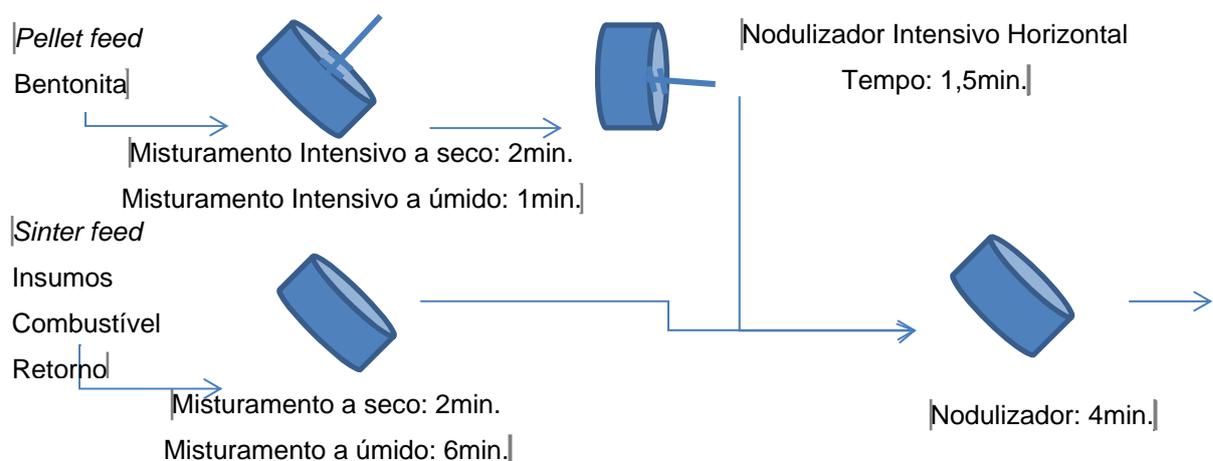


Figura 4.8: Fluxo de simulação do processo ALT.

Nesta rota, o misturador intensivo vertical foi substituído pelo misturador intensivo horizontal, com a finalidade de comparação das tecnologias intensivas de mistura e nodulização.

4.4 Planejamento de Experimentos

A Tabela 4.1 apresenta o planejamento de experimentos utilizados durante as simulações. As séries de simulações realizadas visaram experimentar as tecnologias propostas, as condições de processos que foram julgadas importantes ao que tange o manuseio de finos e o desempenho da etapa de aglomeração a frio do processo de sinterização.

Além dos equipamentos e a disposição deles em cada rota, a dosagem do ligante e a dosagem de água (aglomerante) foram experimentadas em níveis pré-determinados. Isso se fez necessário para o entendimento do impacto de cada uma dessas condições e desempenho do processo.

Baseado no planejamento de experimentos apresentado, as simulações foram realizadas para verificação do desempenho a frio das rotas e equipamentos utilizando a metodologia do JPU.

Os resultados de JPU foram utilizados para definir a umidade ótima da mistura e determinar quais seriam submetidas ao ensaio de *pot grate*.

4.5 Avaliação de Desempenho a Frio e Determinação de Umidade Ótima

O desempenho das simulações foi avaliado considerando o resultado da medição do JPU relativo a cada rota específica. As 60 condições previstas no planejamento de experimentos foram simuladas considerando os níveis de umidade, dosagem de cal, bentonita e finos.

Para auxiliar o entendimento do comportamento a frio das misturas, uma amostra de cada melhor condição selecionada para o *pot grate*, foi reservada para realização de uma análise microscópica da quase partícula.

4.5.1 Procedimento de Determinação do JPU

O ensaio de JPU utilizado para avaliações foi baseado na medição de vazão de ar a temperatura ambiente, resultado da perda de carga do sistema de exaustão. A perda de carga foi estipulada mediante a referência da mesma aferida na caixa de vento, quanto à realização das simulações a quente (testes de *pot grate*).

Para a realização das simulações uma massa padrão de 60kg de mistura a sinterizar (base seca) foi submetida ao ensaio de JPU para a avaliação do desempenho a frio do material resultado de cada simulação.

Nestas simulações, foi utilizado uma panela de inox com dimensões 300mm (diâmetro interno superior) e 270mm (diâmetro interno inferior). A altura do leito foi de 550mm. A perda de carga considerada para avaliação foi de 1500mmH₂O, referência caixa de vento, sendo que após 1 minuto de estabilização da referida perda de carga, a vazão resultante de cada leito foi aferida e submetida a equação de cálculo do JPU (equação 3.1, capítulo 3.3) para cada condição proposta.

O procedimento utilizado para medição do JPU foi baseado nas informações publicadas por CARNERO^[14] e LUDIVINE^[17] em seus respectivos estudos de avaliação de misturas.

4.5.2 Procedimento de Análise Microscópica da Quase Partícula

A forma, quantidade, tamanho da quase partícula é uma resposta importante que está diretamente associada ao processo de preparação das misturas a sinterizar. É de conhecimento que o comportamento, mecanismos de formação e rendimento desta etapa está associado às características intrínsecas da matéria-prima, da tecnologia aplicada à etapa de preparação como também das condições operacionais e de processo.

Durante este estudo, tentou-se ao máximo evitar a influência das características intrínsecas das matérias-primas, mantendo os componentes das misturas constantes durante todo o estudo, sendo variada apenas a participação em massa mediante a necessidade do balanço.

A análise microscópica visou identificar as partículas que funcionaram como nucleantes para mistura e a identificação das partículas que não participaram do processo de aglomeração a frio. Assim esta análise consiste em identificar de forma qualitativa os principais nucleantes, aderentes e partículas que não participam do processo e se comportam como “inertes”.

A Figura 4.9 apresenta uma referência de uma quase partícula tomada como partícula ideal, de acordo com VIEIRA^[15] e um exemplo de aplicação do procedimento desenvolvido e aplicado pelo CTF. Baseado na figura utilizada na análise, uma imagem espelho é criada e de acordo com seu formato, por análise de imagem, é classificada como nucleante ou aderente.



Figura 4.9: (1) Partícula ideal e (2) caso exemplo CTF.

Para realização dos ensaios, alíquotas das misturas foram retiradas ao final de cada simulação, imediatamente antes do carregamento na panela. A massa de amostra obtida foi encaminhada diretamente ao laboratório onde foram peneiradas e selecionadas três faixas granulométricas para serem trabalhadas, sendo elas: (i) partículas maiores que 4,76mm, (ii) partículas maiores

do que 2,83mm e (iii) partículas maiores que 1,00mm. Em seguida, cada uma dessas três faixas granulométricas foi embutida em resina epóxi e submetida ao procedimento de polimento para confecção de seção polida para análise em microscópio. Foi utilizado um microscópio automático de luz refletida da marca Carl Zeiss, modelo AxioImage ZEM, com analisador de imagens e *softwares* de tratamento. Para identificação e análise das quase partículas, separada por faixas granulométricas, foram obtidos mosaicos em cada amostra embutida, com luz refletida em campo claro e objetiva de 5x. Os mosaicos foram obtidos com ajuste de autofoco a cada quadro.

As descrições qualitativas das amostras levaram em consideração três categorias de partículas:

- Quase partícula – aglomeradas mediante a participação de um nucleante;
- Micropelotizadas – partículas finas aglomeradas sem a participação de nucleantes;
- Partículas não aglomeradas – que efetivamente não participaram da aglomeração a frio.

4.5.3 Procedimento de Determinação de Umidade Ótima

Levando em considerações as citações de CARNEIRO^[14] e LUDIVINE^[17], a umidade ótima de cada condição foi definida mediante os resultados de JPU.

Os resultados foram plotados em gráficos de coordenadas tipo (x,y), onde x representou os valores de umidade e y representou os valores de JPU aferidos de cada mistura. O ponto de máximo na curva obtida, rebatido no eixo y foi determinado como a umidade ótima de cada mistura.

Foi convencionada tal condição pelo simples entendimento de que a permeabilidade está diretamente correlacionada ao desempenho a frio do processo de aglomeração, e também, dentro do âmbito da análise proposta, a umidade era a variável regente do fenômeno de aglomeração juntamente com o ligante. Portanto a umidade que resultou o máximo valor de JPU foi considerada com umidade ótima da mistura e utilizada como valor de umidade objetivo para os testes de *pot grate*.

4.6 Procedimento de Testes em *Pot Grate* e Caracterização Tecnológica dos Sínters Produzidos

Mediante os resultados de desempenho das simulações piloto a frio, as 8 (oito) melhores condições das simulações realizadas foram submetidas a etapa de avaliação a quente.

O procedimento de testes em *pot grate* consiste em realizar a simulação do processo de sinterização a quente, que abrange as etapas de carregamento da máquina, ignição superficial da mistura a sinterizar, queima da mistura, resfriamento e desagregação do bloco de sínter resultante do processo.

Para a condição de simulação a quente do processo, as seguintes condições de processo foram consideradas:

- Altura do leito de Sinterização: 550mm;
- Tempo de ignição da mistura: 1,5 minutos;
- Perda de carga do leito:
 - Durante o tempo de ignição: 600mmca;
 - Durante o tempo de queima: 1500mmca;
 - Durante o tempo de resfriamento: 700mmca.

Após a queima, o bloco de sínter de cada condição simulada foi submetido à etapa de desagregação, que simula o processo de ajuste da granulometria pós-queima. Essa simulação é realizada em um tambor desagregador (Padrão ASTM), com dimensões de diâmetro de 914mm e altura de 457mm, rotação fixa em 25rpm, sendo o material submetido a desagregação durante 50 voltas.

A metodologia de simulação utilizada obedeceu ao padrão Francês de simulação determinando que as queimas piloto sejam realizadas com balanço de finos de retorno ($\geq 98\%$, **valor de retorno obtido**, $\leq 102\%$). Para esse controle foi adicionado/retirado combustível sólido à mistura até que a quantidade de finos de retorno dosada na mistura total se apresentasse igual à quantidade de finos de retorno gerada durante a etapa de degradação

do bloco de sínter. Para que tal condição fosse possível, foi necessário realizar queimas prévias de cada condição simulada para geração do retorno específico.

As principais variáveis de processo avaliadas foram: (i) produtividade (t/m^2 dia); (ii) tempo de sinterização; (iii) perfis de temperaturas de ignição e processo; (iv) consumo de combustível sólido.

Relativo à caracterização tecnológica dos sínters obtidos, as seguintes avaliações foram feitas: (i) análise química (Fe_t , FeO , SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO , P , Mn , TiO_2 , Na_2O , K_2O e PPC); (ii) distribuição granulométrica ISO 4701; (iii) Tamboramento ISO 3271 (*Abrasion Index and Tumbler Index*); (iv) Queda JIS M8711; (v) RDI - *Reduction Degradation Index* ISO 4696-2 e (vi) Redutibilidade ISO 7215.

Em conjunto com os resultados de desempenho a frio, os dados foram avaliados com objetivo de verificar se as tecnologias propostas, de acordo com as condições de processo pré-determinadas, permitem utilizar uma mistura a sinterizar com participações de finos maior do que 40%.

5 Resultados e Discussão

Inicialmente a análise da caracterização tecnológica das matérias-primas foi utilizada para entendimento dos efeitos da granulometria, do tamanho das partículas na mistura de minérios e na mistura total e do efeito da qualidade química na mistura total e os sínters gerados em cada condição.

A Tabela 5.1 apresenta a qualidade química das matérias-primas que compuseram a mistura total.

Tabela 5.1: Qualidade química das matérias-primas utilizadas para composição das misturas (%).

Matéria-prima	Fet	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn	CaO	MgO	TiO ₂	PPC	Na ₂ O	K ₂ O
<i>Sinter feed</i>	62,10	7,16	1,02	0,053	0,203	0,084	0,104	0,062	2,11	0,010	0,018
<i>Pellet feed</i>	67,91	1,51	0,367	0,019	0,039	0,069	0,014	0,060	0,730	0,010	0,004
Bentonita	4,92	52,93	20,48	0,014	0,121	1,95	2,98	0,345	10,10	-	-
Calcário dol.	3,06	5,80	0,390	0,013	0,467	28,305	17,518	0,034	42,60	-	-
Calcário cal.	0,43	3,78	0,73	0,049	0,086	51,852	0,662	0,032	41,42	-	-
Cal Virgem	0,44	3,32	0,522	0,071	0,029	84,85	0,396	0,028	7,45	-	-
Quartzito	0,39	98,24	0,21	0,002	0,043	-	0,024	0,008	0,17	-	-

A Tabela 5.2 apresenta a análise imediata e química dos combustíveis sólidos utilizados na mistura total.

Tabela 5.2: Análise imediata/química dos combustíveis sólidos (%).

Amostras	Carbono fixo	Matéria Volátil	Cinzas	Umidade (%)
<i>Coke Breeze</i>	84,98	3,06	11,96	1,80
Antracito	73,47	10,17	16,36	3,34

Cinzas (%)	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	MnO	CaO	MgO	TiO ₂	PPC
<i>Coke Breeze</i>	8,88	58,66	23,75	0,641	0,078	2,04	0,861	1,21	0,300
Antracito	6,84	56,30	22,54	0,466	0,065	2,85	0,938	1,14	0,580

Quanto à caracterização física, a Tabela 5.3 apresenta cada matéria-prima utilizada quanto ao percentual retido simples nas malhas indicadas:

Tabela 5.3:Distribuição granulométrica.

Matéria-Prima	Malha/TM em mm; % retido simples											TM
	9,52	6,30	4,75	3,36	1,00	0,500	0,250	0,150	0,106	0,045	<0,045	
<i>Sinter feed</i>	5,41	9,73	5,88	14,25	12,99	6,36	6,78	6,86	4,36	11,16	16,22	2,66
<i>Pellet feed</i>	-	-	-	-	0,94	0,83	2,28	12,40	17,79	45,25	20,51	0,12
Bentonita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12,33	87,67	0,03
Calcário dol.	-	-	-	0,24	19,58	37,76	-	32,89	-	4,23	5,30	0,79
Calcário cal.	-	-	-	0,07	43,98	24,85	19,26	6,51	2,38	2,75	0,20	1,24
Cal Virgem	-	-	-	-	-	0,01	0,17	0,80	1,23	1,74	96,09	0,03
Quartzo	-	-	-	0,40	62,11	19,8	13,85	3,50	-	-	0,34	1,58
Comb. Sólido	-	0,84	3,23	7,83	27,80	9,23	22,22	12,54	4,94	4,53	6,83	1,36

O *sinter feed* utilizado apresentou um % <0,150mm de 31,74%, sendo este valor dentro dos limites operacionais das principais operações de sinterização de minério de ferro nacional.

5.1 Avaliação de Desempenho a Frio e Determinação de Umidade Ótima

Baseando-se nos balanços de massa para cada condição e rotas propostas, considerando as premissas pré-estabelecidas no capítulo 4, a Tabela 5.4 apresenta a participação em massa, base seca, dos componentes das misturas a sinterizar propostas para rota HPS:

Tabela 5.4: Partição em massa (%) de cada componente da mistura – referência: base seca.

Comp.	HPS40 – ca14,5		HPS60 – ca14,5		HPS80 – ca14,5		HPS60 – ca15,0		HPS80 – ca15,0	
	MP	MT								
M. Minérios	78,13	51,96	84,61	56,27	88,50	58,86	84,94	56,48	87,77	58,37
Calcário dol.	4,96	3,30	5,60	3,72	6,16	4,09	5,64	3,75	6,14	4,09
Calcário cal.	12,41	8,25	5,29	3,52	-	-	4,42	2,94	-	-
Cal Virgem	4,5	2,99	4,50	2,99	4,50	2,99	5,00	3,33	5,00	3,33
Quartzo	-	-	-	-	0,84	0,56	-	-	1,08	0,72
Combustível	-	3,50	-	3,50	-	3,50	-	3,50	-	3,50
Retorno	-	30,00	-	30,00	-	30,00	-	30,00	-	30,00

As qualidades químicas previstas de cada sínter da rota HPS podem ser verificadas na Tabela 5.5:

Tabela 5.5: Qualidade química dos sínters das condições simuladas na rota HPS (%)

Condições	Fet	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn	CaO	MgO	TiO ₂	B ₂	VE
HPS40 – ca14,5	54,91	6,59	1,21	0,055	0,23	11,86	1,20	0,050	1,80	20,85
HPS60 – ca14,5	58,23	5,04	1,06	0,045	0,19	9,08	1,20	0,053	1,80	16,38
HPS80 – ca14,5	60,67	3,94	0,91	0,034	0,14	7,09	1,20	0,055	1,80	13,14
HPS60 – ca15,0	58,25	5,03	1,06	0,045	0,19	9,06	1,20	0,052	1,80	16,35
HPS80 – ca15,0	60,33	4,11	0,91	0,034	0,14	7,40	1,20	0,054	1,80	13,62

O já esperado impacto positivo do aumento da participação dos finos na qualidade química é realmente comprovado. O aumento do % de ferro total contido no sínter, considerando o aumento gradativo da participação dos finos de 40 para 80%, ficou da ordem 10%, em quanto houve também a redução do volume de elementos de ganga da ordem de 58%.

O desempenho a frio verificado em cada condição simulada é apresentado na Tabela 5.6:

Tabela 5.6: Resultados de desempenho a frio tecnologia HPS.

% finos	% cal virgem	% umidade	Vazão de ar (Nm³/h)	JPU
40	4,5	6,5	90,14	13,61
		7,0	96,51	14,60
		7,5	104,56	15,83
		8,0	81,82	12,42
60	4,5	7,5	63,37	9,64
		8,0	81,50	12,39
		8,5	102,08	15,51
		9,0	45,16	6,79
80	4,5	7,5	51,15	7,73
		8,0	53,52	8,05
		8,5	59,32	9,01
		9,0	54,38	8,24
60	5,0	7,5	53,57	8,06
		8,0	59,80	9,08
		8,5	57,51	8,70
		9,0	41,95	6,33
80	5,0	7,5	54,38	8,20
		8,0	68,52	10,42
		8,5	62,37	9,41
		9,0	62,37	9,41

Com base nas análises de JPU dos dados simulados, a condição de melhor desempenho quanto à aglomeração a frio foi a condição simulada com 40% de finos e 7,5% de umidade, considerando a dosagem de cal em 4,5%. A Figura 5.1 apresenta de forma gráfica esses resultados:

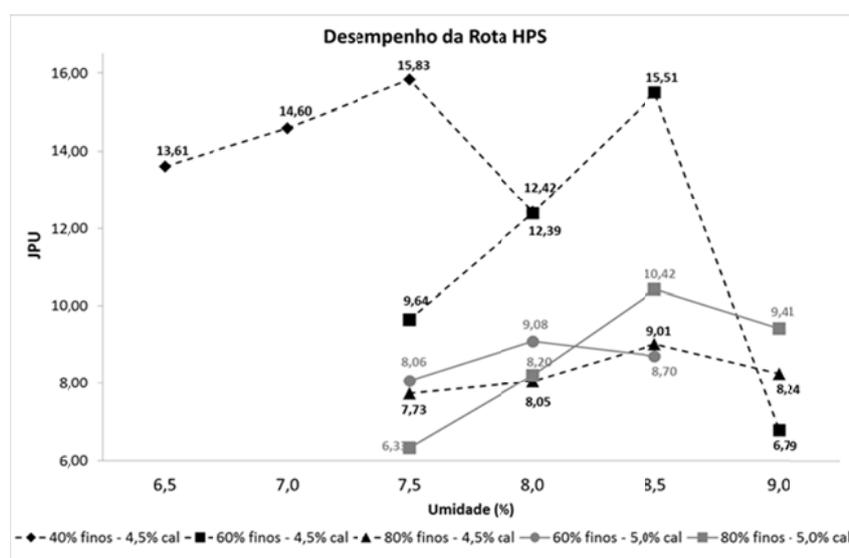


Figura 5.1: Desempenho de aglomeração a frio da rota HPS.

Verificou-se ainda que houve uma tendência de elevação da umidade para atingir o ponto de máximo JPU com o aumento da participação de finos. O aumento de finos resultou na redução gradativa do JPU sinalizando uma queda de desempenho do processo de aglomeração a frio.

A tentativa de aumentar a dosagem de cal para retomada do bom desempenho obtido na condição com 40% de finos não foi bem-sucedida ao ponto de considerar o aumento uma alternativa técnica para viabilização da operação.

A Tabela 5.7 apresenta a distribuição granulométrica da mistura a sinterizar submetida aos ensaios, sendo esta distribuição relativa à condição antecessora a etapa de aglomeração à frio.

Tabela 5.7: Distribuição granulométrica das misturas antes de serem submetidas a rota HPS.

Condições	Malha/TM em mm ; % retido simples				TM	N/A
	>6,35	<6,35; >1,00	<1,00; >0,150	< 0,150		
HPS40 – cal 4,5	8,05	42,86	22,20	26,89	2,32	1,59
HPS60 – cal 4,5	5,14	34,71	19,91	40,24	1,78	0,86
HPS80 – cal 4,5	1,67	26,24	17,97	54,12	1,17	0,48
HPS60 – cal 5,0	5,15	34,49	19,68	40,68	1,77	0,85
HPS80 – cal 5,0	1,67	26,32	17,95	54,06	1,17	0,49

Quanto à análise da distribuição granulométrica, o aumento da participação de finos teve interferência significativa na relação nucleante/aderente da mistura.

Foi possível identificar a correlação existente entre do desempenho a frio das misturas com a relação nucleante/aderente (N/A). A permeabilidade do leito tendeu a ser melhor com o crescimento da relação nucleante/aderente, com $r=0,73$; porém os resultados obtidos entre as condições HPS60 – cal 4,5 e HPS60 – cal 5,0 foram consideravelmente diferentes, apesar de apresentarem a mesma distribuição granulométrica, mostrando que o efeito da cal foi significativo, melhorando o rendimento do processo de aglomeração a frio. O balanço de CaO para fechamento da basicidade binária influenciou na dosagem de calcário calcítico de cada condição, onde pelo mesmo efeito do fechamento, a condição com maior dosagem de cal apresentou uma menor dosagem de calcário calcítico, por consequência. A Figura 5.2 apresenta a correlação entre a relação nucleante/aderente e o JPU.

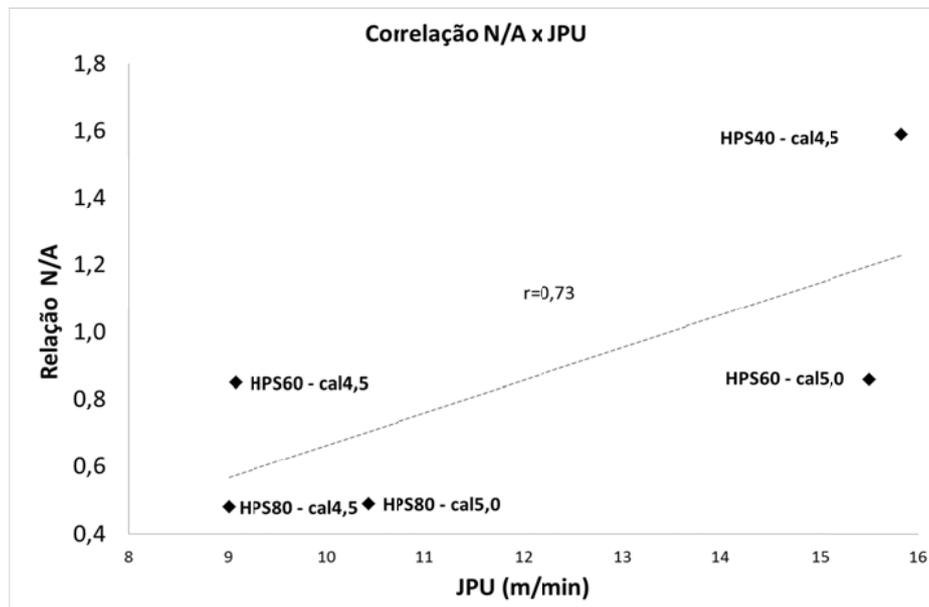


Figura 5.2: Correlação entre a relação nucleante/aderente e o JPU.

Apesar de correlação significativa entre a relação nucleante/aderente e o desempenho das misturas quanto à aglomeração a frio, considerando a rota HPS, os resultados não explicam a diferença de comportamento entre as condições simuladas na rota HPS, ambas com 60% de finos, porém com dosagem diferentes de cal (4,5% e 5,0%). Uma hipótese considerada é que para o nível de *pellet feed* considerado, o aumento da dosagem de cal não foi significativo, porém ultrapassar este valor não é uma prática industrial comum no âmbito nacional, sendo decidido não ultrapassar esse valor (5,0%).

Outra hipótese verificada foi a de que pudesse haver algo associado à distribuição e homogeneidade da cal com o aumento de dosagem, entendendo que o misturador tambor tem suas limitações em relação à eficiência de mistura. Logo, distribuição e homogeneidade poderiam ter ficado comprometidas e por consequência o desempenho em dosagens mais elevadas.

Como no plano de experimentos já haviam condições previstas de substituir o misturador tambor pelo misturador intensivo horizontal (MIH), os resultados adicionais foram avaliados usando a mesma métrica para verificação se poderia ser uma deficiência em relação à capacidade de mistura do misturador tambor. A Figura 5.3 apresenta a compilação dos resultados de desempenho da mistura na rota HPS considerando os melhores resultados de cada configuração.

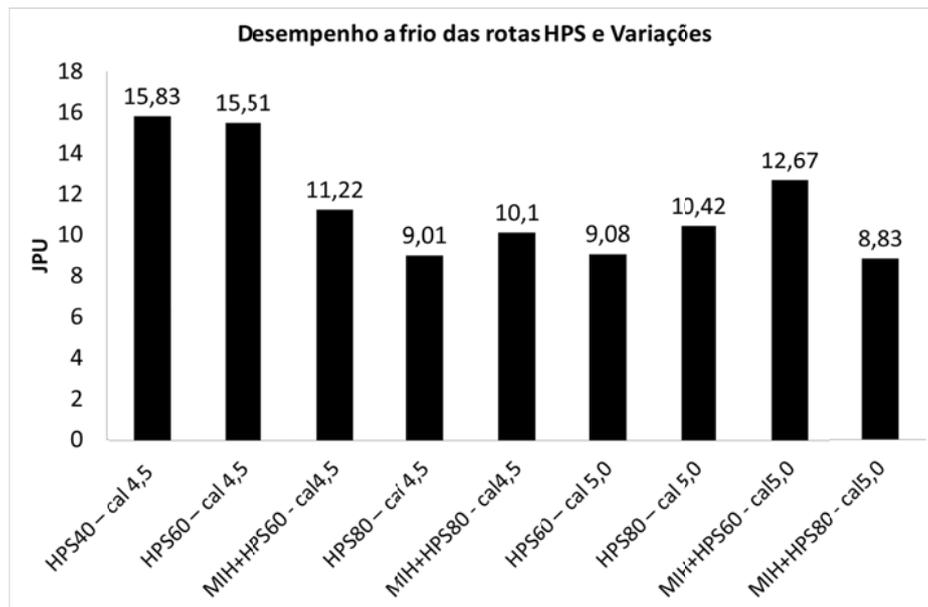


Figura 5.3: Desempenho a frio da rota HPS e Variações.

Verificou-se uma tendência de melhora ao substituir o misturador tambor pelo MIH, principalmente quando se teve um cenário de intensificação de afinamento da mistura e aumento da dosagem de cal.

Porém, foi percebida uma grande diferença entre o comportamento da umidade do material, onde o material resultante da simulação utilizando o MIH apresentou um aspecto visual de estar mais úmido, quando comparado ao material resultante da simulação utilizando o misturador tambor. A Figura 5.4 apresenta o aspecto visual que se repetiu em todas as simulações que foram feitas ao se substituir o misturador tambor pelo misturador intensivo horizontal.

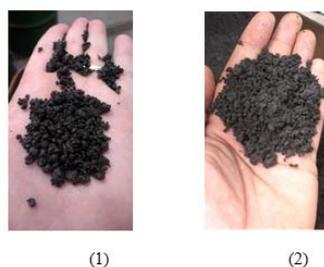


Figura 5.4: Simulações - (1) rota HPS com misturador tambor e (2) rota HPS com MIH.

Apesar de apresentarem a mesma umidade contida, o material resultante da simulação com MIH apresentou, sem exceção, o aspecto semelhante ao visualizado em todas as simulações.

Notou-se claramente que o material não apresentava a mesma condição de formação da quase partícula nas simulações que foram utilizadas o MIH, que certamente influenciou de forma negativa no desempenho a frio como foi apresentado no comparativo de resultados.

Durante o planejamento de experimentos, para simplificação e otimização do estudo, adotou-se como premissa que a umidade ótima identificada durante o processo de simulação da rota principal de cada condição seria utilizada como a umidade de execução dos testes de substituição de tecnologia de mistura, sendo visto na prática que não foi uma decisão correta devido ao impacto negativo no desempenho das condições que utilizaram o MIH.

Tomando-se ainda os resultados apresentados na Tabela 5.6 e considerando o procedimento de determinação de umidade ótima apresentado no capítulo 4, a Tabela 5.8 apresenta os resultados de umidade ótima de cada condição baseando no menor resultado de JPU apresentado de cada condição simulada.

Tabela 5.8: Umidade Ótima da rota HPS e Variações.

Condições	Umidade ótima (%)	Observações
HPS40 – cal 4,5	7,50	-
HPS60 – cal 4,5	8,50	-
HPS80 – cal 4,5	8,50	-
HPS60 – cal 5,0	8,00	-
HPS80 – cal 5,0	8,50	-
MIH+HPS60 - cal4,5	8,50	Replicado o valor definido na condição HPS60 – cal4,5
MIH+HPS60 - cal5,0	8,00	Replicado o valor definido na condição HPS60 – cal5,0
MIH+HPS80 - cal4,5	8,50	Replicado o valor definido na condição HPS80 – cal4,5
MIH+HPS80 - cal5,0	8,50	Replicado o valor definido na condição HPS80 – cal5,0

Através do registro fotográfico de cada amostra composta pelas condições simuladas, foi possível a realização de uma análise qualitativa dos produtos gerados.

Notou-se a variação granulométrica entre as condições simuladas, o que tem grande influência na permeabilidade do leito e por consequência no desempenho das misturas. A variação granulométrica remeteu a limitação da capacidade de manuseio da tecnologia de mistura e nodulização proposta nesta rota, reforçando a condição já conhecida e aplicada industrialmente quanto à tecnologia HPS, acima de 40% o processo se torna instável e principalmente a condição de aumento da dispersão granulométrica da mistura prejudica de

forma considerável o processo de sinterização como um todo. A Figura 5.5 apresenta estas imagens.

		
HPS40 – cal 4,5	HPS60 – cal 4,5	HPS80 – cal 4,5
		
HPS60 – cal 5,0	HPS80 – cal 5,0	MIH+HPS60 – cal 4,5
		
MIH+HPS60 - cal 5,0	MIH+HPS80 - cal 4,5	MIH+HPS80 - cal 5,0

Figura 5.5: Registro de imagens do produto das simulações da rota HPS e variações.

O mesmo padrão de simulações foi utilizado para condições pré-determinadas na rota PWT e ALT, haja visto que as rotas utilizaram a mesma mistura a sinterizar com tecnologias de mistura e nodulização diferentes. Os balanços de massa para geração das misturas a sinterizar foram baseados também nas premissas de qualidade definidas no capítulo 4 e são apresentados na Tabela 5.9.

Tabela 5.9: Partição em massa (%) de cada componente da mistura – referência: base seca – PWT e ALT.

Comp.	M40F – cal2,5		M60F – cal2,5		M80F – cal2,5		M60F – cal3,0		M80F – cal3,0	
	MP	MT								
M. Minérios	74,90	49,81	81,14	53,96	88,30	58,72	81,44	54,16	88,65	58,95
Calcário dol.	4,57	3,04	5,19	3,45	5,91	3,93	5,23	3,48	5,96	3,96
Calcário cal.	17,12	11,39	10,27	6,83	2,39	1,59	9,43	6,27	1,49	0,99
Cal Virgem	2,50	1,66	2,50	1,66	2,50	1,66	3,00	2,00	3,00	2,00
Bentonita	0,90	0,60	0,90	0,60	0,90	0,60	0,90	0,60	0,90	0,60
Combustível	-	3,50	-	3,50	-	3,50	-	3,50	-	3,50
Retorno	-	30,00	-	30,00	-	30,00	-	30,00	-	30,00

As qualidades químicas previstas de cada sínter das rotas PWT/ALT podem ser verificadas na Tabela 5.10.

Tabela 5.10: Qualidade química dos sínters das condições simuladas nas rotas PWT e ALT (%).

Condições	Fet	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn	CaO	MgO	TiO ₂	B ₂	VE
M40F – cal2,5	54,14	6,91	1,34	0,055	0,23	12,45	1,20	0,053	1,80	21,91
M60F – cal2,5	57,36	5,42	1,2	0,045	0,19	9,73	1,20	0,055	1,80	17,55
M80F – cal2,5	60,94	3,74	1,04	0,034	0,14	6,74	1,20	0,058	1,80	12,72
M60F – cal3,0	57,40	5,39	1,20	0,045	0,19	9,72	1,20	0,055	1,80	17,51
M80F – cal3,0	60,97	3,73	1,04	0,034	0,14	6,71	1,20	0,057	1,80	12,68

Da mesma forma do que na condição de simulação anterior, foi verificado o impacto positivo da participação dos finos na qualidade química do sinter. O aumento do % de ferro total contido no sinter, considerando o aumento gradativo da participação de finos de 40 para 80%, ficou da ordem de 13%, sendo ligeiramente maior do que o obtido com aumento da participação de finos na rota HPS. Em relação a redução do volume de elementos de ganga, o resultado obtido foi da ordem de 73%.

O desempenho a frio verificado em cada condição simulada na rota PWT está apresentado na Tabela 5.11 a seguir.

Tabela 5.11: Resultados de desempenho a frio tecnologia PWT.

% finos	Tempo de homog. (min.)	Velocidade Rotação (rpm)	% cal virgem	% umidade	Vazão de ar (Nm ³ /h)	JPU
40	4,0	12	2,5	6,5	91,98	13,80
	4,0	12		7,0	97,29	14,70
	4,0	12		7,5	73,82	11,14
	2,0	12		7,0	72,91	11,04
60	4,0	12	2,5	6,5	72,42	10,94
	4,0	12		7,0	77,55	11,80
	2,0	12		7,0	92,88	14,10
	1,5	12		7,0	86,03	13,10
	2,0	8		7,0	80,32	12,16
	4,0	12		7,5	76,75	11,65
	4,0	12		8,0	67,19	10,23
80	4,0	12	3,0	7,0	66,26	10,09
	4,0	12		7,5	67,31	10,22
	4,0	12		8,0	77,20	11,73
	2,0	12		8,0	91,18	13,80
	2,0	8		8,0	102,67	15,60
	2,0	12		7,0	84,01	12,75
60	2,0	12	3,0	7,5	93,32	14,13
	2,0	12		8,0	82,40	12,45
	2,0	8		8,0	105,27	16,00
80	2,0	8	3,0	8,5	113,65	17,19
	2,0	8		9,0	113,06	17,16
	2,0	8				

Para se atingir o objetivo de finos avaliado no estudo, a condição de 40% apresentou somente em torno de 9% do material preparado pela rota destinada a preparação do material fino (disco pelletizador).

A medida que a participação de finos foi aumentando para 60% e posterior 80% foi percebido um efeito colateral, prejudicial ao processo como todo, pois o produto da rota de preparação utilizando disco estava sendo destruído na etapa de mistura e homogeneização das duas rotas, utilizando o nodulizador tambor.

Já era esperado um produto com baixa resistência mecânica devido ao fato de estar sendo utilizado nesta rota um *pellet feed* natural (com superfície específica de 380cm²/g) aglomerado a frio com distribuição granulométrica entre 3 a 5mm.

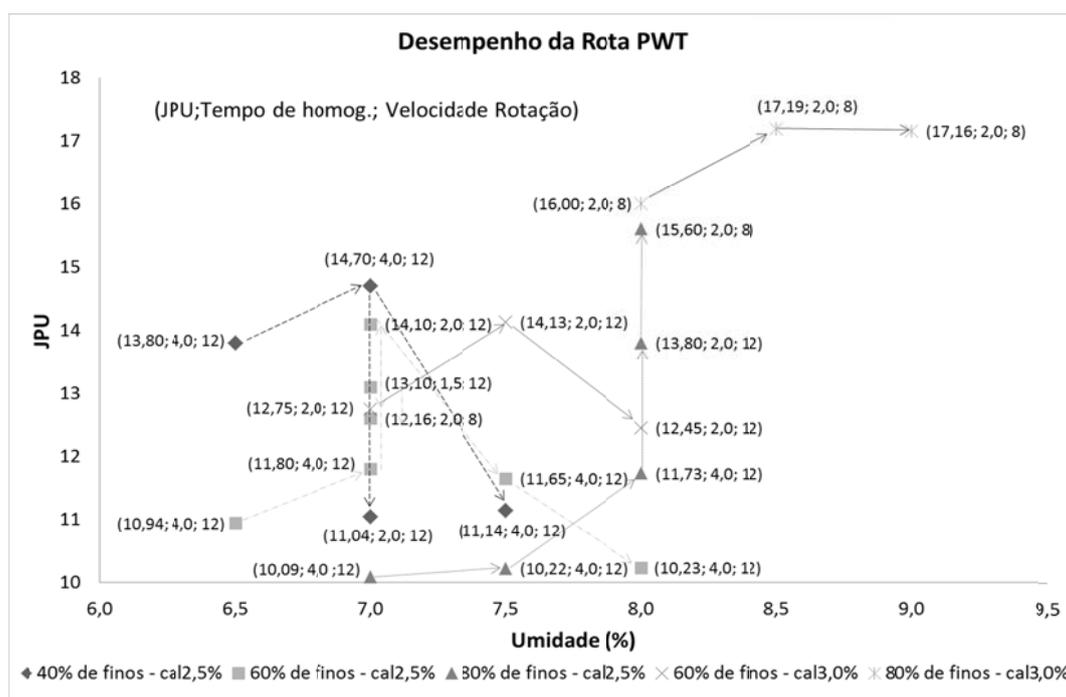
Tendo em vista esta condição, foi necessário minimizar ao máximo a energia aplicada ao processo de mistura e homogeneização final da rota, buscando não comprometer a qualidade da homogeneização, principalmente, mas tentando manter a integridade das quase partículas formadas.

As variáveis alteradas durante a própria realização dos experimentos foram à velocidade de rotação do nodulizador tambor e o tempo de mistura e homogeneização. Os resultados do JPU apurados após à alteração dos parâmetros citados mostram que as alterações foram bem-sucedidas, pois houve uma melhora considerável dos valores de JPU.

As alterações foram realizadas de modo a determinar velocidade de rotação do nodulizador tambor e o tempo de mistura e nodulização para cada situação avaliada. O aumento dos valores do JPU validou a condição como adequada, validando os *setups* experimentados como padrão para as próximas etapas do estudo.

A Figura 5.6 apresenta o desempenho a frio das misturas simuladas considerando a rota PWT. O destaque de desempenho foi a condição com 80% de finos, com umidade de 8,5%.

Figura 5.6: Desempenho de aglomeração a frio da rota PWT.



O aumento da cal trouxe um efeito benéfico e deve ser considerado para melhoria de desempenho.

O aumento da participação de finos via preparação no disco aumentou a participação de quase partículas na faixa de 3 a 5mm de forma incremental, considerando a evolução de 40 a 80% de finos. A evolução granulométrica da mistura a sinterizar, pós-eta de preparação está apresentada na Tabela 5.12, por faixa granulométrica e tamanho médio calculado.

Tabela 5.12: Resultados de desempenho a frio tecnologia PWT.

Condições	Malha/TM em mm; % retido simples				TM
	>6,35	<6,35; >1,00	<1,00; >0,150	< 0,150	
M40F – cal2,5	7,76	48,98	22,33	20,93	2,48
M60F – cal2,5	5,01	63,37	16,67	14,96	2,72
M80F – cal2,5	1,75	80,29	10,06	7,90	2,99
M60F – cal3,0	5,02	63,26	16,43	15,29	2,72
M80F – cal3,0	1,76	80,25	9,78	8,21	2,99

A Figura 5.7 apresenta, de forma gráfica, o engrossamento artificial da mistura e a redução da dispersão granulométrica com o aumento da participação dos finos.

A melhora do desempenho a frio das misturas está diretamente correlacionada com o aumento de finos, pelo fato de que os finos foram aglomerados formando quase partículas na faixa de 3 a 5mm. Sendo este aglomerado de distribuição granulométrica bem estreita, a dispersão granulométrica da mistura a sinterizar é reduzida, beneficiando a permeabilidade do leito e corroborando com os resultados de JPU encontrados.

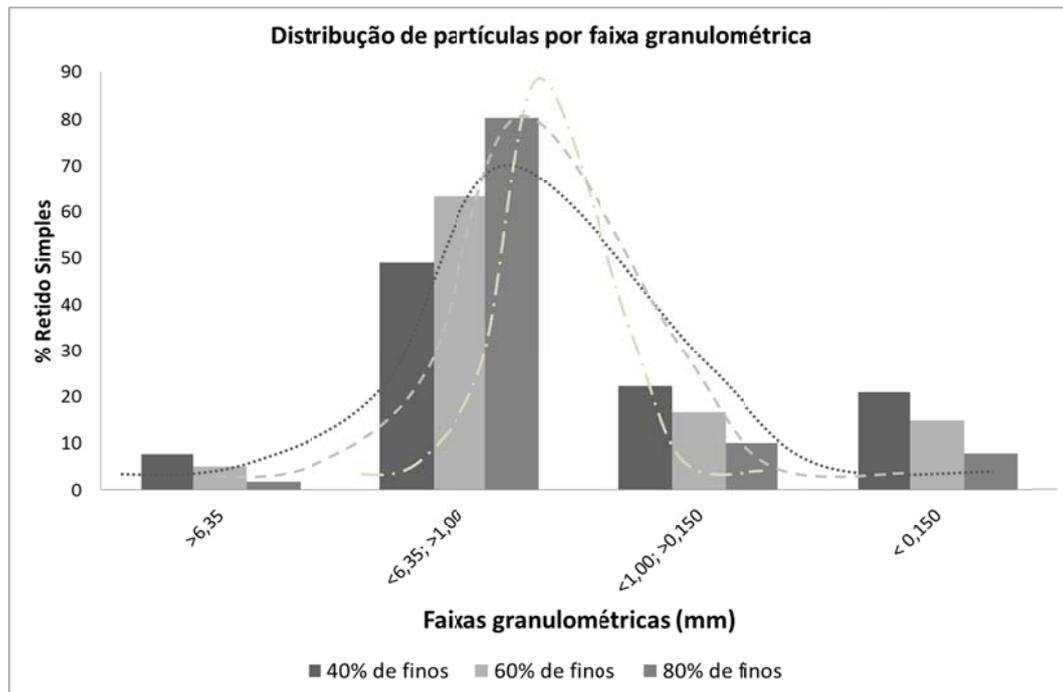


Figura 5.7: Distribuição de partículas das misturas simuladas na rota PWT.

Para verificação da hipótese de existir alguma deficiência na mistura devido à utilização do misturador tambor, o MIH também foi utilizado. A Figura 5.8 apresenta o resultado consolidado de todas as simulações referentes a rota PWT

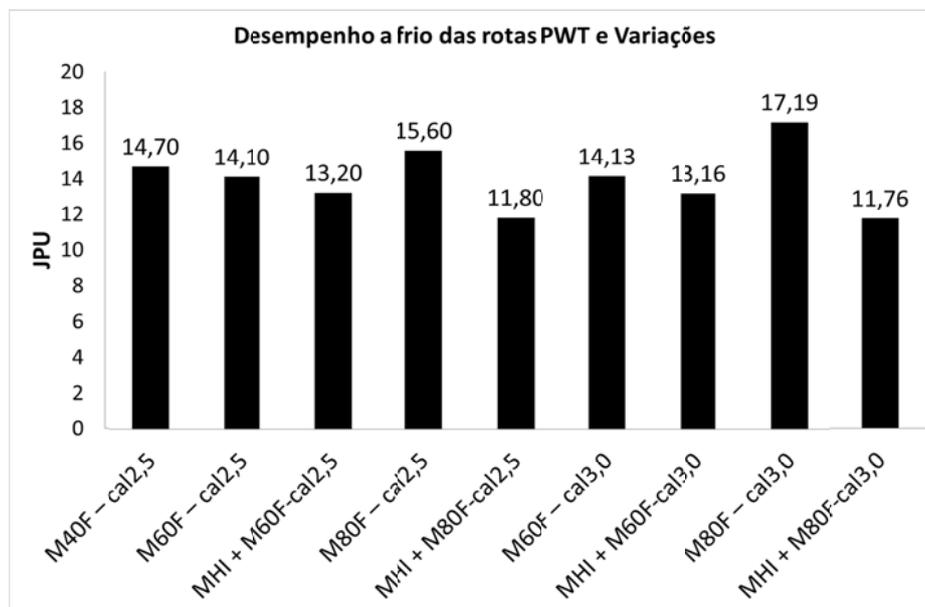


Figura 5.8: Desempenho a frio da rota PWT e variações.

A substituição do misturador tambor pelo MHI não trouxe benefícios para o desempenho da rota, resultando na piora do resultado de permeabilidade, porém o mesmo fenômeno em relação à umidade das misturas foi verificado e a mesma premissa quanto à umidade dos ensaios foi considerada. O comportamento notado reforça que em se tratando da alteração da tecnologia de mistura, a umidade de trabalho de fato é afetada.

A Tabela 5.13 apresenta os resultados de umidade ótima para cada condição simulada.

Tabela 5.13: Umidade Ótima da rota PWT e Variações.

Condições	Umidade ótima (%)	Observações
M40F – cal2,5	7,00	-
M60F – cal2,5	7,00	-
MHI + M60F-cal2,5	7,00	Replicado o valor definido na condição M60F – cal2,5
M80F – cal2,5	8,00	-
MHI + M80F-cal2,5	8,00	Replicado o valor definido na condição M80F – cal2,5
M60F – cal3,0	7,50	-
MHI + M60F-cal3,0	7,50	Replicado o valor definido na condição M60F – cal3,0
M80F – cal3,0	8,50	-
MHI + M80F-cal3,0	8,50	Replicado o valor definido na condição M80F – cal3,0

Através do registro fotográfico de cada amostra composta pelas condições simuladas, foi possível a realização de uma análise qualitativa dos produtos gerados durante as simulações.

Ao contrário do ocorrido durante as simulações na rota HPS, com o aumento da participação de finos ocorreu uma significativa redução da dispersão granulométrica da mistura a

sinterizar, o que justificou a evolução do desempenho associado ao aumento da participação de finos.

De acordo com a apuração da distribuição granulométrica entre as faixas de controle estipuladas, na condição de 80% finos obteve-se mais de 80% das quase partículas concentradas na faixa de $<6,35\text{mm}$ e $>1,00\text{mm}$. O ganho do tamanho médio é de fato observado e o engrossamento da mistura resultante permitiu atingir a participação de finos de 80% e ainda melhorar a condição de permeabilidade do leito.

A umidade ótima apresentou a mesma tendência de elevação com aumento de finos e dosagem de cal. Para a rota PWT verificou-se um benefício considerável em relação ao aumento de cal, principalmente na condição com 80% de finos.

Mais um fator que comprovou a eficiência da PWT ao manusear a mistura foi à significativa redução do material $<0,150\text{mm}$, ficando abaixo de 10% na condição de maior participação de finos no processo (80% $<0,150\text{mm}$, significando aproximadamente 47% da mistura total). A Figura 5.9 apresenta as imagens, resultado do processo de simulação na rota PWT e variações.

		
M40F – cal2,5	M60F – cal2,5	M80F – cal2,5
		
M60F – cal3,0	M80F – cal3,0	MIH+ M60F – cal2,5
		
MIH+ M60F – cal3,0	MIH+ M80F – cal2,5	MIH+ M80F – cal3,0

Figura 5.9: Registro de imagens do produto das simulações da rota PWT e variações.

Quanto a rota ALT, as condições e resultados são apresentados na Tabela 5.14.

Tabela 5.14: Resultados de desempenho a frio tecnologia ALT.

% finos	% cal virgem	% umidade	Vazão de ar (Nm³/h)	JPU	
60	2,5	8,0	42,90	6,47	
		8,5	43,48	6,57	
		9,0	37,31	5,61	
80		7,5	11,18	1,64	
		8,0	21,02	3,19	
		8,5	17,13	2,56	
60		3,0	7,0	40,02	6,08
			7,5	60,56	9,17
			8,0	51,93	7,80
80	7,5		26,93	4,09	
	8,0		29,71	4,50	
	8,5		30,90	4,71	

Ao contrário do que se obteve na rota PWT, a rota ALT apresentou um desempenho muito inferior aos valores encontrados em outras rotas. Os valores de JPU apurados ficaram abaixo da metade dos que foram obtidos nas rotas HPS e PWT, sinalizando uma permeabilidade muito abaixo do obtido nas outras rotas e muito aquém do esperado.

De fato, o material preparado apresentava um aspecto de que havia sido misturado de uma forma muito intensa, mas mesmo considerando a etapa de nodulização, o material resultante, em todos os casos, não apresentou a formação de quase partículas em volume suficiente para garantir uma boa permeabilidade do leito. A Figura 5.10 apresenta o aspecto visual da mistura após a etapa de nodulização.



Figura 5.10: Aspecto do material preparado pela rota ALT após etapa de nodulização.

Como realizado em outras rotas, a substituição de tecnologia de mistura também foi considerada na rota ALT, porém sem melhoras significativas. A Figura 5.11 apresenta o resultado da rota ALT consolidado.

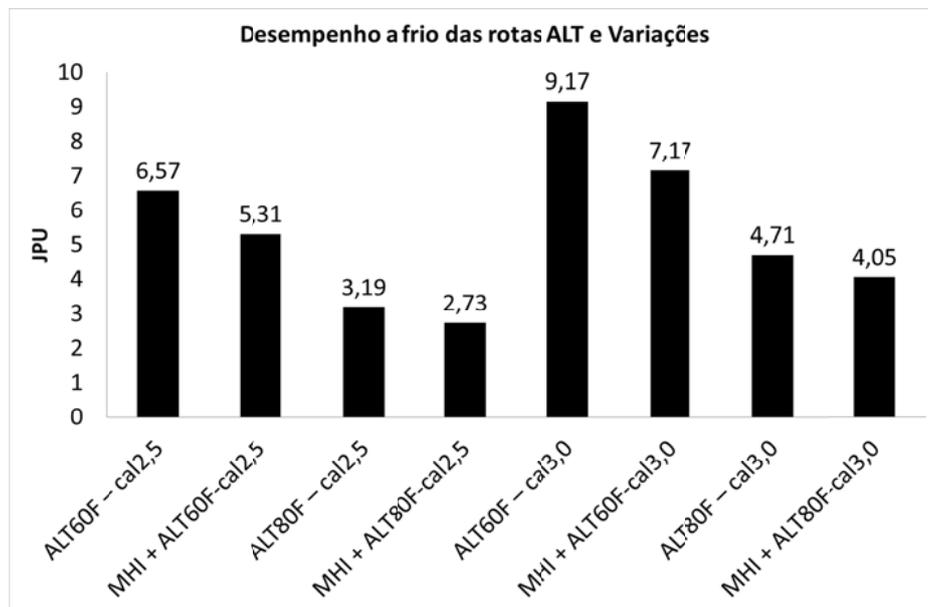


Figura 5.11: Desempenho a frio da rota ALT e variações.

O aumento da dosagem de cal melhorou um pouco o desempenho, mas não ao ponto de se aproximar do desempenho apresentado pelas outras rotas simuladas.

Os equipamentos intensivos de nodulização aplicam uma grande energia às misturas, o que prejudicou a formação das quase partículas. A literatura cita casos de sucesso utilizando equipamentos intensivos como nodulizadores, porém de fato o resultado não se repetiu no presente estudo e vale também salientar que as misturas usadas em equipamentos intensivos são consideravelmente mais finas do que uma mistura típica do processo de sinterização de minério de ferro. As partículas mais grossas podem ter prejudicado o processo de formação das quase partículas devido a grande movimentação no interior do equipamento, hipótese que precisa ser verificada, porém não foi discutida e avaliada por não se tratar do objetivo principal do estudo. A Figura 5.12 apresenta o registro fotográfico realizado do produto das simulações.

		
ALT60F – cal2,5	ALT80F – cal2,5	ALT60F – cal3,0
		
ALT80F – cal3,0	MHI + ALT60F– cal2,5	MHI + ALT80F– cal2,5
		
MHI + ALT60F– cal3,0	MHI + ALT80F–cal3,0	

Figura 5.12: Registro de imagens do produto das simulações da rota ALT e variações.

Uma constatação importante visto a congruência com algumas reclamações de usuários de equipamentos intensivos de mistura e nodulização, foi o desgaste da ferramenta de mistura do

MIH. Mesmo com poucas horas de utilização foi possível verificar visualmente o desgaste das ferramentas, e quanto efetuado a medida, já se havia consumido 3mm de cada ferramenta. A Figura 5.13 apresenta a foto das ferramentas internas do MIH.



Ferramentas novas



Evolução do desgaste



Evolução do desgaste



Evolução do desgaste

Figura 5.13: Evolução do desgaste das ferramentas do MIH.

Tal condição e as trocas de informações com usuários destes equipamentos direcionou esta avaliação sob a ótica de função destes equipamentos no processo de sinterização de minério de ferro, pois as misturas submetidas a estes equipamentos, aqui no Brasil, apresentam da ordem de 45% <1,00mm o que torna esta mistura extremamente abrasiva.

Quando partes fixas de equipamentos são submetidas a estas misturas (por exemplo, em chutes de transferências e calhas), se as referidas partes de contato não tiverem preparações

especiais para esse tipo de aplicação, as mesmas são consumidas com horas de operação, devido à abrasividade da mistura.

Ao analisar a mesma condição no interior de equipamentos intensivos de mistura e nodulização, uma dúvida surgiu quanto à correta aplicação deste equipamento, não sob a ótica de desempenho, pois isto é inquestionável, mas quanto à durabilidade das partes móveis em contato com a mistura e quanto à função nodulização, considerada e defendida por alguns fornecedores de equipamentos e tecnologia.

Para complementar as análises de desempenho a frio das misturas, nas condições simuladas de melhor desempenho, foram coletadas amostras do produto das simulações para análise microscópica das quase partículas formadas durante o processo de preparação. As amostras da rota ALT não foram consideradas nesta análise, pela grande diferença de desempenho já apresentada entre as outras rotas do estudo.

A Figura 5.14 apresenta imagens das secções analisadas das simulações da rota HPS. Foi possível verificar que a fração mais grossa ($>4,76\text{mm}$) é composta por quase partículas bem arredondadas com núcleo bem definido. Na fração intermediária ($<4,76\text{mm}; >2,83\text{mm}$), a camada aderente diminuiu a espessura em quando na fração mais fina ($<2,83\text{mm}; >1,00\text{mm}$) praticamente não se formaram quase partículas.

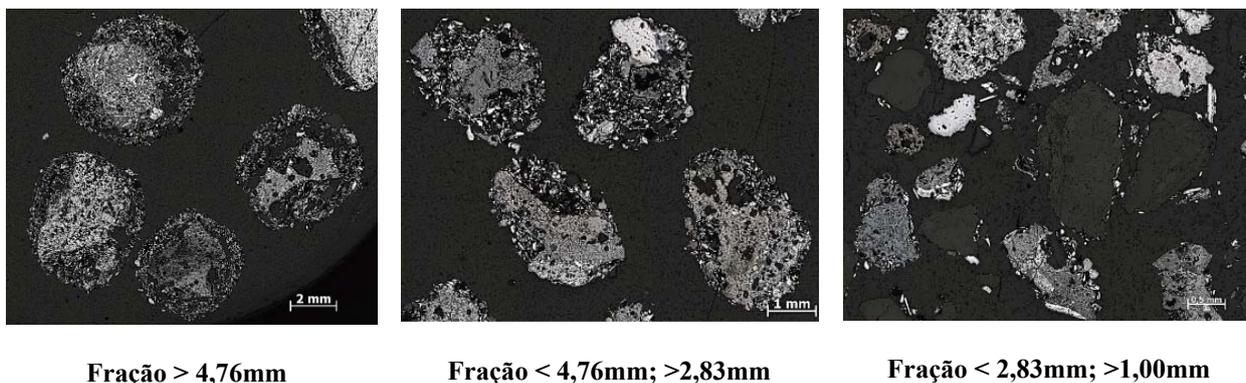


Figura 5.14: Análise microscópica – rota HPS.

O comportamento verificado corrobora com a avaliação feita de acordo com a relação N/A da mistura, onde as misturas que apresentaram uma maior relação N/A também demonstraram um melhor desempenho quanto a medição do JPU.

Esta análise sinalizou que as frações mais grossas ($> 4,76\text{mm}$ e $< 4,76\text{mm}; >2,83\text{mm}$) trabalharam como nucleantes e tiveram maior capacidade de formação de quase partículas. A fração ($<2,83\text{mm}; >1,00\text{mm}$) não apresentou comportamento de nucleação, não sendo verificadas camadas aderentes ao entorno das partículas.

A Figura 5.15 apresenta as imagens das secções analisadas das simulações da rota PWT. Devido à particularidade desta rota, foi possível perceber que a fração mais grossa é composta basicamente de micropelotas bem arredondadas. Na fração intermediária observaram-se algumas partículas, que não são micropelotas, com camadas aderentes pouco espessas. Na fração mais fina não se formaram quase partículas.

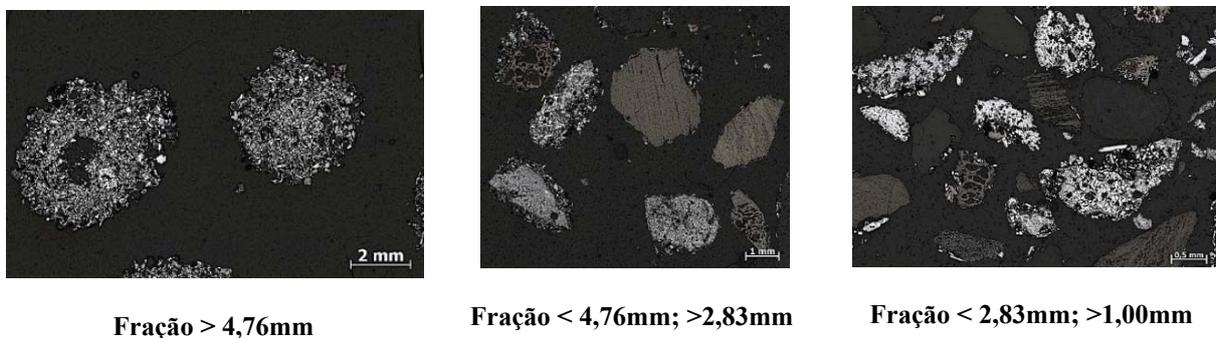


Figura 5.15: Análise microscópica – rota PWT 40% de finos.

Ao passo que se aumentou a participação de finos em ambas as rotas, de 40% para 80%, a intensidade da formação de quase partículas foi aumentando nas frações grossa e intermediária, e uma formação não muito significativa na fração fina como apresentado a seguir:

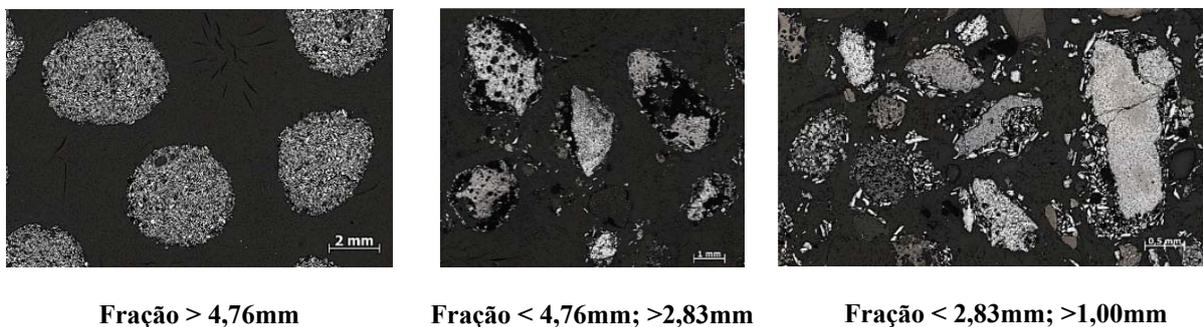


Figura 5.16: Análise microscópica – rota PWT 60% de finos.

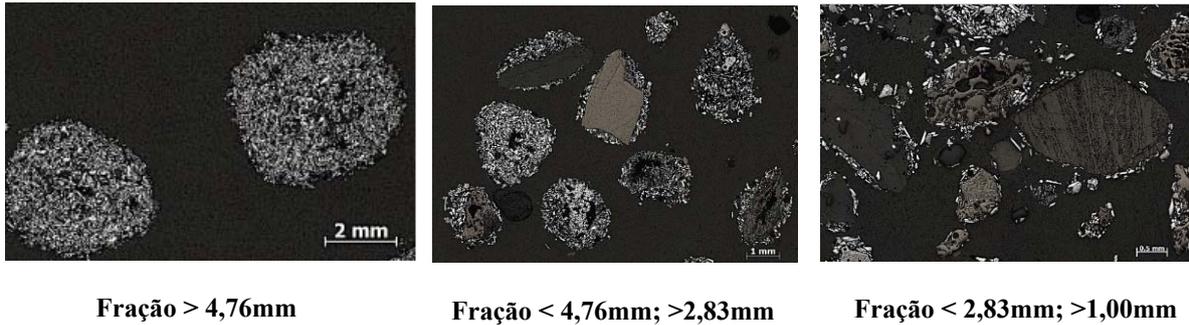


Figura 5.17: Análise microscópica – rota PWT 80% de finos.

5.2 Avaliação de Desempenho a Quente

De posse dos resultados de avaliação de desempenho a frio, as melhores condições foram as seguintes:

- HPS; 40% de finos; 4,5% de cal; 7,5% de umidade (caso base);
- HPS; 80% de finos; 4,5% de cal; 8,5% de umidade;
- PWT; 40% de finos; 2,5% de cal; 7,0% de umidade; tempo de mistura e homogeneização: 4 min.; rotação 12rpm;
- PWT; 60% de finos; 3,0% de cal, 7,5% de umidade; tempo de mistura e homogeneização: 2 min.; rotação 12rpm;
- PWT; 80% de finos; 3,0% de cal, 8,5% de umidade; tempo de mistura e homogeneização: 2 min.; rotação 8rpm;
- ALT; 60% de finos; 3,0% de cal; 7,5% de umidade;
- ALT; 80% de finos, 3,0% de cal; 8,5% de umidade:

Ao se iniciar as de queimas de retorno, a rota HPS com 80% de finos, que apresentou um JPU de 9,01 não queimou, sinalizando problemas de permeabilidade. Durante a queima, as temperaturas do leito não subiram como de costume e a temperatura da caixa de vento ficou muito abaixo da referência ($>320^{\circ}\text{C}$) considerada no CTF. Ao desagregar o bolo, depois da

tentativa da queima, verificou-se que o resultado era um material com intensidade de queima baixa e muito frágil. A Figura 5.18 apresenta o registro do material desagregado.



Figura 5.18: Queima HPS com 80% de finos.

Tentou-se por mais algumas vezes, porém a condição colocou em risco alguns equipamentos do sistema, onde foi decidido abortar a simulação a quente da condição.

Em uma avaliação minuciosa, chegou-se a conclusão de que mais algumas condições selecionadas para as simulações a quente apresentam condições de permeabilidade parecidas ou ainda mais severas do que apresentada pela condição simulada da rota HPS e mal sucedida, optando por cancelar todas as simulações que apresentasse valores de JPU inferior a 10.

Nas avaliações foram consideradas a normalização dos resultados de produtividade e consumo específico de combustível (C.E.C), considerando o fechamento do retorno em 100%. Com esta normalização, o objetivo foi de comparar os resultados médios das queimas na mesma base, desconsiderando as interferências do rendimento do processo. A normalização considera o fechamento do balanço de finos de retorno em 100%, logo esta correção retirou o impacto de rendimento do processo sobre as variáveis avaliadas durante o processo de queima piloto.

A Tabela 5.15 apresenta os resultados das queimas normais da rota HPS.

Tabela 5.15: Resultados das queimas normais rota HPS.

	Peso carregado (kg)	Peso do bolo (kg)	Tempo de sinterização (min)	Balanço de finos (%)	Densidade de carregamento (t/m ³)	Temperatura Máxima leito (°C)	Tamboramento >6,35mm (%)	Tamboramento <0,5mm (%)	Teste de Queda (> 10mm) (%)	Produtividade (t/m ² .24h)	C.E.C kg/t
HPS40 – cal 4,5	59,80	52,32	26,79	92,67	1,88	1167				30,21	73,92
	61,69	53,33	30,26	89,26	1,94	1183				27,62	70,63
	61,20	53,15	26,53	98,00	1,92	1184	68,98	5,94	84,18	30,13	67,42
	61,41	53,53	26,55	98,14	1,93	1183				30,38	67,06
	61,21	53,41	27,84	98,82	1,93	1180				28,82	67,19
Média	61,27	53,36	26,97	98,32	1,93	1182	68,98	5,94	84,18	29,78 (29,28)	67,22 (66,10)

* os valores entre parênteses foram normalizados de acordo com o balanço de retorno em 100%.

Quanto às queimas da rota HPS, não se encontrou dificuldade no fechamento do ponto. Após o ajuste do combustível, as três queimas validas foram obtidas e o processo apresentou boa estabilidade.

A Tabela 5.16 apresenta os resultados das queimas normais da rota PWT, considerando 40% de finos e 2,5% de cal.

Tabela 5.16: Resultados das queimas normais rota PW – M40F – cal2,5.

	Peso carregado (kg)	Peso do bolo (kg)	Tempo de sinterização (min)	Balanço de finos (%)	Densidade de carregamento (t/m ³)	Temperatura Máxima leito (°C)	Taboramento >6,35mm (%)	Taboramento <0,5mm (%)	Teste de Queda (> 10mm) (%)	Produtividade (t/m ² .24h)	C.E.C kg/t
M40F – cal 2,5	60,36	52,57	27,77	112,95	1,90	1173				26,31	68,88
	59,85	51,98	25,93	100,13	1,88	1179				29,64	69,19
	59,72	51,77	25,60	98,47	1,88	1170	70,25	5,74	82,40	30,12	68,32
	59,35	51,52	26,60	98,78	1,87	1170				28,81	68,56
Média	59,64	51,76	26,04	99,13	1,88	1173	70,25	5,74	82,40	29,52 (29,27)	68,86 (68,26)

* os valores entre parênteses foram normalizados de acordo com o balanço de retorno em 100%.

A Tabela 5.17 apresenta os resultados das queimas normais da rota PWT, considerando 60% de finos e 3,0% de cal.

Tabela 5.17: Resultados das queimas normais rota PW – M60F – cal3,0.

	Peso carregado (kg)	Peso do bolo (kg)	Tempo de sinterização (min)	Balanço de finos (%)	Densidade de carregamento (t/m ³)	Temperatura Máxima leito (°C)	Taboramento >6,35mm (%)	Taboramento <0,5mm (%)	Teste de Queda (> 10mm) (%)	Produtividade (t/m ² .24h)	C.E.C kg/t
M60F – cal3,0	59,84	52,75	26,58	117,73	1,88	1175				27,10	76,08
	60,50	53,03	25,09	116,80	1,90	1170				28,92	83,64
	60,45	52,85	24,90	110,53	1,90	1171				29,98	84,76
	59,25	51,58	24,80	98,81	1,87	1167	61,08	5,54	77,87	31,07	85,52
	58,87	51,37	24,59	99,88	1,85	1159				31,06	85,71
	59,55	52,15	24,60	100,87	1,88	1169				31,47	85,56
Média	59,22	51,70	24,66	99,85	1,87	1165	61,08	5,54	77,78	31,20 (31,15)	85,60 (85,48)

* os valores entre parênteses foram normalizados de acordo com o balanço de retorno em 100%.

A Tabela 5.18 apresenta os resultados das queimas normais da rota PWT, considerando 80% de finos e 3,0% de cal.

Devido à instabilidade do processo com 80% de finos, foi necessário desconsiderar o fechamento do retorno para finalizar a simulação a quente da condição.

Tabela 5.18: Resultados das queimas normais rota PW – M80F – cal3,0.

	Peso carregado (kg)	Peso do bolo (kg)	Tempo de sinterização (min)	Balanço de finos (%)	Densidade de carregamento (t/m ³)	Temperatura Máxima leito (°C)	Taboramento >6,35mm (%)	Taboramento >0,5mm (%)	Teste de Queda (> 10mm) (%)	Produtividade (t/m ² .24h)	C.E.C kg/t
M80F – cal3,0	59,90	52,57	27,07	130,44	1,89	1161				24,84	115,52
	59,50	50,99	24,65	128,36	1,87	1160				26,24	130,28
	59,49	52,18	25,45	120,98	1,83	1178				27,58	124,35
	58,14	50,00	24,19	101,65	1,83	1163	57,40	5,13	60,95	30,32	116,30
	58,53	50,30	23,13	107,55	1,84	1164				30,94	119,99
	59,07	51,04	23,89	110,11	1,86	1160				30,13	120,42
	59,27	51,26	23,68	115,18	1,87	1161				29,73	123,00
Média	58,90	50,96	24,07	111,09	1,85	1163	57,40	5,13	60,95	29,74 (33,04)	120,81(134,21)

* os valores entre parênteses foram normalizados de acordo com o balanço de retorno em 100%.

A qualidade química dos sinters produzidos é apresentada na Tabela 5.19.

Tabela 5.19: Qualidade química dos sinters produzidos.

Condições	Fet	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn	CaO	MgO	FeO	B ₂	VE
HPS40 – cal4,5	55,21	6,16	1,09	0,055	0,17	11,80	1,21	6,16	1,91	20,27
M40F – cal2,5	54,98	7,07	1,05	0,056	0,17	12,19	1,14	5,01	1,72	21,45
M60F – cal3,0	58,81	5,31	0,936	0,038	0,11	9,15	1,15	9,92	1,72	16,55
M80F – cal3,0	62,48	3,57	0,83	0,034	0,089	5,93	1,18	18,61	1,67	11,51

O procedimento normal para controle do retorno é variar a dosagem de combustível sólido mediante a análise se o balanço está estourando para valores maiores do que 100% ou menores. Porém, de fato, a energia aplicada ao processo não estava sendo bem aproveitada por alguma razão, porque apesar da elevada dosagem de combustível sólido, não se conseguia fechar o retorno. A dosagem de combustível estava sendo direcionada toda para o misturador tambor, vindo a ser homogeneizada durante a etapa de mistura e homogeneização. Ao desconfiar que isto pudesse estar influenciando na distribuição do combustível no leito, a dosagem foi alterada para etapa de mistura e homogeneização. Haviam, de fato, indícios que estava ocorrendo algum tipo de problema na distribuição do combustível sólido, pois começou a se identificar a formação de pontos quentes na superfície das panelas do *pot grate*. A Figura 5.19 apresenta estes pontos que aconteceram somente durante a simulação da rota PWT na condição M80F – cal 3,0.



Figura 5.19: Queima PWT com 80% de finos.

Ao se passar a dosagem do combustível para etapa de homogeneização, os pontos quentes reduziram significativamente, porém ainda com dificuldade de fazer o balanço de retorno.

Avaliando os resultados, notou-se que houve uma redução do peso carregado à medida que se avançou na dosagem de finos na rota PWT. A densidade do leito, por correlação direta com peso apresentou o mesmo comportamento de redução com o aumento da dosagem de finos. Tanto as reduções do peso de carregamento quanto as reduções da densidade do leito

remeteram a uma condição de menor empacotamento do leito e por consequência uma maior permeabilidade. Porém, durante o início do processo de queima esta condição não ficou tão clara, mas ao passo que a frente de queima foi avançando, a condição de melhor permeabilidade juntamente com a maior participação de finos na rota PWT ficou evidente.

Para mesma participação de finos, comparando às rotas HPS e PWT, verificou-se que o perfil de vazão foi semelhante no início do processo de queima e que após o avanço da frente de queima, o perfil de vazão da rota PWT se descolou da rota HPS, indicando ser mais permeável, sendo que o menor tempo de sinterização reforçou este comportamento.

O aumento da participação de finos na rota PWT resultou em um aumento progressivo da permeabilidade, retratado na Figura 5.20 pelos perfis de vazão por condição.

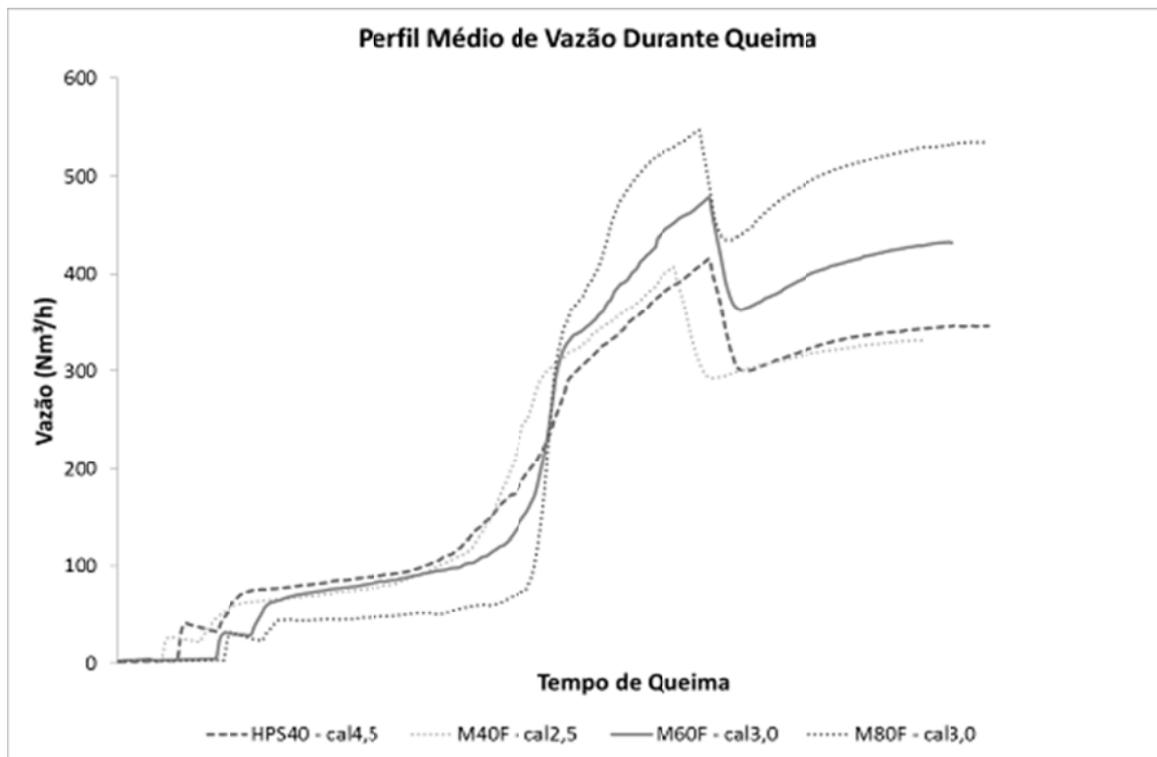


Figura 5.20: Perfil de vazão durante o processo de queima.

Outro fato que corrobora para a afirmação quanto ao comportamento de aumento da permeabilidade ao passo que se aumenta a participação de finos via rota PWT é a redução significativa do tempo de sinterização. A Figura 5.21 apresenta a evolução do tempo de sinterização por condição simulada.

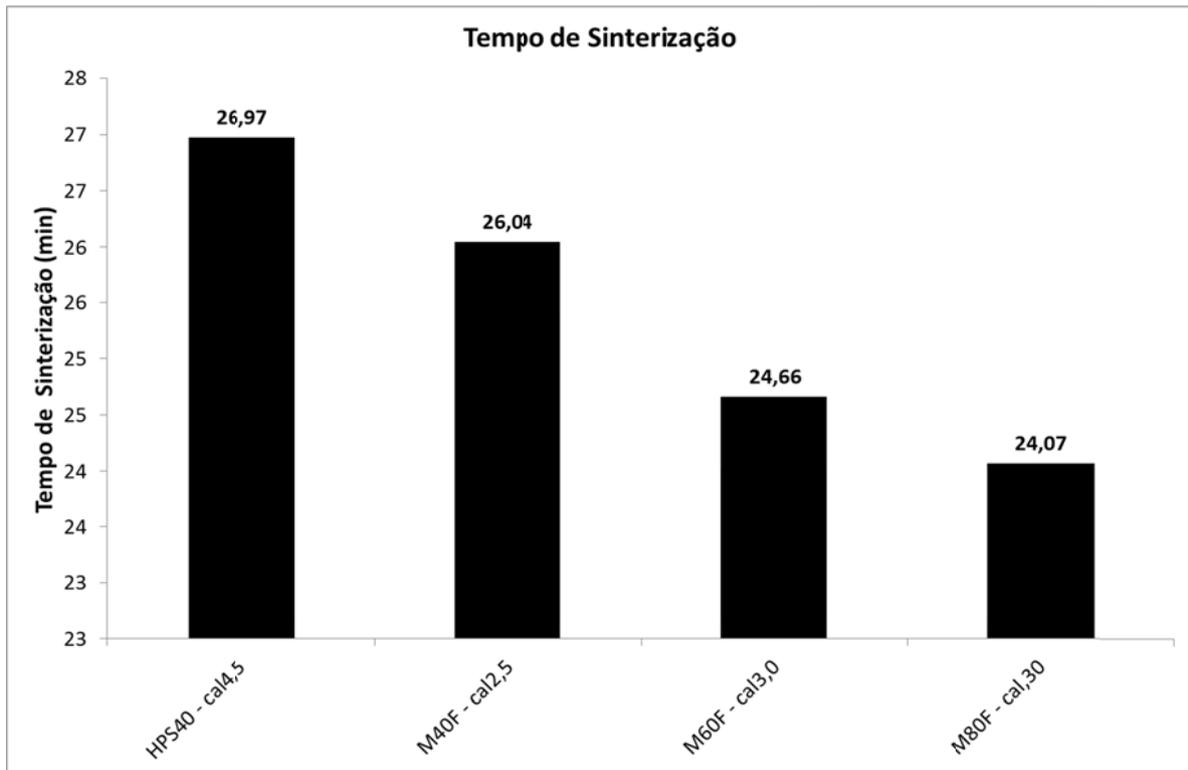


Figura 5.21: Tempo de sinterização das condições simuladas.

Ao avançar com a participação de finos, para manter o balanço de retorno foi necessário o aumento considerável do aporte térmico, refletindo no aumento do consumo de combustível sólido do processo. Ao passo que o sinter se torna mais frágil, o retorno do processo de sinterização tende a aumentar e a iniciativa natural para se evitar este aumento, é o aumento da dosagem de combustível sólido.

De maneira gráfica, é possível verificar o aumento de energia cedida ao processo ao passo que a dosagem de combustível necessária para o fechamento do balanço chegou ao dobro que foi utilizado na rota HPS com 40% de finos. A Figura 5.22 apresenta os perfis de temperatura.

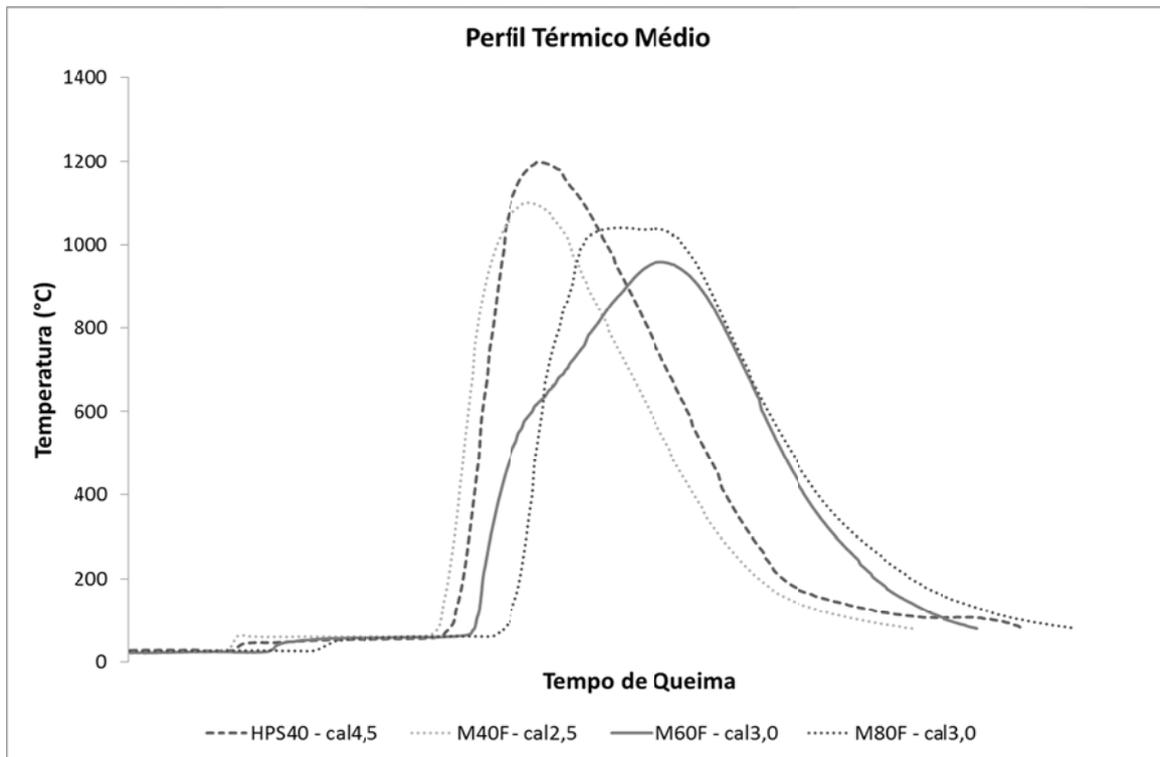


Figura 5.22: Perfil de temperatura durante o processo de queima.

Resposta da dosagem de combustível, o alargamento do perfil demonstrou qualitativamente o aumento da energia aplicada ao processo. Tal dificuldade no fechamento do balanço já era esperada nas condições de 60% e 80% de finos, principalmente pela drástica redução do volume de escória do sinter, ao se analisar a qualidade química prevista de cada sinter produzido.

A matriz de escória é uma variável importante para resistência mecânica do sinter produto como também para o rendimento do processo, ao passo que essa matriz de escória quando reduzida, partindo-se de um volume que dependerá das características intrínsecas do minério aplicado, tende a influenciar de forma negativa a resistência mecânica do sinter. A Figura 5.23 apresenta a correlação existente, para o caso estudado em específico, entre o volume de escória e a resistência mecânica, através dos testes de Tamboramento e Queda.

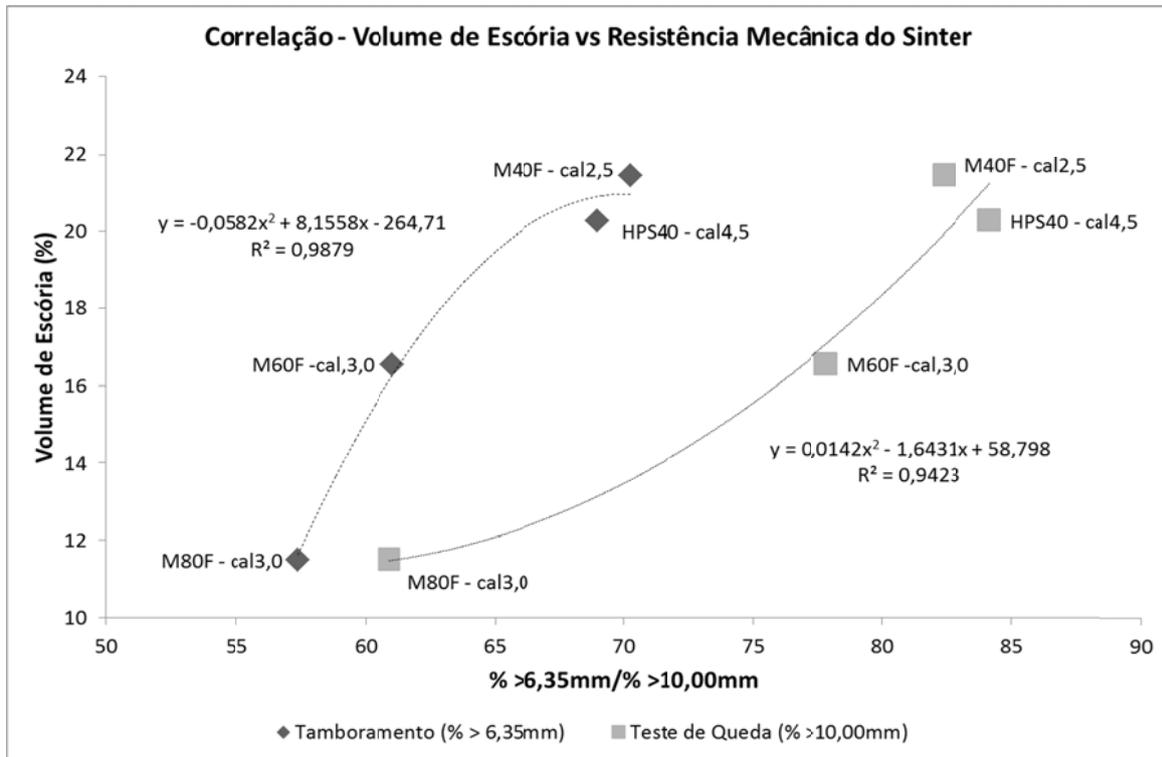


Figura 5.23: Correlação entre o volume de escória do sinter e a resistência mecânica.

Adicional ao comportamento da resistência mecânica quanto à variação do volume de escória, o excesso de energia também corrobora para queda da resistência mecânica do sinter e no caso em questão, de fato isto ocorreu com uma intensidade muito grande ao ponto de se atingir um valor muito elevado de FeO no sinter na condição M80F – cal 3,0.

O FeO é uma medida indireta associada ao aporte térmico do processo, os valores praticados nas condições M60F – cal 3,0 e M80F – cal 3,0 ficaram muito acima do limite definido como aceitável para o processo, sendo a referência industrial média das plantas de sinterização nacionais ($\leq 6,5\%$).

Esta condição pode estar associada ao aporte térmico propriamente dito ou a condição de cinética de resfriamento, onde devido a grande permeabilidade, o tempo de reoxidação, pode não ter sido suficiente para a reoxidação da wustita formada durante o processo de redução. Tal fato não pode ser investigado por não se ter informações das microestruturas dos sinteres e quantificação das fases como também por não ser o foco principal do presente estudo, porém ficou claro que é necessário trabalhar na otimização do consumo térmico do processo.

Outra condição associada ao consumo térmico pode estar ligada ao fator de forma das partículas e a quantidade de finos “livres” após a finalização da etapa de preparação das misturas. Ao passo que a frente de queima avança, ocorre a formação de fase líquida aos arredores das partículas maiores, fazendo a consolidação da mistura em um bloco sinterizado.

Quando se analisou as condições da rota PWT, o aumento da participação de *pellet feed* via etapa de microaglomeração, a proporção de partículas finas foi reduzida gradativamente à medida que ocorreu o aumento das quase partículas formadas na nesta etapa. Desta forma entendeu-se parcialmente a necessidade do aumento de aporte térmico ao processo, pois é natural se ter maior dificuldade em unir dois corpos de formato esférico pela própria condição de contato, ao ponto que a esfericidade da partícula se aproxima de 1,0, menor é a superfície de contato entre elas, tendendo a ser um único ponto quando a partícula atinge a esfericidade perfeita. A Figura 5.24 ilustra esse raciocínio de forma qualitativa.

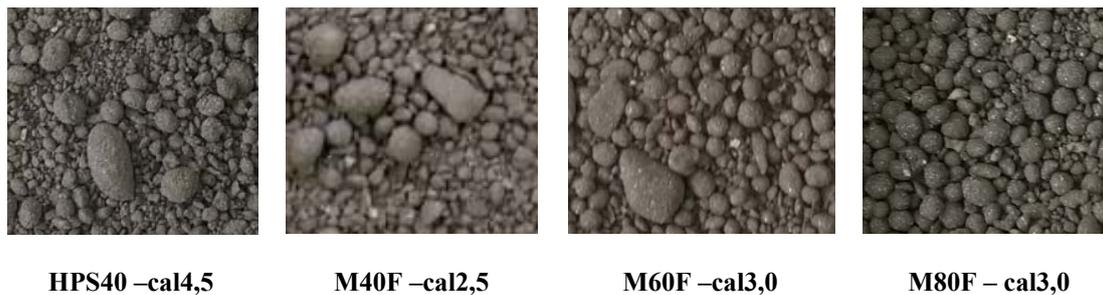


Figura 5.24: Imagens de cada mistura após etapa de preparação.

Logo, o principal mecanismo de sinterização via rota PWT está associado ao coalescimento das superfícies dessas partículas, que se aproximam de esferas, o que demandou bastante energia para o propósito de fechamento do retorno e que, no caso da condição de 80%, foi necessário desconsiderar o balanço o retorno para que se pudesse finalizar a parte de simulação de queima.

Sob o ponto de vista de qualidade, os sinteres foram avaliados quanto ao desempenho metalúrgico. A Tabela 5.20 apresenta os testes de redutibilidade (RI) e o teste de degradação sobre redução (RDI).

Tabela 5 20: Qualidade metalúrgica dos sínters produzidos.

	HPS40 –cal4,5	M40F –cal2,5	M60F –cal3,0	M80F – cal3,0
RI (%)	68,60	72,40	65,30	54,80
RDI (% <2,83mm)	18,00	17,50	20,00	17,00

O comportamento metalúrgico é influenciado por uma série de fatores, mas dentre os resultados encontrados, foi verificado que os resultados de redutibilidade do síter estão diretamente conectados ao % de Fe_2O_3 no síter, que no presente estudo estão representados de forma indireta pelo % de FeO medido no síter, sendo assim, ordenadamente esperava-se que o melhor comportamento sob redução fosse do síter gerado pela condição M40F – cal,2,5 e assim a redutibilidade fosse se degradando até o pior resultado de redutibilidade que foi o da condição M80F – cal3,0, o que realmente foi verificado.

Em relação à degradação sob redução, a presença de Al_2O_3 é prejudicial ao desempenho do síter, pois a Al_2O_3 tende-se a dissolver na rede cristalina do Fe_2O_3 criando tensões e microfissuras que se propagam quando a rede é exigida termicamente novamente. Porém, pode-se verificar que houve uma redução gradativa da presença de Al_2O_3 no síter, esperando-se uma redução do RDI da condição HPS40 – cal4,5 para M80F – cal3,0. De certa forma houve esta tendência nos demais pontos, sendo a condição M60F – cal3,0 um ponto fora da curva.

Ao se avaliar o % de MgO contido, verificou-se uma menor participação na mistura M60F – cal3,0 o que pode ter impactado negativamente o RDI, além da resistência mecânica e nível térmico do processo que contribuem e precisam ser considerados.

A distribuição granulométrica dos sinteres está apresentada na Tabela 5.21.

Tabela 5.21: Distribuição granulométrica dos sinteres produzidos.

	HPS40 –ca14,5	M40F –ca12,5	M60F –ca13,0	M80F – ca13,0
Malhas (mm)	Percentual Retido (%)			
80,0	0,00	0,00	0,00	0,00
50,0	3,02	2,18	1,61	0,00
40,0	3,42	3,25	1,45	0,00
35,5	3,35	2,89	2,29	0,83
25,0	11,76	10,58	6,97	1,26
20,0	8,04	8,26	7,89	2,04
16,0	9,42	9,89	8,83	5,32
12,5	12,59	14,42	15,36	15,15
10,0	10,64	10,71	10,24	19,55
6,3	21,24	20,95	22,52	28,38
5,0	8,96	8,13	10,24	24,75
<5,0	4,59	8,65	12,60	2,72
TM (mm)	17,47	16,59	14,26	10,28

A distribuição granulométrica tendeu, como esperado, a acompanhar o comportamento mecânico do sínter, logo o sínter mais frágil foi o mais fino e conseqüentemente o que apresentou o menor tamanho médio.

A Figura 5.25 apresenta o aspecto de cada sínter produzido.

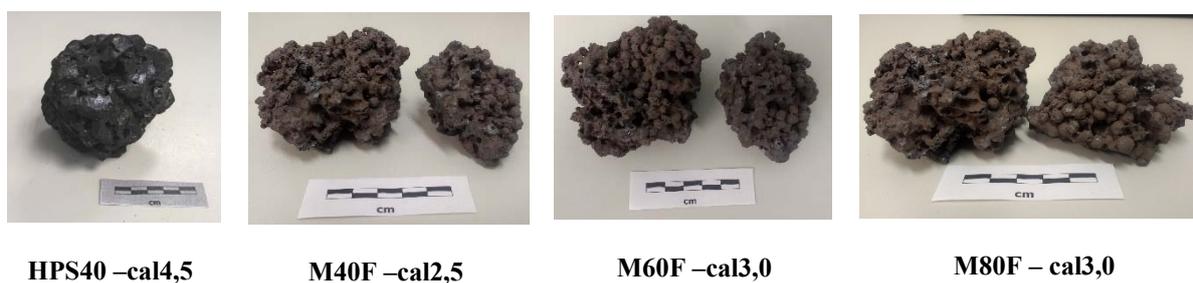


Figura 5.25: Sínters produzidos

As queimas realizadas resultaram sinteres com qualidade química dentro do esperado pelos respectivos balanços de massa, e em ambas as queimas o produto gerado apresentou características melhores, em algumas situações comparáveis ao sínter que vem se produzindo

industrialmente e algumas outras que precisaram ser otimizadas para serem considerados como possibilidade de aplicação industrial.

6 Conclusões

O aumento da dosagem de *pellet feed* no processo de sinterização é uma alternativa para o enriquecimento da mistura a sinterizar, no que se diz respeito ao teor de Fe_t contido e redução dos deletérios.

Houve uma melhoria significativa considerando a maior dosagem de *pellet feed*, 80% da mistura de minérios, o teor de Fe_t do produto final superou 62% e houve uma redução de elementos de ganga da ordem de 58% o que de fato é extremamente interessante para os reatores de redução.

Na rota HPS, foi constatado uma limitação a valores superiores a 40% de finos. Acima deste ocorreu a redução do valor da relação N/A resultando em aumento da dispersão granulométrica, o que impactou diretamente o processo de queima devido à piora da permeabilidade do leito.

A rota PWT apresentou um desempenho semelhante à rota HPS ao se referir à dosagem de finos de 40%, porém à medida que se foi aumentando a dosagem de finos para os patamares de 60% e 80% o desempenho a frio destas misturas se apresentaram melhor do que a mistura com 40% de finos.

O aumento da dosagem de cal, na rota PWT, pode ser uma alternativa técnica utilizada para melhorar o desempenho a frio das misturas a sinterizar.

A rota ALT, pela tecnologia e disposição dos equipamentos, não se mostrou capaz tecnicamente de manusear grandes participações de finos.

Os equipamentos são misturadores por excelência e de eficiência comprovada, porém a quantidade de energia aplicada pelas ferramentas não permite o crescimento de quase partículas, quando os mesmos equipamentos trabalham com *setups* de nodulizador.

A inserção de equipamentos intensivos de mistura e/ou nodulização em rotas de preparação existentes deve ser feito concomitante a uma nova avaliação de umidade ótima da mistura, pois a inserção dos mesmos desloca o valor de umidade ótima, conforme visto nos testes experimentais.

Considerando os resultados das análises microscópicas realizadas, na rota HPS o mecanismo preponderante de formação de quase partícula é o mecanismo de nucleação,

Na rota PWT, os mecanismos de crescimento de quase partícula é um conjugado de crescimento autógeno e nucleação das partículas.

A necessidade de maior aporte térmico do processo, vista quando se aumentou a participação de finos de 40% para 80% esteve associada a dois principais fatores:

- A redução da resistência mecânica do sinter produto;
- A influência do efeito de forma das partículas e a redução de finos “livres” reduzindo a formação de fase líquida durante a passagem da frente de queima.

A alteração do ponto de dosagem de combustível sólido na condição M80F-cal3,0 demonstrou claramente que existe oportunidade de otimização dos resultados já alcançados.

A redução da resistência mecânica do sinter com a elevação gradativa da participação de finos influenciou de forma negativa a distribuição granulométrica do sinter produto.

A rota PWT apresentou maior capacidade técnica e estabilidade para se trabalhar com elevadas participações de finos na mistura a sinterizar, onde foi possível a entrada de até 60% de *pellet feed*, considerando como base a mistura de minérios. Porém para se atingir a condição de dosagem de 80% é necessário aperfeiçoar, principalmente a dosagem de combustível e verificar o efeito sob o sinter produto.

7 Relevância dos Resultados Obtidos

O trabalho apresenta a relevância tecnológica no desenvolvimento conceitual de uma rota e parâmetros de referência de processo, que viabilizam a utilização de elevadas participações de finos no processo de sinterização, participações > 40% usuais já consolidados tecnicamente pela tecnologia HPS.

Este desenvolvimento vai de encontro com a necessidade corrente devido à deterioração da qualidade química dos *sinter feeds* (redução do teor de Fet contido e aumento dos elementos de ganga), como também ao afinamento destes, principalmente aos *sinter feeds* produzidos na região do Quadrilátero Ferrífero com a transição das jazidas minerais locais de minérios hematíticos para itabiríticos.

O Parque Siderúrgico Nacional ainda não está preparado para tal condição, haja visto será necessário operar com aproximadamente 70% da mistura de minérios < 0,150mm em um futuro próximo.

O trabalho apresenta uma alternativa tecnológica para viabilizar a operação com até 80% de finos e os benefícios quanto à qualidade química em se utilizar estes finos de uma fonte de melhor qualidade, que é o *pellet feed*.

8 Sugestões para Trabalhos Futuros

- Estudar a alteração de tecnologia de mistura e nodulização quanto ao impacto na umidade ótima da mistura a sinterizar;
- Reavaliar a classificação granulométrica das partículas da mistura em nucleantes, intermediárias e aderentes, haja visto o comportamento da fração $< 2,83\text{mm}$ e $> 1,00\text{mm}$ que é atualmente classificada como uma partícula nucleante e no presente trabalho se comportou como inerte;
- Avaliar as opções de dosagem e partição de combustível sólido, considerando a rota PWT, para otimização do aporte térmico do processo e otimização do consumo e rendimento do processo;
- Avaliar o impacto da permeabilidade encontrada no processo de resfriamento do sinter via rota PWT, buscando entender as implicações sobre a qualidade física do sinter e qualidade metalúrgica;

9 Referências Bibliográficas

1. WIKIPEDIA. Wikipédia, a enciclopédia livre - Processo Dwight-Lloyd. Disponível: <https://nl.wikipedia.org/wiki/Dwight-Lloyd-proces>. Acesso em: julho/2016.
2. CAMPOS, A. R.; FONSECA, V.O. Pelotização. In: LUZ, A. B. da; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C.A. Tratamento de Minérios. Rio de Janeiro: CETEM, 2010. 5ª Edição – Cap. 16, p. 683-750.
3. QUARESMA, L.F. Balanço Mineral Brasileiro, Elemento Ferro. DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral, Brasília - DF, 2001. 27 folhas. Brasília. Disponível: <http://www.anm.gov.br/dnpm/paginas/balanco-mineral/arquivos/balanco-mineral-brasileiro-2001-ferro>. Acesso em: julho/2016.
4. TAKEHARA, Lucy. Caracterização geometalúrgica dos principais minérios de ferro brasileiros – fração *sinter feed*. 2004. 403 folhas. Tese de Doutorado em Geociências – Instituto de Geociências, UFRGS, Porto Alegre – RS, Brasil.
5. PADULA, Victor Pereira. Caracterização Tecnológica de um *sinter feed* Hematítico contendo diferentes proporções e tipos de sílica nas frações aderentes, intermediárias e nucleantes. 2009. 93 folhas. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mineral – Departamento de Engenharia Mineral, UFOP, Ouro Preto - MG. Brasil.
6. MOURÃO, J. M. Estudo prospectivo do setor siderúrgico: NT minério de ferro e pelotas situação atual e tendências 2025. Brasília – DF, Brasil: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2008. 50 folhas.
7. LIMA, T. M.; NEVES, C. A. R. Sumário Mineral 2015. Brasília – DF, Brasil: Departamento Nacional de Produção Mineral. 2016. 135 folhas.
8. MOURÃO, M. B. Introdução a Siderurgia, São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. 428 folhas. São Paulo, 2007.
9. TELLES, V.B. et al. Produção de Sínter de Minério de Ferro Utilizando Poeira de Aciaria Elétrica como Matéria-Prima. Revista Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, São Paulo, v 10, n.1, p. 72-77, 2013.

10. CASTRO L. A. Minério de Ferro. In: ABM (Ed.) Curso sobre matérias-primas - Aglomeração e operação de Altos Fornos. São Paulo, ABM, 1989. p. 5-58, 1989.
11. AZEVEDO, M.A. Sinterização a Coque. In: ABM (Ed.) Curso sobre matérias-primas - Aglomeração e Operação de Altos Fornos. São Paulo, ABM, 1989. p. 75-119, 1989.
12. NAJAR, F. et al. Curso: Utilização do Minério de Ferro na Siderurgia. Ipatinga – MG, Brasil: USIMINAS, 1993. p. 6 -27.
13. FURUI, T. Technology for Preparation of Raw Materials to be Sintered. Nippon Steel Technical Report Overseas, nº 10, November, 1977, p. 36.
14. CARNEIRO, M.A. et al. Avaliação de Matérias-Primas e sua Influência na Produtividade da Sinterização. Metalurgia e Materiais - ABM, v.40, 321, p. 429-433, Agosto,1984.
15. VIEIRA, C. B. et al. Avaliação Técnica de Minérios de Ferro para Sinterização nas Siderúrgicas e Minerações Brasileiras: uma análise crítica. Revista Escola de Minas, Ouro Preto –MG, Brasil, v56: p.97-102, junho, 2003.
16. LOPES, Marcelino Vieira. Caracterização de Sínter de Minério de Ferro para uso em Altos-Fornos a Carvão Vegetal. 2012. 99 folhas. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Materiais. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá – SP, Brasil, 2012.
17. LUDIVINE, P. et al.. Vertical Intensive Mixing for Processing Finer Iron Ore in Sinter Plant In: Associação Brasileira de Metalurgia Materiais e Mineração. Proceedings of the 44th Ironmaking and Raw Materials Seminar – International; 2013; Belo Horizonte - MG, Brazil:ABM, setembro, 2014. p. 321-329.
18. HONORATO, Edilson Pinto. 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. 2005. 126 folhas. Dissertação de Mestrado em Engenharia Metalúrgica de Minas. Escola de Engenharia, UFMG, Belo Horizonte, 2005.
19. VENTURINI, C. L.; ARAGÃO, C. F. S. Tecnologia Farmacêutica IV – Granulados e Comprimidos, Curso de Farmácia e Bioquímica, Notas de Aula. 2006. Disponível: http://www.ebah.com.br/content/ABAAAe_AwAC/comprimidos.

Acesso em: novembro/2016.

20. LITSTER, J.D. E .WATERS, A.G. Influence of the Material Properties of Iron Ore Sinter Feed on Granulation Effectiveness. *Powder Technology*. v 55, p 141-151, 1988.
21. VENKATARAMANA, R. et al. Mathematical Modelling and Simulation of the Iron Ore Sintering Process. *Tata Search*, 1998. p 50-55
22. STARLING, Ana Rita de Almeida Ribeiro. Avaliação de Metodologias de Simulação Física do Processo de Sinterização. 2012. 162 folhas. Dissertação de Mestrado em Engenharia Metalúrgica de Materiais. Escola de Engenharia, UFMG, Belo Horizonte, 2012.
23. VARGAS, U.; CABRAL, E. Co-produtos (Resíduos) da Indústria Siderúrgica e Mineração: Condicionamento para Reciclagem. In: 40º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias Primas e 11º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro. Belo Horizonte: ABM, Setembro, 2010. p. 75 – 84.
24. CAPPEL, F.; LUNGEN, H.B. Historical Review of Developments in Sintering and Pelletizing Techniques. In: Seminar on Sinter and Pellets, Brussels – Belgium: International Iron and Steel Institute – IISI, June, 1999. p. 12-31.
25. JANUZZI, Aécio. Análise da Aglomeração a Frio no Processo HPS (Hybrided Pelletezed Sinter) com Ênfase nas Matérias-Primas Envolvidas. 2008. 145 folhas. Dissertação de Mestrado em Engenharia Metalúrgica de Minas, Escola de Engenharia, UFMG, Belo Horizonte, 2008.
26. DAWASN, P.R. Recent Developments in Iron Ore Sintering – Part 2 Research Studies on Sintering and Sinter Quality. *Iron and Steelmaking*, v 20: p. 137-143, 1993.