

## DESENVOLVIMENTO CONCEITUAL DE ROTA PARA VIABILIZAÇÃO DE ELEVADAS PARTICIPAÇÕES DE PELLET FEED NA MISTURA DE MINÉRIOS\*

Fernando Luiz Câmara Campos Júnior<sup>1</sup>  
Paulo Santos Assis<sup>2</sup>  
Gustavo Germano Pereira<sup>3</sup>

### Resumo

As transições dos depósitos minerais de ferro de hematíticos para itabiríticos e goethíticos no quadrilátero ferrífero alteram o *split* de produtos do beneficiamento. As participações de minérios granulados e *sinterfeed* vem se reduzindo com o passar do tempo com o proporcional aumento da geração de *pellet feed*. O presente trabalho teve como objetivo avaliar misturas compostas de diferentes níveis de *sinterfeed* e *pellet feed* identificando uma rota tecnológica, considerando concepções operacionais e layouts diferentes, que permitisse manusear quantidades de *pellet feed* acima dos 40% já consolidados industrialmente. Para tal avaliação, uma série de testes em escala piloto, simulando a etapa de preparação (homogeneização e granulação) de misturas foram realizados juntamente com avaliações de permeabilidade a frio. Os melhores resultados destas avaliações, balizadas pelos testes de permeabilidade, foram submetidas a avaliações a quente utilizando o *potgrate*. Como conclusão do trabalho, um conceito utilizando discos atingiu 60% de *pellet feed* produzindo um sinter com condições satisfatórias. Com 80% de *pellet feed*, o resultado apresentado ainda carece de ajustes e desenvolvimentos.

**Palavras-chave:** Minério de Ferro; Sinter; Pellet feed; Permeabilidade.

### CONCEPTUAL DEVELOPMENT OF ROUTE TO MAKE FESIBLE HIGH AMOUNT OF PELLET FEED IN THE IRON ORE MIXTURE

#### Abstract

The iron ore sources transitions from hematite to itabirite and goethite at the Iron Ore Quadrangle changes the split of beneficiation products. The lump and sinter feed fractions have been reducing over the time with the proportional increase in the amount of pellet feed. This paper aims to evaluate mixtures composed by different levels of sinter feed and pellet feed identifying the technological route considering different operational conceptions and layouts that allowed the usage of pellet feed higher than 40%. Therefore, some pilot tests simulating the preparation step (homogenising and granulation) of the mix were performed joined with cold permeability evaluation. The best results of these primary evaluations, marked out by permeability tests, were evaluated using the pot grate tests. As a conclusion of this development, a conceptual route using discs reach 60% of pellet feed producing a sinter with satisfactory conditions. With 80% of pellet feed, the result needs to be adjusted and developed.

**Keywords:** Iron ore; Sinter; Pellet feed; Permeability.

<sup>1</sup> Engenheiro Metalurgista, Mestre em Engenharia de Materiais, Coordenador Técnico de Vendas, Marketing e Vendas, Paul Wurth do Brasil, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Metalurgista, Doutor em Metalurgia, Professor Titular, Departamento de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

<sup>3</sup> Engenheiro Metalurgista, Engenheiro de Processos e Tecnologia, Departamento de Engenharia, Paul Wurth do Brasil, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

No processo produtivo de ferro-gusa/aço através de reatores de redução como Alto-Forno, somente o primeiro produto da fase de beneficiamento mineral (granulado) pode ser utilizado diretamente sem causar danos e complicações ao processo. Essa restrição se faz necessária, pois nestes reatores o agente redutor, na forma gasosa, trabalha em contra fluxo com a carga.

Produtos com distribuição granulométrica muito fina como o *sinterfeed* e *pellet feed* prejudicam o processo de percolação do agente redutor e não podem ser utilizados sem um processo prévio de adequação granulométrica.

Em uma avaliação qualitativa das reservas de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero a partir da década de 1950, sinaliza a redução da participação da hematita em contrapartida ao aumento do itabirito nas jazidas prospectadas com os seguintes destaques:(i) as hematitas estão em processo de exaustão nas reservas conhecidas no Quadrilátero Ferrífero, em um futuro não muito distante; (ii) com teores de ferro inferiores, os itabiritos necessitam de usinas de beneficiamento mais complexas, com etapas de concentração com menores índices de recuperação metálica; (iii) a geração de minério de ultrafino, tipo *pellet feed*, estará aumentando, principalmente com adventos de novos projetos[1].

As reservas 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, mas 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[1].

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 *sinterfeed* e a massa complementar, *pellet feed*[2].

Os processos de sinterização e pelotização foram desenvolvidos para adequar a granulometria dos produtos da etapa de beneficiamento, sendo aplicados respectivamente ao *sinterfeed* e *pellet feed*.

Com o afinamento e a mudança da distribuição granulométrica dos produtos das operações de beneficiamento do minério de ferro, já existem muitos estudos publicados sobre o comportamento das partículas e classificação das mesmas quanto à distribuição granulométrica.

Para avaliação prévia do comportamento a frio de misturas, o JPU (*Japanese Permeability Unit*) é uma metodologia utilizada com frequência, pela simplicidade e facilidade de execução dos testes. Para esta avaliação um diferencial de pressão é aplicado a um leito com dimensões conhecidas, tomando-se nota a vazão passada pelo leito, sendo o diferencial de pressão sempre constante para as avaliações. O JPU é calculado utilizando a seguinte fórmula:

$$JPU = \frac{Q}{A} \left( \frac{h}{\Delta P} \right)^{0,6} \quad (1)$$

onde: (i)Q: volume de ar (Nm<sup>3</sup>/min); (ii) A: área superficial de sucção (m<sup>2</sup>); (iii)h: altura de camada (mm); (iv) ΔP: Diferencial de Pressão do leito (mmH<sub>2</sub>O).

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

## 1.1 Influência da Água no Processo de Preparação da Mistura

A umidade é o principal fator que determina a eficiência da etapa de aglomeração a frio. A adição de água precisa ser controlada e pode variar com uma série de fatores característicos da mistura a sinterizar, qual precisa ser estudada e monitorada nas operações, pois seu impacto é significativo no desempenho operacional do processo de sinterização.

O comportamento da água em relação às partículas da mistura foi descrito por [3], onde foram definidos 4 estados de água empregados no processo de aglomeração associados ao seu volume, vide Figura 1.

- 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;
- ESTADO FUNICULAR – quando, além das pontes líquidas, alguns poros são totalmente preenchidos por água, havendo ainda a presença de ar em alguns poros;
- ESTADO CAPILAR – quando todos os poros são ocupados pela água, porém a superfície não é recoberta por uma película de água;
- EXCESSO DE ÁGUA – quando o excesso de água provoca o aparecimento de gotas d'água, com partículas no seu interior e também na superfície.

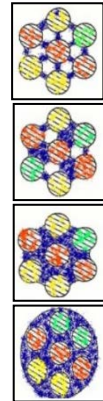


Figura 1. Descrições e esquemas do sistema água-partícula.

Logo, a água ajuda no crescimento das partículas e no aumento da permeabilidade a frio do leito. A permeabilidade do leito mais elevada facilita o fluxo de gás ao longo de sua extensão, melhorando as condições de queima.

## 1.2 Efeitos da Dosagem de Aglomerantes no Processo de Preparação da Mistura

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 retenção do aglomerado e evita a desintegração das quase partículas no ato de aglomeração, no manuseio e secagem da mistura na máquina. A quantidade de partículas aglomeradas é diretamente proporcional ao percentual utilizado do agente aglomerante[3].

A maior quantidade de finos na mistura reduz seu índice de aglomeração reduzindo a permeabilidade do leito e a produtividade do processo de sinterização. A adição de cal à mistura aumenta a aglomeração das partículas finas, melhorando a granulação da mistura.

## 1.3 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 à energia aplicada para efetivação da mistura propriamente dita, homogeneidade das espécies químicas e componentes e distribuição uniforme da água no processo.

Alguns equipamentos específicos contribuem para o processo de formação da *quasi*-partícula, mas precisam do processo de mistura e homogeneização em um

nível adequado para que possa alcançar um bom desempenho de aglomeração, propiciando a mistura um engrossamento.

### 1.3.1 Misturador Tambor

O misturador tambor atua somente na efetivação da mistura. Externamente, o misturador é semelhante ao Nodulizador Tambor, porém traz em seu interior pás revolventoras de material até a metade do seu comprimento geralmente. O objetivo destas pás é de homogeneizar todo o material, antes do processo de aglomeração a frio propriamente dito. A figura 2 apresenta um esquema de um misturador tambor:

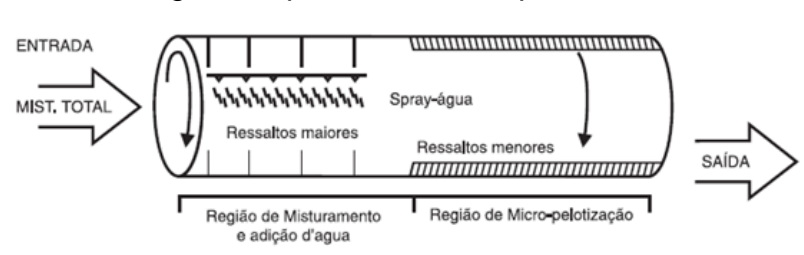


Figura 2. Esquema típico de um misturador tambor[3].

### 1.3.2 Nodulizador Tambor

O Nodulizador Tambor (vide Figura 3) foi desenvolvido para aumentar a eficiência de aglomeração de uma planta de sinterização convencional, trabalhando sempre associado a um equipamento de mistura.

As ferramentas menores dos Nodulizadores são preenchidas pela própria mistura, formando uma camada passiva, essencial para o processo de aglomeração e também tendo um efeito de proteção da carcaça do equipamento. O rolamento da mistura dentro do nodulizador ativa o processo de nucleação propiciando a formação das *quasi*-partículas, iniciando de fato o processo de aglomeração.



Figura 3. Esquema típico de um nodulizador tambor[3].

### 1.3.3 Misturador Intensivo

A diferença essencial entre os misturadores do tipo tambor 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[4]. Tal condição permite variações de velocidade de 2m/s até 24m/s e que resultam em uma aplicação de energia específica e aumentam muito a efetivação da mistura[4].

A ação das ferramentas de mistura promove um fluxo em corrente tridimensional, onde cada partícula da composição é forçada a mudar de posição em larga escala nas direções horizontal e vertical.

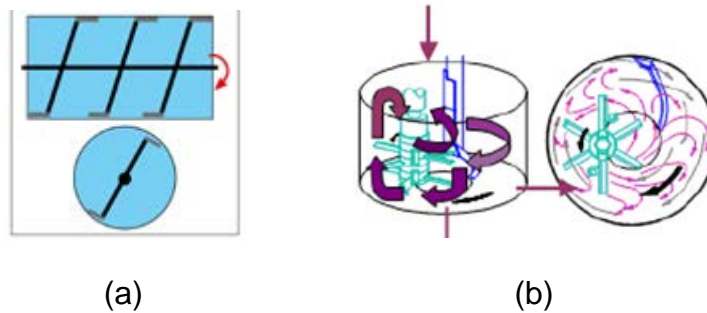


Figura 4. Misturador Intensivo (a) Horizontal e (b) Vertical[4].

### 1.3.4 Processo HPS

O processo HPS foi idealizado a partir de 1980 por Sakamoto e equipe, dentro da instalação do Centro de Pesquisa da NipponKokanCo., atual JFE com as seguintes metas: (i) possibilitar uma flexibilidade na distribuição granulométrica do minério; (ii) possibilitar um aumento do teor de ferro já que o *pellet feed*, era geralmente oriundo da concentração, tendo, portanto, maior teor de ferro; (iii) alta produtividade e alto rendimento sob condições de baixa sílica; (iv) baixo consumo de energia; (v) alta redutibilidade do sinter produzido; (vi) baixo RDI[5].

O processo HPS se caracteriza pela adição, ao circuito convencional de sinterização, de discos pelletizadores e uma etapa de recobrimento da *quasi*-partícula com combustível moído. Essa etapa é realizada em um nodulizador (*coke coating*) e tem como objetivo melhorar a transferência térmica e, por conseguinte reduzir o consumo de combustível no processo[5].

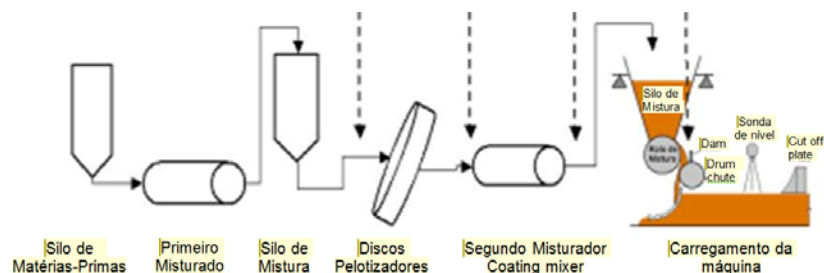


Figura 5. Fluxo esquemático do processo HPS[5]

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

### 1.4 Cenário da Siderurgia Nacional

Uma alteração significativa no *split* das minas em operação tem uma grande influência sobre o modo operacional das usinas siderúrgicas integradas nacionais e grande parte das internacionais. Existe uma necessidade de adequação das plantas de sinterização em operação, principalmente porque a carga metálica dos reatores de redução destas plantas, com algumas exceções, é composta em sua grande maioria de sinter, vide Tabela 1.

Tabela 1. Carga típica dos Altos-Fornos[1]

País	% Sínter	% 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 (Não integradas)	-	100	-

Pelas plantas de sinterização nacionais é possível identificar a alteração de layouts como a implantação de tambores nodulizadores, instalação de misturadores intensivos horizontais e verticais e implementação do sistema HPS. Todas essas tecnologias na busca de melhorias das condições operacionais, tentando aumentar a robustez do processo quanto ao manuseio de misturas mais finas.

Ao longo dos próximos anos, já se tem sinalizado pelo setor de mineração nacional o afinamento ainda mais acentuado dos minérios de ferro. Dessa forma, torna-se necessário ter uma opção tecnológica que permita manusear elevadas participações de finos na mistura de minério (>40%), visando à manutenção dos níveis de produtividade, que foi o foco principal deste estudo.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Na etapa experimental do estudo, considerou-se para as simulações físicas e caracterizações do estudo um minério de ferro classificado como *sinterfeed* e um minério classificado como *pellet feed*, ambos fornecidos pela Mineradora Vale S.A. Outras matérias-primas utilizadas na etapa experimental também foram produtos comerciais, sendo a bentonita, o quartizito, o antracito e o calcário calcítico de fornecimento pelo Departamento de Pelotização da Vale S.A. 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, equipamentos e conceitos capazes de viabilizar o aumento da participação de finos. Por definição, tomando-se como base a mistura de minérios, foi considerada fina a fração <0,150mm. Torna-se importante esta definição pela própria variação presente na literatura em relação ao *range* de distribuição granulométrica que define o *sinterfeed* e o *pellet feed*.

A rota HPS que permite a participação de 40% de finos de minérios na mistura à sinterizar foi considerada o ponto de partida do estudo.

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

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

Os procedimentos de caracterização de matérias-primas, simulação física e caracterização tecnológica do sínter produzido foram realizados utilizando as técnicas e equipamentos do CTF (Centro de Tecnologia de Ferrosos) da Vale S.A. Os seguintes equipamentos foram utilizados:

**Misturador/Nodulizador tambor** – O sistema de mistura de cimento (Figura 6) é comumente utilizado para simular o misturador/nodulizador tambor em escala piloto,

para simulação do nodulizador, as ferramentas são retiradas. Tem uma capacidade de máxima de 120kg/batelada, com rotação variável de 0 a 18rpm.



Figura 6. Misturador/Nodulizador tambor piloto.

**Misturador/Nodulizador Intensivo Vertical** – Misturador Eirich (Figura 7) de escala piloto é um misturador com inclinação fixa de 20°, capacidade de preparação de 150kg/batelada, tem uma ferramenta de mistura em formato estrela dupla com velocidade variável de 0 a 368rpm.



.Figura 7. Misturador/Nodulizador Intensivo Vertical piloto.

**Misturador/Nodulizador Intensivo Horizontal** – O misturador Lödige (Figura 8) de escala piloto com velocidade de rotação do eixo principal de 0 a 120rpm, com capacidade de 80kg/batelada.



Figura 8. Misturador/Nodulizador Intensivo Horizontal piloto.

**Sinterização Piloto** – O sistema (Figura 9) consiste na simulação do processo de sinterização de forma estática, replicando a altura do leito e as condições de perda de carga aplicada um processo de sinterização industrial. Além das simulações a quente, o sistema foi responsável para avaliação do JPU de cada condição simulada.

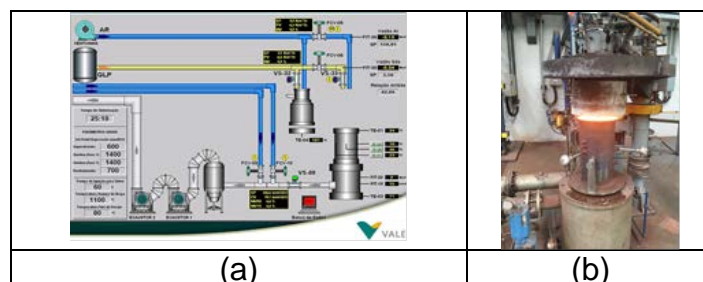


Figura 9.(a) Sistema Supervisorio e (b) Sínter piloto.

Os procedimentos de simulação piloto utilizados foram baseados no procedimento e

padronizado pelo CTF.

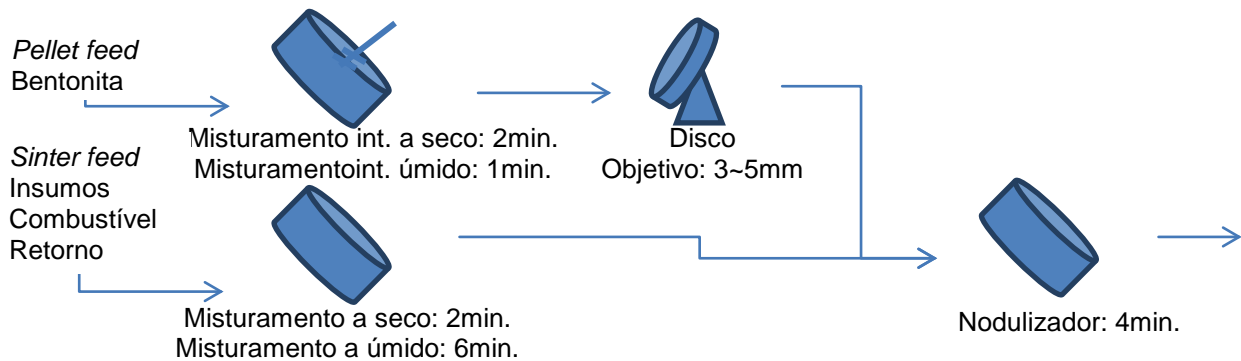
**Rota HPS** – A rota foi composta pela sequência de equipamentos: (i) misturador tambor; (ii) disco; (iii) nodulizador tambor. A Figura 10 apresenta o fluxo principal da



mistura durante o processo de simulação.

**Figura 10.** Fluxo de simulação do processo HPS.

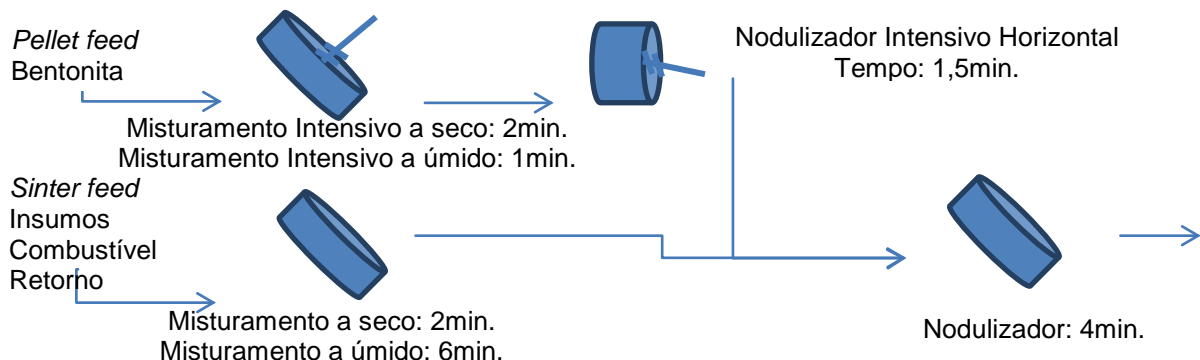
**Rota PWT (Paul Wurth Technology)** – A rota (Figura 11) foi composta de duas derivações iniciais, que trabalharam em paralelo para tratar separadamente o *pellet feed* do *sinterfeed*. Para o *pellet feed* + bentonita → (i) misturador intensivo vertical e (ii) disco; para *sinterfeed* e o restante das matérias-primas componentes da



mistura → (i) misturador tambor.

**Figura 11.** Fluxo de simulação do processo PWT.

**Rota PWT I (Paul Wurth Technology I)** – A rota (Figura 12) foi composta de duas derivações iniciais, que trabalharam em paralelo para tratar separadamente o *pellet feed* do *sinterfeed*, sendo a sequência dos equipamentos: para o *pellet feed* + bentonita → (i) misturador intensivo vertical e (ii) nodulizador intensivo horizontal; para o *sinterfeed* e o restante das matérias-primas componentes da mistura → (i) misturador tambor.



**Figura 13.** Fluxo de simulação do processo PWT I.

As simulações foram realizadas nas condições de umidade no range de 6,5% a 9,5%, com incrementos de 0,5%; e cal em 3 níveis. Os resultados destas simulações



balizaram a definição da umidade ótima e também as condições de melhor desempenho para serem avaliadas a quente.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise da caracterização tecnologia das matérias-primas (vide Tabela 2) foi utilizada para entendimento dos efeitos das qualidades química e do tamanho das partículas na mistura total.

**Tabela 2.** Composição química das matérias-primas (%)

Matéria-prima	Fet	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P	Mn	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	PPC
Sinterfeed	62,10	7,16	1,02	0,053	0,20	0,08	0,10	0,062	2,11
Pellet feed	67,91	1,51	0,37	0,019	0,04	0,07	0,01	0,060	0,73
Bentonita	4,92	52,93	20,48	0,014	0,12	1,95	2,98	0,345	10,10
Calcário dol.	3,06	5,80	0,39	0,013	0,47	28,30	17,52	0,034	42,60
Calcário cal.	0,43	3,78	0,73	0,049	0,09	51,85	0,66	0,032	41,42
Cal Virgem	0,44	3,32	0,52	0,071	0,03	84,85	0,40	0,028	7,45
Quartzito	0,39	98,24	0,21	0,002	0,04	-	0,02	0,008	0,17

A Tabela 3 apresenta a análise imediata e química dos combustíveis sólidos utilizados na mistura total na proporção de 50%/50% em massa.

**Tabela 3.** Análise imediata/química dos combustíveis sólidos (%)

Amostras	Carbono fixo	Matéria Volátil				Cinzas			Umidade (%)	
CokeBreeze	84,98	3,06				11,96			1,80	
Antracito	73,47	10,17				16,36			3,34	
Cinzas (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	PPC	
CokeBreeze	8,88	58,66	23,75	0,641	0,078	2,04	0,86	1,21	0,30	
Antracito	6,84	56,30	22,54	0,466	0,065	2,85	0,94	1,14	0,58	

Quanto à caracterização física, a Tabela 4 apresenta cada matéria-prima utilizada quanto ao percentual retido simples nas malhas indicadas:

**Tabela 4.** Distribuição granulométrica

M.P.	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	
Sinterfeed	5,41	9,73	5,88	14,25	12,99	6,36	6,78	6,86	4,36	11,16	16,22	2,66
Pellet.Feed	-	-	-	-	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
Quartzito	-	-	-	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

Tabela 5 apresenta a participação em massa (base seca) dos componentes das misturas a sinterizar propostas para o HPS.

**Tabela 5.** Composição das misturas da rota HPS

Comp.	HPS40cal4,5		HPS60 cal4,5		HPS80cal4,5		HPS60cal5,0		HPS80cal5,0	
	MP	MT	MP	MT	MP	MT	MP	MT	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

O desempenho verificado em cada condição é apresentado na Figura 13.

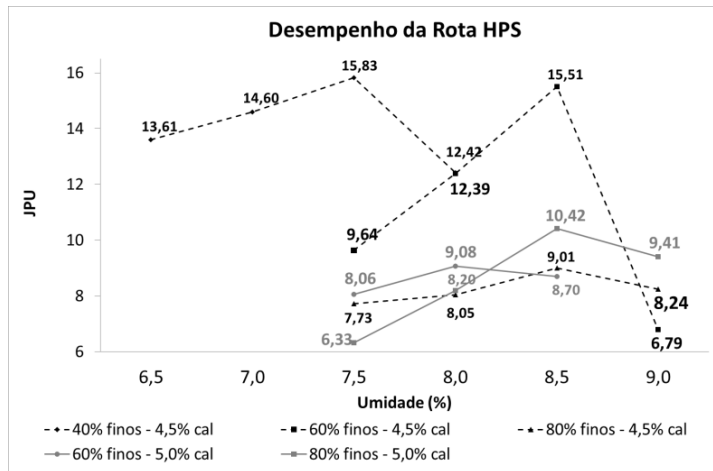


Figura 13. Desempenho de aglomeração a frio da rota HPS.

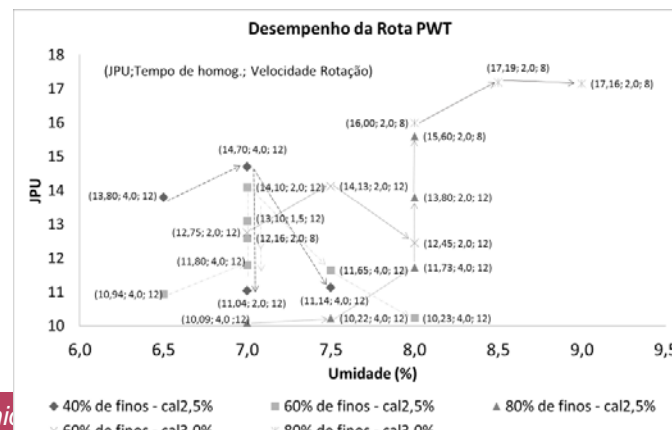
Com base nos resultados de JPU, a condição de melhor desempenho quanto à aglomeração a frio foi à condição simulada com 40% de finos e 7,5% de umidade, considerando a dosagem de cal em 4,5%. A tentativa de aumentar a dosagem de cal para retomada do bom desempenho obtido na condição com 40% de finos não foi bem sucedidas ao ponto de considerar o aumento uma alternativa técnica para viabilização da operação nos níveis de finos acima de 40%.

As misturas submetidas às rotas PWT e PWTI foram idênticas. A Tabela 6 apresenta as misturas segundo as premissas de qualidade e composição definidas.

Tabela 6. Composição das misturas das rotas PWT e PWTI

Comp.	MF40 – cal2,5		MF60 – cal2,5		MF80 – cal2,5		MF60 – cal3,0		MF80 – cal3,0	
	MP	MT	MP	MT	MP	MT	MP	MT	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
Quartzo	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

A Figura 14 apresenta o desempenho a frio das misturas simuladas considerando a rota PWT.

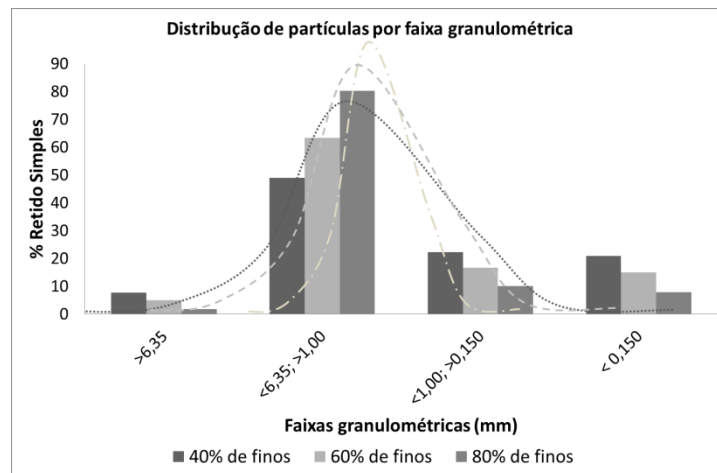


**Figura 14.**Desempenho de aglomeração a frio da rota PWT.

O destaque de desempenho foi a condição com 80% de finos, umidade de 8,5%. Porém para estas condições houve a necessidade de realizar ajustes operacionais nas condições de processo para aperfeiçoar os resultados, a grande dificuldade inicial foi manter a integridade do aglomerado resultante dos discos, que tem baixa resistência mecânica a frio.O aumento de cal trouxe um efeito benéfico e deve ser considerado para melhoria de desempenho.

A medida que a participação de finos foi aumentando para 60 e 80%, percebeu-se um efeito prejudicial ao processo, pois o produto da rota de preparação utilizando disco estava sendo destruído na etapa de mistura e homogeneização. 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 380cm<sup>2</sup>/g) aglomerado a frio com distribuição granulométrica entre 3 a 5mm. Devido a isto, foi necessário minimizar ao máximo a energia aplicada ao processo de mistura e homogeneização.

A Figura 15 apresenta, de forma gráfica, o engrossamento artificial da mistura e a redução da dispersão granulométrica com aumento da participação dos finos.



**Figura 15.**Distribuição de partículas das misturas simuladas na rota PWT.

A melhoria do desempenho a frio das misturas esta diretamente correlacionada com o aumento de finos, pelo fato de que os finos foram aglomerados formando *quasi*-partículas na faixa de 3 a 5mm. O aglomerado resultante dos discos apresenta granulometria bem estreita, logo a dispersão granulométrica da mistura a sinterizar foi reduzida, beneficiando a permeabilidade do leito.

A Figura 16 apresenta o desempenho a frio das misturas simuladas considerando a rota PWT I.

Os equipamentos intensivos de nodulização aplicam uma grande energia às misturas, o que prejudicou a formação das *quasi*-partículas. A literatura cita casos de sucesso utilizando equipamentos intensivos como nodulizadores, porém de fato o resultado não se repetiu no presente estudo. As partículas mais grossas podem ter prejudicado o processo de formação das partículas devido a grande movimentação no interior do equipamento, hipótese que precisa ser verificada, porém não explorada no presente trabalho.

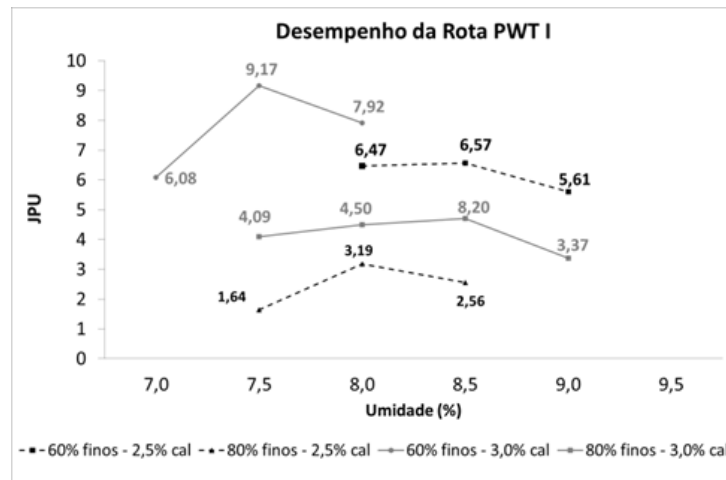


Figura 16. Desempenho da rota PWT I.

As simulações a frio de melhor desempenho foram consideradas novamente para a etapa de simulação a quente do processo, porém ao se iniciar as queimas da rota HPS com 80% de finos, que apresentou um JPU de 9,01, uma grande dificuldade foi encontrada. Devido à falta de permeabilidade adequada do leito, as temperaturas dos termopares não subiram e a temperatura da caixa de vento ficou muito abaixo das referências consideradas no CTF.

Em uma avaliação minuciosa, chegou-se a conclusão de que mais algumas condições selecionadas para as simulações a quente apresentavam condições de permeabilidade parecidas ou ainda mais severas do que foi vista na condição simulada da rota HPS, sendo canceladas todas as simulações a quente que apresentassem valores de JPU inferior a 10.

Os resultados das queimas são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7. Resultados das queimas

Condição	Peso carregado (kg)	Tempo sint. (min)	Balanço Finos (%)	Densidade (t/m <sup>3</sup> )	Tamboramento		Prod. (t/m <sup>2</sup> .d)	C.E.C (kg/t sínter)
					%>6,3mm	%<0,5mm		
HPS40 4,5% de Cal	61,27(± 0,12)	26,97(± 0,75)	98,32(± 0,44)	1,93(± 0,01)	68,98	5,94	29,78(± 0,84)	67,22(± 0,18)
PWT40 2,5% de Cal	59,64(± 0,26)	26,04(± 0,51)	99,13(± 0,88)	1,88 (± 0,01)	70,25	5,74	29,52(± 0,66)	68,86(± 0,32)
PWT60 3,0% de Cal	59,22(± 0,34)	24,66(± 0,12)	99,85(± 1,03)	1,87(± 0,02)	61,08	5,54	31,20(± 0,23)	85,60(± 0,10)
PWT80 3,0% de Cal	58,90(± 0,55)	24,07(± 0,86)	111,09(± 7,37)	1,85(± 0,02)	57,40	5,13	29,74(± 1,28)	120,81(± 3,10)

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 o peso apresentou o mesmo comportamento de redução com o aumento da dosagem de finos. Tanto a redução do peso de carregamento quanto a redução da densidade do leito remeteram a uma condição de menor empacotamento do leito e por consequência uma maior permeabilidade.

O perfil de vazão de cada queima, vistos na Figura 17 evidenciam bem o aumento progressivo da permeabilidade.

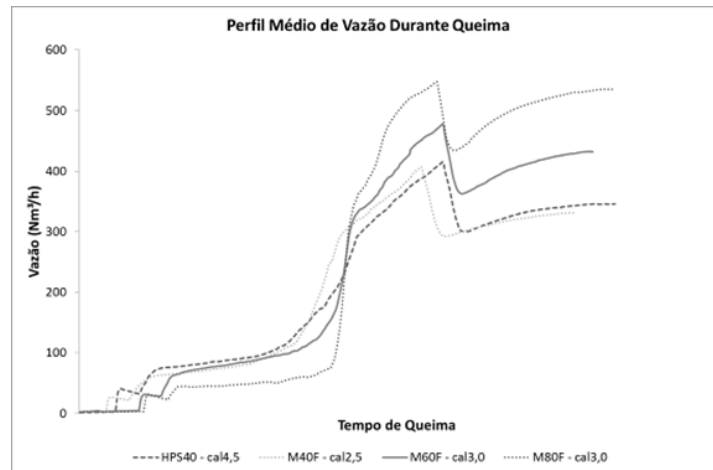


Figura 17. Perfil de vazão durante o processo de queima.

A dificuldade vista no fechamento do balanço já era esperada, principalmente nas condições de 60% e 80% de finos, principalmente pela drástica redução do volume de escória do sínter, vide Tabela 8.

Tabela 8. Composição química do sínter produto(%)

Condições	Fet	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P	Mn	CaO	MgO	FeO	VE
HPS40 4,5% de Cal	55,21	6,16	1,09	0,055	0,17	11,80	1,21	6,16	20,27
PWT40 2,5% de Cal	54,98	7,07	1,05	0,056	0,17	12,19	1,14	5,01	21,45
PWT60 3,0% de Cal	58,81	5,31	0,93	0,038	0,11	9,15	1,15	9,92	16,55
PWT80 3,0% de Cal	62,48	3,57	0,83	0,034	0,09	5,93	1,18	18,61	11,51

A matriz de escória é uma variável importante para resistência mecânica do sínter produto como também para o rendimento do processo.

A distribuição granulométrica (vide Tabela 9) tendeu, como esperado a acompanhar o comportamento mecânico do sínter, logo o sínter mais frágil foi o mais fino e consequentemente o de menor tamanho médio.

Tabela 9. Composição química do sínter produto(%)

Malhas (mm)	HPS40 – cal4,5	PWT40 cal2,5	PWT60 cal3,0	PWT80 cal3,0
	Percentual Retido Simples (%)			
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

As queimas realizadas resultaram sinteres (Figura 18) com qualidade química dentro do esperado sendo que em ambas as queimas o produto gerado apresentou características melhores, em algumas situações comparativamente ao sinter que vem se produzindo industrialmente e algumas outras que precisaram ser otimizadas para serem considerados como possibilidade de aplicação industrial.



HPS40 –cal4,5

M40F –cal2,5

M60F –cal3,0

M80F – cal3,0

Figura 18. Sinter produto de cada condição.

## 4 CONCLUSÕES

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

O melhor desempenho da rota PWT se deve ao aumento da participação das *quasi*-partículas produzidas no disco, pois estas apresentaram uma distribuição granulométrica estabilizada e com baixa dispersão. O resultado é observado na redução da dispersão granulométrica, corroborando para uma melhora expressiva na permeabilidade do leito.

A redução da resistência mecânica do sinter com elevação gradativa da participação de finos influenciou de forma negativa a distribuição granulométrica, sendo esta redução bastante significativa para a condição 80%, o que de fato inviabilizaria a utilização deste sinter em grandes reatores de redução.

Foi possível atingir até 60% de participação de *pellet feed* na mistura de minérios com estabilidade, porém para se atingir 80% é necessário otimizar, principalmente a dosagem de combustível e verificar o efeito na resistência física do sinter produto.

## REFERÊNCIAS

- 1 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.
- 2 LIMA, T. M; NEVES, C. A. R. Sumário Mineral 2015. Brasília – DF, Brasil: Departamento Nacional de Produção Mineral. 2016. 135 folhas
- 3 HONORATO, Edilson Pinto. Adequação Granulométrica das Matérias-Primas e do Sistema de Segregação Contínua (I.S.F.), para Melhorias na Produtividade e Qualidade do Sinter para os Altos-Fornos. 2005. 126 folhas. Dissertação de Mestrado em Engenharia Metalúrgica. Escola de Engenharia, UFMG, Belo Horizonte, 2005.
- 4 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.
- 5 JANUZZI, Aécio. Análise da Aglomeração a Frio no Processo HPS (Hybridized Pelletized Sinter) com Ênfase nas Matérias-Primas Envolvidas. 2008. 145 folhas. Dissertação de Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Escola de Engenharia, UFMG, Belo Horizonte, 2008.