



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO  
Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto  
Departamento de Engenharia de Minas  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral – PPGEM



***CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE UM SINTER FEED HEMATÍTICO  
CONTENDO DIFERENTES PROPORÇÕES E TIPOS DE SÍLICA NAS FRAÇÕES  
ADERENTES, INTERMEDIÁRIAS E NUCLEANTES***

Autor: **VICTOR PEREIRA PADULA**

Orientadores: **Prof. Dr. CARLOS ALBERTO PEREIRA**  
**Prof. Dr. CLÁUDIO BATISTA VIEIRA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Minas.

Área de concentração: **Tratamento de Minérios**

Ouro Preto, 09 de abril de 2009

---

---

**1. P125c      Padula, Victor Pereira.**

Caracterização tecnológica de um *sinter feed* hematítico contendo diferentes proporções e tipos de sílica nas frações aderentes, intermediárias e nucleantes [manuscrito] / Victor Pereira Padula. – 2009.  
xvii, 93 f. : il., graf., tabs., mapas.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Pereira.  
Co-orientador: Prof. Dr. Cláudio Batista Vieira.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto.  
Departamento de Engenharia Mineral. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral.

Área de concentração: Tratamento de minérios

1. Prospecção - Teses. 2. Sílica - Teses. 3. Travertino - Teses.  
I. Universidade Federal de Ouro Preto. II. Título.

CDU: 666.363

Catlogação: [sisbin@sisbin.ufop.br](mailto:sisbin@sisbin.ufop.br)

---

**“CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE UM SINTER FEED  
HEMATÍTICO CONTENDO DIFERENTES PROPORÇÕES E  
TIPOS DE SÍLICA NAS FRAÇÕES ADERENTES,  
INTERMEDIÁRIAS E NUCLEANTES”**

**AUTOR: VICTOR PEREIRA PADULA**

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 09 de abril de 2009, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:



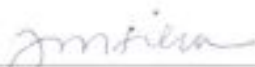
- 
- Prof. Dr. Antônio Eduardo Clark Peres (Membro) – UFMG



- 
- Prof. Dr. Carlos Alberto Pereira (Orientador) – UFOP



- 
- Prof. Dr. Cláudio Batista Vieira (Orientador) – UFOP



- 
- Prof. Dr. José Margarida da Silva (Membro) – UFOP

---

---

## Agradecimentos

- ✓ A DEUS pelo dom da VIDA.
- ✓ Ao meu saudoso **PAI**, meu guia, meu exemplo de vida, exemplo de honestidade, vontade, bondade, sabedoria... É pra você meu “velho” com muito orgulho, um brinde e esteja em paz aonde estiver.
- ✓ À minha mãe querida, exemplo de SUPERANÇA E FÉ, minha inspiração de sempre.
- ✓ A minha linda esposa Cida (realmente uma grande mulher) e meus pequeninos Matheus e Victória, luzes na minha vida.
- ✓ Minha irmã Marina, pelo seu apoio e sua prontidão para ajudar a solucionar problemas. Ao meu irmão Leo pelo incentivo de sempre.
- ✓ Ao Cláudio Batista, pelas suas orientações, pelos anos de trabalho em equipe e pelo seu lado humano de enxergar o outro.
- ✓ Um especial agradecimento ao Hamilton Porto Pimenta e à Maria Beatriz Vieira, ambos amigos trabalhando juntos na Vale, pelo dom de doar o saber, pelas orientações e disponibilidade, são pessoas especiais e abençoadas.
- ✓ À Vale na pessoa do Leonardo Queiroz e equipe (CPTs de Mariana e Itabira), às equipes dos laboratórios e da sinterização piloto da DITM, ao grande Flávio Dutra e a Ana Belém pelo apoio e pronto atendimento.
- ✓ Ao Toninho Peres e Carlão por fazerem parte deste trabalho.
- ✓ Ao Gentil Santos, pelo incentivo, ensinamentos técnicos, e apoio para que o projeto (naquela época) fosse iniciado.
- ✓ Ao Túlio Weber, pela compreensão quanto a importância deste trabalho e apoio para que este pudesse chegar ao fim.
- ✓ Ao José Eloy, pelos ensinamentos técnicos.
- ✓ À Beverly pela ajuda e parceria.
- ✓ Por fim a todos que de alguma forma contribuíram para o sucesso deste trabalho.

---

---

## Resumo

No Quadrilátero Ferrífero estão localizadas importantes reservas de minério de ferro da Vale. A relação hematita/itabirito nos ROMs ao longo do tempo vem se tornando cada vez menor, sendo que esta redução é resultado direto de um ROM mais itabirítico se comparado à última década. As usinas de beneficiamento vêm investindo grande esforço para reduzir a sílica do *sinter feed* e alcançar os níveis de qualidade exigidos para o processo de sinterização. Esta adequação das rotas de processo para produção deste *sinter feed*, é realizada hoje sem que haja um conhecimento aprofundado sobre o impacto da qualidade intrínseca da sílica do minério nos parâmetros de processo da sinterização e na qualidade física e metalúrgica do sinter produto. Nesse contexto, o principal objetivo deste trabalho é caracterizar tecnologicamente um *sinter feed* hematítico contendo diferentes proporções e tipos de sílicas nas frações aderentes, intermediárias e nucleantes. O *sinter feed* base recebeu a adição de três diferentes fontes de sílica. Para caracterização do *sinter feed* base e das fontes de sílica, foram feitas análises químicas, granulométricas, mineralógicas e microestruturais através das seguintes técnicas: fluorescência de raios-X, via úmida, microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura e difratometria de raios-X. Foram feitas nove misturas para os ensaios em triplicata de sinterização piloto, adicionando para cada mistura, diferentes fontes de sílica nas frações aderentes, intermediárias e nucleantes. Após as queimas foram feitas análises químicas, físicas, metalúrgicas e mineralógicas dos sínteres produzidos. O *sinter feed* sul (SFS) apresentou um teor de sílica global de 2,51%. As três fontes de sílica adicionadas apresentaram grandes diferenças nos seus teores de SiO<sub>2</sub>. A sílica na mistura de minérios (*sinter feed* base + fonte adicionada) foi de 3,76% em média. A sílica do Itabirito compacto na fração nucleante foi classificada como sendo do tipo mista (SM), e as das frações intermediárias e aderentes como do tipo liberada monocristalina (SLM). A sílica do rejeito de jigue foi classificada nas três frações granulométricas como do tipo sílica liberada monocristalina (SLM). A sílica do quartzito foi classificada como do tipo liberada policristalina (SLP). A variação do teor de sílica entre os nove sínteres produzidos ficou entre 4,15% e 4,49% e o

---

---

tamanho médio das partículas variou de 25,99mm a 22,99mm. Os sínteres produzidos apresentaram em média a seguinte composição mineralógica (% em área, avaliação em microscopia ótica): 40% de hematita, 32% de magnetita, 20% de ferritos, 6% de silicatos, 1,5% de calcário residual e 0,5% de quartzo residual. As diferentes fontes de sílica e/ou sua proporção em diferentes frações granulométricas influenciaram a qualidade física e metalúrgica dos sínteres produzidos. O aumento da sílica na fração aderente contribuiu para uma melhor resistência ao tamboramento e uma pior resistência à queda do sínter (exceto para o caso do quartzito). A sílica itabirito compacto foi a que menos contribuiu para uma melhor resistência ao tamboramento do sínter. A fração intermediária para esta sílica foi a que apresentou o menor patamar de resistência ao tamboramento e o segundo menor resultado no ensaio de queda, sendo que o menor resultado apresentado foi na fração aderente da mesma. A sílica liberada monocristalina foi a que propiciou os melhores níveis de resistência ao tamboramento independentemente da sua fração. O índice de degradação durante redução do sínter (RDI) apresentou seus mais baixos resultados (melhores resultados) com o aumento da proporção de sílica na fração aderente. A sílica liberada monocristalina propiciou, praticamente para todas as faixas granulométricas, o maior nível de RDI (pior valor). Quanto à redutibilidade dos sínteres, os melhores resultados foram os obtidos com a sílica liberada policristalina, além de serem os mais estáveis entre suas frações granulométricas. Comparando-se os resultados de redutibilidade dos sínteres entre as fontes rejeito de jigue e itabirito compacto, há uma inversão de tendências, a sílica liberada monocristalina tem seu melhor resultado na fração aderente (72,3%), e a sílica mista apresenta seu melhor resultado na fração nucleante (71,9%). As diferentes fontes de sílica e/ou sua proporção em diferentes frações granulométricas influenciaram a produtividade e o consumo de combustível da sinterização em escala piloto. Existe uma forte tendência da sílica na fração nucleante contribuir para melhoria dos níveis de produtividade na sinterização em escala piloto. A fonte de sílica itabirito compacto contribuiu para os melhores níveis de produtividade na sinterização em escala piloto. O consumo de combustível, nas condições estudadas, atingiu os seus mais baixos níveis para a sílica na fração nucleante. Com relação às fontes de sílica, existe uma tendência de um menor consumo de combustível para o rejeito de jigue, exceto quando na fração aderente.

## VI

---

---

## Abstract

There are important Vale iron ore reserves located in the state of Minas Gerais. The hematite/itabirite relationship in the ROMs has been decreasing compared to the last decade. The beneficiation plants have been concentrating its efforts on reducing the silica content in the *sinter feed* in order to reach the quality levels demanded for the sintering process. Although the process routes are being adequated, this is occurring without the profound knowledge required with regard to the quality impact of the *sinter feed* silica within the sintering process parameters and the physical and metallurgical quality of the sinter product. The objective of this study is to characterize a hematite *sinter feed* containing different silica proportions and types in the following grain size distribution: aderent, intermediate and nucleant. The *sinter feed* base had received silica from different sources. The three silica sources used were: compact itabirite from Itabira, jig tailing from Água Limpa and finally the quartzite produced in the state of Espírito Santo. For the *sinter feed* base and silica source characterizations the following chemical, grain size distribution, mineralogical and microstructural analyses were performed. The methods involved were: an X-ray florescence, a humidity technique, an electronic and optic microscope and X-ray diffraction. Nine combined mixtures with different proportions of silica sources were added in different grain size distributions and tested in the sintering plant (pot grate) representing on average 26% of the total mixture or 35% of the iron ore combination (*sinter feed* base + added silica sources). The produced sinter was submitted to chemical, physical, metallurgical and mineralogical analyses and the obtained results were treated using the statistical DOE and ANOVA method but at times just the overall view tendencies. The *sinter feed* base chemical results presented a global silica content of 2.51%. The variation of the silica content among the three added sources was from 17.03% for compact itabirite to 96.13% for quartzite in all granulometric fractions. The jig tailing presented the highest level of alumina content, above 2%, regardless of the grain size distribution. The silica iron ore mixture (*sinter feed* base + added silica sources) was on average 3.76%. The nucleant fraction of the compact itabirite is non liberated (SM) for intermediate and aderent fractions

---

---

they are both liberated monocristaliine. The jig tailing was classified in all grain size fractions as liberated monocristaliine. Finally, the quartzite was classified as liberated policristaliine. The nine silica sinter product variations were between 4.15% and 4.45% and the binary basicity between 1.72 and 1.77. The average size varied from 25.99mm to 22.99mm, the mineralogical composition (area percentage) was: hematite 40%, magnetite 32%, ferrite 20%, silicates 6%, residual calcareous 1.5% and residual quartz 0.5%. Maintaining the same grain size distribution, the compact itabirite has the highest silicate percentage, whereas, the jig tailing has the lowest. The different silica characteristics and/or its added distribution proportions influenced the physical and metallurgical results of the sinter product. The best tumbler index results were obtained by the usage of aderent fraction, whereas in the shatter test, the result tendencies were reduction, except for the liberated policristaliine silica (SLP). The compact itabirite tumbler index results contributed minimally. Moreover, its aderent fraction showed the lowest level for this test and second lowest result in the shatter test. At the bottom level of the scale was the compact itabirite in the aderent fraction. Regardless of the fraction, the jig tailing demonstrated the best tumbler resistance level. Due to the aderent silica proportion increase, the RDI tests presented its lowest results (meaning the best). For practically all the fractions, the jig tailing reached the highest RDI level (meaning the worst). The best and most stable reducibility results were obtained with the usage of quartzite. There is an inversion tendency between jig tailing (aderent fraction 72.3%) and compact itabirite (nucleant fraction 71.9%). The different silica characteristics and/or its added distribution proportions influenced the fuel consumption and productivity results of the sintering process. In the nucleant fraction, there exists a strong tendency for obtaining the best productivity levels in the sintering process. In addition, the compact itabirite contributed to the highest productivity levels. The nucleant fraction resulted in lower fuel consumption. With the jig tailing usage, there exists a tendency of a lower fuel consumption with the exception of aderent fraction.

## VIII



---

---

## Sumário

Agradecimentos	IV
Resumo	V
Abstract	VII
1. Introdução.....	01
2. Objetivos.....	04
2.1. Objetivo geral.....	04
2.1. Objetivos específicos.....	04
3. Revisão Bibliográfica.....	05
3.1. Minérios de Ferro do Quadrilátero Ferrífero.....	05
3.1.1. Introdução.....	05
3.1.2. Minérios hematíticos e itabiríticos.....	05
3.1.3. Mineralogia e tipologia de minérios de ferro.....	06
3.1.4. Principais jazida/minas e produtos da Vale.....	08

---

3.2. Beneficiamento mineral: produção de <i>sinter feeds</i> a partir do processamento de ROM'S hematíticos e itabiríticos.....	10
3.3. Sinterização de minérios de ferro.....	12
3.3.1. Introdução.....	12
3.3.2. O processo de sinterização e variáveis de processo.....	12
3.3.3. Matérias primas e atributos importantes do <i>sinter feed</i> .....	14
3.3.4. Classificação das partículas do <i>sinter feed</i> quanto a capacidade de microaglomeração: partículas nucleantes, intermediárias e aderentes.....	17
3.3.5. Metodologia de caracterização mineralógica e microestrutural das partículas <i>sinter feed</i> por microscopia ótica.....	18
3.3.6. Formação do sínter heterogêneo.....	20
3.3.7. Propriedades e a microestrutura ideal do sínter heterogêneo.....	22
3.3.8. Atributos intrínsecos do <i>sinter feed</i> : análise crítica no contexto de geometalurgia.....	23
4. Materiais e Métodos.....	26
4.1. Materiais.....	26
4.1.1. Geração da amostra <i>sinter feed</i> sul – (SFS).....	27

---

---

4.1.2. Geração das amostras fontes de sílica (itabirito compacto, rejeito de jigue e quartzito).....	29
4.2. Metodologia empregada para caracterização microestrutural das matérias-primas.....	32
4.2.1. Microscopia óptica (MO).....	36
4.2.2. Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	37
4.2.3. Difratometria de raios-X (DRX).....	37
4.3. Metodologia de preparação da mistura a sinterizar.....	37
4.3.1. Adequação granulométrica das amostras: <i>sinter feed</i> base, rejeito de jigue, itabirito compacto e quartzito.....	37
4.3.2. Sinterização piloto: qualidade química objetivada para o sínter produto e parâmetros de processo.....	38
4.4. Metodologia empregada nos testes de sinterização piloto.....	40
4.5. Metodologia empregada para caracterização do sínter produto.....	43
4.5.1. Caracterização microestrutural do sínter produto.....	43
4.5.2. Avaliação física e metalúrgica do sínter produto.....	44
4.6. Macro fluxograma do desenvolvimento experimental.....	45

---

---

5. Resultados e Discussão.....	46
5.1. Caracterizações química, granulométrica e mineralógica do <i>sinter feed</i> hematítico.....	47
5.2. Caracterizações química, mineralógica e microestrutural das diferentes matérias primas empregadas como fontes de sílica.....	48
5.3. Caracterizações químicas, físicas, mineralógicas e metalúrgicas dos sínteres produzidos em escala piloto.....	57
5.4. Influência de diferentes características intrínsecas da sílica e da distribuição dela nas frações nucleantes, intermediárias e aderentes do <i>sinter feed</i> nas qualidades químicas, físicas e metalúrgicas dos sínteres produzidos em escala piloto.....	61
5.5. Influência de diferentes características intrínsecas da sílica e da distribuição dela nas frações nucleantes, intermediárias e aderentes do <i>sinter feed</i> na produtividade e no consumo de combustível da sinterização piloto.....	65
6. Conclusões.....	70
7. Referências Bibliográficas.....	75
Anexo: Procedimentos e orientações para utilização da sinterização piloto	

---

---

## Lista de Figuras

FIGURA	PÁGINA
Figura 1: Exemplo de rota de processo de beneficiamento.	11
Figura 2: Curva de Astier.	16
Figura 3: Desenho esquemático das reações durante o processo de sinterização.	21
Figura 4: Relação entre os parâmetros físicos e metalúrgicos do <i>sinter</i> heterogêneo e a sua microestrutura.	23
Figura 5: Desenho esquemático do Quadrilátero Ferrífero.	26
Figura 6: Fluxograma esquemático do processo de geração da amostra <i>sinter feed</i> sul.	28
Figura 7: Fluxograma do processo onde foi gerado o rejeito de jigue.	29
Figura 8: Fluxograma do processo de geração da amostra de itabirito compacto.	30
Figura 9: Resultado de análise mineralógica quantitativa (porcentagem em peso) das frações granulométricas da amostra de itabirito compacto.	31
Figura 10: Técnicas experimentais empregadas para caracterização do <i>sinter feed</i> base e das fontes de sílica.	35
Figura 11: Fluxo de preparação das matérias-primas em faixas granulométricas.	38
Figura 12: Condição planejada para os ensaios na planta piloto de sinterização.	39
Figura 13: Planejamento dos ensaios na planta piloto e balanço de massa de cada mistura a sinterizar (porcentagem em peso).	41
Figura 14: Macro fluxograma dos procedimentos experimentais utilizados neste trabalho.	45
Continua na próxima página.	-

FIGURA	PÁGINA
Figura 15: Participação percentual da sílica adicionada por componente da mistura a sinterizar e o teor de sílica de cada mistura de minério.	46
Figura 16: Resultado da caracterização mineralógica e microestrutural do <i>sinter feed</i> sul.	48
Figura 17: Resultado da caracterização mineralógica e microestrutural da fonte itabirito compacto.	50
Figura 18: Resultado da fotomicrografia de MEV e microscopia ótica do itabirito compacto.	51
Figura 19: Resultado da caracterização mineralógica e microestrutural da fonte rejeito de jigüe.	52
Figura 20: Resultado da fotomicrografia de MEV e microscopia ótica da fonte rejeito de jigüe.	53
Figura 21: Resultado da caracterização mineralógica e microestrutural do quartzito.	54
Figura 22: Resultado da fotomicrografia de MEV e microscopia ótica da fonte quartzito	54
Figura 23: Fontes de sílica distribuídas nas frações nucleantes, intermediárias e aderentes, em relação a tamanho médio do cristal de quartzo, o tipo de partícula e o grau de liberação.	55
Figura 24: Mineralogia do sínter produto medida em área (%).	58
Figura 25: Resultados dos ensaios de tamboramento e queda de cada sínter.	59
Figura 26: Resultados dos ensaios de redutibilidade e RDI do sínter.	60
Figura 27: Resultado da interação entre o resultado do ensaio de tamboramento de cada sínter, a fonte de sílica e a fração granulométrica.	61
Continua na próxima página.	-

FIGURA	PÁGINA
Figura 28: Resultados do ensaio de tamboramento de cada síter agrupado por faixa granulométrica.	62
Figura 29: Resultados do RDI agrupado por faixa granulométrica de cada síter.	64
Figura 30: Resultados de produtividade e consumo de combustível da sinterização piloto.	66
Figura 31: Resultado da interação entre as características físicas e mineralógicas das matérias-primas e a produtividade da sinterização piloto.	67
Figura 32: Resultado da interação entre as características físicas e mineralógicas das matérias-primas e o consumo de combustível da sinterização piloto.	68
Figura 33: Diagrama esquemático mostrando a influência das características intrínsecas do quartzo, sobre os parâmetros da sinterização (sinterização piloto) e qualidade física do síter.	69

---

---

## Lista de Tabelas

TABELA	PÁGINA
Tabela 1: Classificação da CVRD e UFOP dos principais minerais de ferro presentes nos minérios brasileiros segundo Rosière et alii (2001).	18
Tabela 2: Prancha de microestruturas típicas de acordo com Rosière et alii (2001).	19
Tabela 3: Principais atributos que deverão constituir a identidade estrutural de finos de minério de ferro para uso em sinterização.	24
Tabela 4: Descrição geral dos tipos e das características intrínsecas de partículas do <i>sinter feed</i> de minérios de ferro brasileiros e da estrutura ideal do microaglomerado produzido na etapa de aglomeração a frio.	25
Tabela 5: Nomenclatura adotada para cada fonte e tipo de sílica adicionada ao <i>sinter feed</i> base.	27
Tabela 6: Percentual em massa por fração granulométrica do <i>sinter feed</i> sul.	27
Tabela 7: Constituintes mineralógicos do itabirito compacto quantificado por microscopia ótica de luz refletida.	31
Tabela 8: Características químicas do sinter e principais parâmetros de processo.	40
Tabela 9: Condições operacionais simuladas para a sinterização piloto.	42
Tabela 10: Técnica experimental empregada na caracterização mineralógica do sinter produto.	43
Tabela 11: Resultados de análise química e granulométrica do <i>sinter feed</i> base.	47
Tabela 12: Resultados das análises químicas das fontes de sílica adicionadas.	48
Tabela 13: Resultados consolidados das análises mineralógicas e microestruturais das fontes de sílica adicionadas.	56
Tabela 14: Qualidade química e granulométrica de cada sinter.	57
Tabela 15: Resultados dos ensaios de queda e tamboramento de cada sinter.	58
Tabela 16: Resultados de produtividade e consumo de combustível da sinterização piloto.	65



---

---

## Lista de Siglas e Abreviaturas

SIGLA / ABREVIATURA	DESCRIÇÃO
DRX	Difratometria de raios-X
HE	Hematita
IT	Itabirito
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MO	Microscopia óptica
ROM	<i>Run of Mine</i>
RDI	<i>Reduction Degradation Index</i>
RI	<i>Reducibility Index</i>
SFS	<i>Sinter Feed Sul</i>
SLM	Sílica Liberada Monocristalina
SLP	Sílica Liberada Policristalina
SM	Sílica Mista
TI	<i>Tumbler index</i>
PPC	Perda por calcinação

---

---

## 1. Introdução

No Quadrilátero Ferrífero estão localizadas importantes reservas de minério de ferro da Vale. Estes podem ser classificados em dois grupos principais: os itabiríticos, mais heterogêneos e contendo óxidos e hidróxidos de ferro, e os hematíticos de alto teor, quimicamente mais homogêneos e ricos em óxidos de ferro (Rosière, 1983; Rosière et alii, 1983). Ambos geralmente compõem o *Run of Mine* (ROM), minério lavrado, geralmente direcionado para o primeiro estágio de cominuição, em que usualmente são utilizados como britadores de mandíbulas.

A Vale, que iniciou suas operações na mina Cauê no início na década de 60 do século XX, vem identificando fortes alterações no perfil do ROM que alimenta as usinas de beneficiamento. A relação hematita/itabirito (HE/IT) nos ROMs, ao longo do tempo, vem se tornando cada vez menor, sendo que esta redução é resultado direto de um ROM mais itabirítico se comparado à última década.

A inversão da relação hematita/itabirito (HE/IT) é uma tendência natural das reservas ou jazidas com a evolução da lavra e, com o aumento da participação de itabiritos na matriz de minérios que são alimentadas nas usinas de beneficiamento, tornam-se cada vez mais importantes investimentos na concentração do minério de ferro *sinter feed*.

As exigências sobre os processos de beneficiamento foram aumentando em função da necessidade crescente de retirada de uma maior porcentagem de sílica do produto *sinter feed*, garantindo um mesmo teor de sílica exigido pelo processo de sinterização que tipicamente é considerado em um patamar de 3,50% a 4,50%, mas podendo variar de acordo com a particularidade de cada usina siderúrgica. Este teor de sílica no *sinter feed* é especificado pelos metalurgistas para garantir a produção de um sínter produto contendo um volume suficiente de escória, de modo a propiciar uma resistência mecânica satisfatória para as operações de manuseio, transporte e para seu uso nos altos-fornos. A resistência mecânica do sínter produto é um ponto crítico do processo industrial de sinterização de minérios de ferro (Vieira et alii, 2003; Coelho, 2002).

---

Assim, em função destas fortes alterações do perfil de alimentação, torna-se a cada dia mais necessário um entendimento de quais parâmetros intrínsecos (sejam eles, químicos, físicos, mineralógicos e/ou microestruturais) dos *sinter feeds* podem interferir no desempenho do processo industrial de sinterização e na qualidade física e metalúrgica do sinter produto.

Salienta-se que a avaliação técnica de finos de minérios de ferro para sinterização, no Brasil e no mundo, tanto nas minerações quanto nas siderúrgicas, tem sido rotineiramente baseada na caracterização granulométrica e química das partículas. A análise granulométrica leva em consideração as frações +6,3mm, +1mm, -0,15mm das partículas do *sinter feed*. A análise química é feita principalmente através do controle dos teores de Fe<sub>Total</sub>, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, P, Mn, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O e PPC considerando o teor global de cada elemento no *sinter feed*. Não tem sido feita a análise granuloquímica do *sinter feed* (Vieira, 2003).

Na abordagem geometalurgista esta discussão se estende ainda mais, além de requisitos rotineiros como as especificações globais de química e distribuição granulométrica, há ainda a necessidade de controle dos atributos mineralógicos e microestruturais do *sinter feed*. Torna-se também importante a análise dos diversos constituintes químicos, principalmente com relação aos teores de sílica, nas diferentes frações granulométricas do *sinter feed*, isto é nas partículas nucleantes, intermediárias e aderentes (Coelho, 2002).

Diversas pesquisas relacionadas a este tema têm sido desenvolvidas pela Vale de modo a garantir a seus clientes um desempenho satisfatório de seus produtos nos processos siderúrgicos. Ressalta-se a existência de uma metodologia consolidada de caracterização mineralógica e microestrutural via microscopia ótica desenvolvida para os produtos das usinas de beneficiamento (*sinter feed*, *pellet feed* e granulados). Esta permite realizar uma análise quantitativa e qualitativa criteriosa com relação aos atributos mineralógicos e microestruturais dos minerais-minério (hematita, magnetita e goethita) que compõem o

---

---

*sinter feed*, mas ainda pouco abrangente quanto aos atributos dos minerais de ganga (quartzo, gibbissita, caulinita, etc).

A sílica presente nos minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero apresenta-se majoritariamente como quartzo, e em alguns casos e com menor frequência como silicatos (por ex. a caulinita). É importante salientar que são escassos os trabalhos na literatura sobre a influência dos parâmetros intrínsecos da sílica (como grau de liberação, tamanho de cristal e tipo de partícula, isto é, do tipo liberada monocristalina, liberada policristalina ou mista) do *sinter feed*, assim como de sua distribuição nas partículas nucleantes, intermediárias e aderentes, sobre o desempenho do processo de sinterização e sobre a qualidade física e metalúrgica do sinter produto. Existem poucas informações sobre o efeito destes parâmetros sobre a formação da matriz de escória do sinter produto. Estes parâmetros estão diretamente associados às características geológicas do ROM (hematitas e itabiritos) e podem sofrer alterações dependendo das rotas de processo estabelecidas no beneficiamento.

Nesse contexto, o objetivo geral deste trabalho é caracterizar tecnologicamente um *sinter feed* hematítico típico do processo de beneficiamento da Vale, adicionando-se diferentes proporções e tipos de sílica (provenientes de diferentes fontes) nas frações aderentes, intermediárias e nucleantes.

---

## 2. Objetivos

### 2.1. Objetivo geral

Caracterizar tecnologicamente um *sinter feed* hematítico contendo diferentes proporções e tipos de sílica nas frações aderentes, intermediárias e nucleantes.

### 2.2. Objetivos específicos

- i) Realizar caracterizações química, granulométrica e mineralógica do *sinter feed* hematítico, de baixo teor de ganga, oriundo da região sudeste do Quadrilátero Ferrífero e que foi empregado como *sinter feed* base;
- ii) Realizar caracterizações química, mineralógica e microestrutural das diferentes matérias primas empregadas como fontes de sílica neste estudo (itabirito compacto, quartzito e rejeito de jigue);
- iii) Realizar caracterizações químicas, físicas, metalúrgicas e mineralógicas dos sínteres produzidos em escala piloto;
- iv) Avaliar a influência de diferentes características intrínsecas da sílica do *sinter feed* (grau de liberação, tamanho médio de cristal e tipo de partícula, isto é, liberada monocristalina, liberada policristalina ou mista) nas qualidades químicas, físicas e metalúrgicas dos sínteres produzidos em escala piloto, assim como, nos parâmetros de processo produtividade e consumo de combustível;
- v) Avaliar a influência da distribuição da sílica nas frações nucleantes, intermediárias e aderentes do *sinter feed* na qualidade química, física e metalúrgica dos sínteres produzidos em escala piloto, assim como nos parâmetros de processo produtividade e consumo de combustível.

---

### 3. Revisão Bibliográfica

#### 3.1. Minérios de Ferro do Quadrilátero Ferrífero

##### 3.1.1. Introdução

Grande parte dos depósitos de minérios de ferro existentes no mundo tem origem nas Formações Ferríferas Bandadas, rocha de origem sedimentar química, finamente bandada ou laminada, com teor de ferro acima de 15% (Gross, 1965; James, 1954), de idade pré-cambriana.

O Quadrilátero Ferrífero representa uma importante porção do Pré-Cambriano brasileiro, devido às suas riquezas minerais. Trata-se de uma importante província mineral, onde se localiza uma das mais importantes áreas produtoras de minério de ferro do mundo tendo como principal mineração a Vale. Nesta região também estão localizadas grande parte das usinas siderúrgicas. Salienta-se que os finos de minério de ferro empregados (*sinter feeds*) nas sinterizações das usinas siderúrgicas integradas do Brasil são provenientes das minas do Quadrilátero Ferrífero.

##### 3.1.2. Minérios hematíticos e itabiríticos

Os minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero são classificados em dois grupos principais: os itabiríticos (minérios de mais baixo teor de ferro), mais heterogêneos e constituídos por óxidos e/ou hidróxidos de ferro, e os minérios de alto teor, quimicamente mais homogêneos e ricos em hematita (Rosière, 1983; Rosière et alii, 1993).

Os hematíticos de alto teor são classificados em primários, secundários ou mistos (Rosière et alii, 1993; Rosière et al, 1997). Os primários, de origem sedimentar ou diagenética, tiveram seu enriquecimento na bacia de sedimentação. Os de origem tectônica-metamórfica ou intempérica são secundários, correspondentes a itabiritos com estereis lixiviados por processos intempéricos ou fluidos hidrotermais. Os primários ou secundários sofreram diferentes seqüências de geração de óxidos de ferro e diferentes trajetórias de recristalização, resultando em características intrínsecas distintas (diversas morfologias de

---

---

hematita, diferente grau de porosidade, de tramas e mineralogia distintas). Esta variação desses atributos tem forte influência na performance dos processos siderúrgicos (sinterização e alto-forno).

### **3.1.3. Mineralogia e tipologia de minérios de ferro**

Os minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero apresentam uma complexa história evolutiva, e com isso, minérios de diferentes partes e mesmo de uma mesma mina podem apresentar características mineralógicas e microestruturais completamente distintas, os quais apresentam comportamento particular durante as diversas etapas dos processos minero metalúrgicos (Rosière, 1997).

O mineral de ferro mais comumente encontrado nesses minérios é a hematita. Em menor quantidade, também é possível encontrar a magnetita e a goethita. Os principais minerais de ganga associados aos minérios de ferro de alto teor do Quadrilátero Ferrífero são o quartzo, gibbsita e caulinita. O quartzo é principal mineral de sílica presente nos minérios.

Coelho (2002), apresenta em sua dissertação de mestrado, uma classificação tipológica dos minérios de ferro brasileiros. A classificação é feita do ponto de vista da geologia e do beneficiamento, levando em consideração tipos litológicos e mineralógicos, bem como da siderurgia, considerando tipos de produtos granuloquímicos e mineralógicos.

#### **Classificação baseada nos tipos litológicos/mineralógicos e, de acordo com o autor, aplicada às áreas de geologia e beneficiamento.**

*Corpos ou lentes de hematita:* Minérios hematíticos metamórficos, geralmente não hidratados, e classificados em dois tipos, de acordo com suas características mineralógicas:

- **Martíticos:** De origem hidrotermal, caracterizam-se por apresentarem a martita como mineral-minério predominante; geralmente apresentam-se na forma compacta e às vezes parcialmente hidratada. Os principais produtos gerados por estes corpos são granulados e *sinter feed*, tendo o *pellet feed* como secundário. As minas da Mutuca, Córrego do Feijão e Pau Branco são exemplos típicos.

---

---

- **Especularíticos:** Têm origem tectônica, predominâncias da especularita, podem ser compactos, friáveis ou pulverulentos e não são hidratados. Estes corpos geram granulados, *sinter feed* e *pellet feed*, dependendo do grau de friabilidade. Exemplo: minas Cauê, Conceição, Andrade.

**Minérios Itabiríticos:** São metamórficos, variando de hidratados a não hidratados.

- **Itabiritos hidratados:** Classificam-se de acordo com o mineral predominante. São metamórficos e supergênicos (hidratados). Seus principais produtos são *sinter feed* e *pellet feed*, o granulado é secundário. Exemplos: minas Alegria, Capanema.

- **Martíticos:** Apresentam a hematita martítica como mineral-minério predominante, podendo ter quantidades subordinadas de goethita; a hematita especularítica pode aparecer em pequenos percentuais, e ainda, relictos de magnetita.

- **Goethíticos:** Caracterizam-se por apresentarem a goethita em maior percentual; contém, ainda, quantidades subordinadas de hematita martítica, podendo conter ou não, restos de magnetita e hematita especularítica.

- **Magnetíticos:** Têm a predominância da magnetita, podendo conter hematita martítica e goethita. A hematita especularítica pode estar presente ou não. Estes tipos são pouco expressivos nos jazimentos.

- **Itabiritos hematíticos não hidratados:** São tectono-metamórficos. Seus principais produtos são *sinter feed* e *pellet feed*; granulado é raro. Exemplos: minas Cauê, Andrade, Germano (exaurida).

**Especularíticos:** Caracterizam-se por apresentarem a hematita especularítica.

**Jaspilitos:** Não metamórficos supergênicos (hidratados e não hidratados).

- **Hematíticos microcristalinos – Hidratados:** Apresentam a hematita microcristalina como mineral-minério predominante, podem conter quantidades subordinadas de hematita martítica e pequenos percentuais de goethita e restos de magnetita. Este tipo de minério gera *sinter feed* e *pellet feed*, e o granulado é secundário. Exemplo: mina de Carajás (N4E)-PA.



---

---

- **Hematíticos microcristalinos – Não hidratados:** Caracterizam-se por apresentarem a hematita microcristalina. Seus principais produtos são: granulados, *sinter feed* e *pellet feed*. Exemplo: mina de Corumbá-MS.

**Classificação baseada nos tipos de produtos (granulados / *sinter feed* / *pellet feed*) e, de acordo com o autor, aplicada à geologia, ao beneficiamento e à siderurgia (Coelho, 2002).**

- **Hematíticos martíticos** – São metamórficos hidrotermais, ocorrendo na forma de grandes corpos e lentes de hematita comuns no Quadrilátero Ferrífero-MG.

- **Hematíticos especularíticos** – São metamórficos tectônicos, corpos e lentes de hematita comuns no Quadrilátero Ferrífero-MG.

- **Hematíticos microcristalinos** – Não metamórficos; sofreram enriquecimento supergênico de jaspilitos – Distrito Ferrífero de Corumbá-MS.

- **Hidratados – não metamórficos – enriquecimento supergênico de jaspilitos** – Apresentam hematita microcristalina, hematita martítica subordinada; quantidades pequenas de goethita e de magnetita podem estar presentes – Distrito Ferrífero de Carajás (N4E)-PA.

- **Hidratados – metamórficos – enriquecimento supergênico de itabiritos** – Apresentam hematita martítica, goethita subordinada e, secundariamente, hematita especularítica e restos de magnetita. Geralmente são denominados de “chapinha” – Quadrilátero Ferrífero-MG.

#### **3.1.4. Principais jazida/minas e produtos da Vale**

A Vale produz cerca de 40 produtos de minério de ferro: *pellet feed*, *sinter feed*, granulado e pelotas (www.vale.com, em 02/04/09). O minério de ferro se apresenta bruto ou beneficiado. Para garantia da qualidade é necessário um alto nível de controle nas etapas de peneiramento e classificação, mesmo para minérios de alto teor de ferro e baixo nível de impurezas, atendendo, assim, às exigências do mercado. E ainda é fundamental que todas

---

as etapas do processamento sejam devidamente dimensionadas e controladas em função dos volumes processados, de modo a minimizar os custos e assegurar a qualidade dos produtos. As principais minas da Vale estão localizadas no Brasil em dois sistemas: sul e norte.

O Sistema Sul é composto por seis complexos mineradores, Itabira, Mariana e Minas Centrais formando o Sistema Sudeste e Paraopeba, Vargem Grande e Itabirito, formando o Sistema Sul, todos localizados no Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais. O mais antigo é o de Itabira, que compreende as minas de Cauê e Conceição, cujas operações tiveram início em 1942. O minério produzido é transportado para o Complexo Portuário de Tubarão, em Vitória (ES), pela Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM), e para o Porto de Itaguaí, no Rio de Janeiro, pela MRS Logística. Os fluxogramas das instalações de beneficiamento do Sistema Sul apresentam de forma geral etapas de britagem, classificação, concentração por separação magnética de alta intensidade, flotação e métodos gravíticos: jigagem e espirais. As jazidas do Sistema Sul possuem aproximadamente 4,5 bilhões de toneladas de reservas de minério de ferro. A capacidade atual de produção das minas é de cerca de 170 milhões de toneladas por ano (www.vale.com, em 02/04/09).

O sistema Norte compreende o sistema integrado mina-ferrovia-porto, composto pelas minas a céu aberto de Carajás no Pará, pela planta industrial de tratamento de minério de ferro, pela Estrada de Ferro Carajás (que possui 892 quilômetros de extensão) e pelo Terminal Marítimo de Ponta da Madeira, em São Luís (MA). A partir do Terminal, o minério de ferro de Carajás é exportado para clientes no mundo inteiro. Descoberta em 1967, a Província Mineral de Carajás possui reservas de aproximadamente 16 bilhões de toneladas de minério de ferro de alto teor. Essa qualidade permite que uma parcela expressiva dos produtos seja produzida apenas por etapas de britagem e classificação. Carajás tem uma capacidade de produção de 100 milhões de toneladas por ano (Mta). Para permitir a adequação granulométrica dos produtos, a usina de beneficiamento possui equipamentos que realizam operações de moagem, peneiramento a úmido e classificação do minério. As etapas são: britagem primária, britagem e peneiramento secundário, britagem e peneiramento terciário, moagem, ciclonagem e filtragem de *pellet feed*. O objetivo da usina

---

---

de beneficiamento é obter três produtos de granulometrias distintas: *pellet feed*, *sinter feed* e granulado. Ao chegar ao Terminal Marítimo de Ponta da Madeira, o minério é estocado em pátios e, posteriormente, destinado para embarque, parte do *pellet-feed* segue para a produção de pelotas na Usina de São Luís. As operações de lavra, beneficiamento, estocagem, transporte ferroviário, descarga, empilhamento e embarque realizados no Sistema Norte são monitoradas nas salas de controle que ficam em Carajás e em São Luís. São centros dotados de equipamentos modernos de alta tecnologia, que garantem mais produtividade e segurança para a Vale.

### **3.2. Beneficiamento mineral: produção de *sinter feeds* a partir do processamento de ROMs hematíticos e itabiríticos**

Os *sinter feeds* produzidos hoje pela Vale no Quadrilátero Ferrífero têm na composição de seu ROM basicamente hematitas e itabiritos. O fluxograma da figura 1 é uma rota de processo com possíveis combinações de operações unitárias que envolvem: a cominuição, a classificação e a concentração do minério de ferro.

As rotas de processo para geração dos tipos *sinter feed*, *pellet feed* e granulado podem ser alteradas e adequadas dependendo do objetivo final (custo, qualidade, volume, tipos de produtos), certamente considerando-se a capacidade de cada uma das suas etapas do beneficiamento.

Dependendo da rota de processo definida pode-se ter a produção de um único tipo de produto (*sinter feed*, por exemplo).

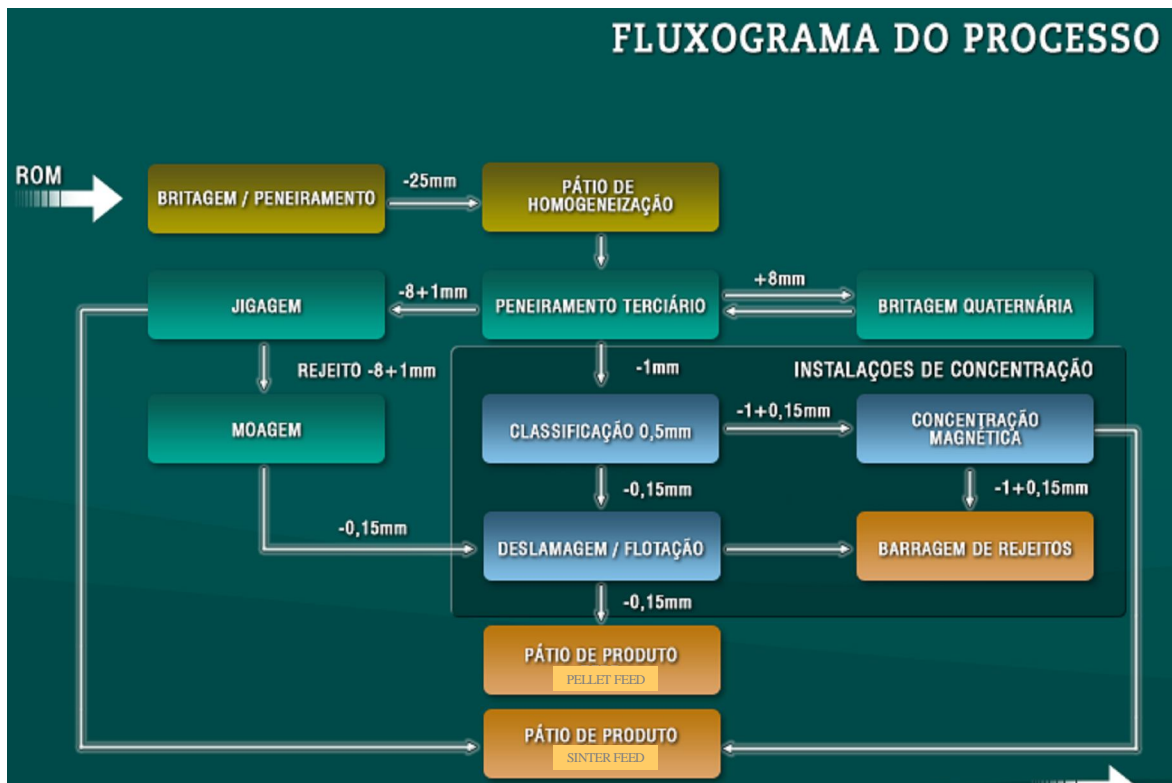


Figura 1: Exemplo de rota de processo de beneficiamento.

A primeira etapa do processamento mineral pode ser considerada como sendo a britagem via britador de mandíbulas ou giratório (britagem primária) ou cônico (britagem secundária). No caso do *sinter feed*, pode-se citar para as operações unitárias de separação por tamanho as peneiras, o classificador espiral e os hidrociclones. Para o processo de concentração podemos considerar como principais etapas de processo a jigagem, a concentração magnética (baixa, média e alta intensidade) e as espirais.

A utilização da filtragem no final do processo será necessária se este for a úmido, pois existe a opção de produção de um *sinter feed* a seco, neste caso considera-se apenas a britagem e a classificação como etapas de produção.

Na atualidade, os principais parâmetros de qualidade de um *sinter feed* objetivados para o produto final são a química global e as frações granulométricas +6,3mm, +1mm e -0,15mm (Padovezi et alii, 2003).

---

---

Para o processo de beneficiamento atingir os teores de sílica desejados e garantir as produções exigidas (tonelagem), consideram-se para o controle de processo, índices como recuperação em massa e metalúrgica (%).

Para garantia da qualidade (teor de sílica) é fundamental um controle dos níveis de contaminantes do *ROM* por fração granulométrica e sua distribuição em massa, além de controles no beneficiamento via: densidade (% de sólidos na alimentação das espirais, dos concentradores magnéticos de alta, média e baixa intensidade), campo magnético, abertura das comportas das jigagens, pressão de água de médio da concentração magnética de alta intensidade, rotação do carrossel do concentrador magnético de alta intensidade, pressão/vazão das arcas da jigagem.

### **3.3. Sinterização de minérios de ferro**

#### **3.3.1. Introdução**

O processo de sinterização de finos de minério teve seu início no Brasil, em 1948, com o emprego de carvão vegetal como combustível da mistura a sinterizar, através da instalação Greenwalt da Companhia Siderúrgica Belgo Mineira.

Atualmente, existem diversas usinas siderúrgicas integradas no Brasil. Todas estas utilizam coque como combustível, e empregam sínter como principal componente de suas cargas ferríferas para os altos-fornos. O processo Dwight Lloyd, que é do tipo contínuo, é o empregado em todas estas usinas.

#### **3.3.2. O processo de sinterização e variáveis de processo**

O processo industrial de sinterização de minérios de ferro é uma operação unitária pirometalúrgica, realizada em batelada ou em forma contínua, com objetivo de transformar uma mistura de partículas finas em material aglomerado. Esta mistura, para produção do sínter 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.

---

A mistura de materiais a sinterizar é alimentada em um tambor (misturador) para realização das etapas de misturamento (etapa a seco) e aglomeração a frio (etapa a úmido). Tem-se, então, a produção dos microaglomerados (pseudo-partículas) que serão transportados e carregados na máquina de sinterizar.

No início, abaixo do forno de ignição, tem-se a queima de combustível da superfície do leito dos microaglomerados. O ar succionado por um sistema de exaustão passa a queimar todo combustível disseminado no leito da mistura de modo que a frente de combustão progride da superfície para o fundo do leito e os gases gerados pela queima promovem a vaporização da água, a decomposição térmica dos carbonatos e dos hidróxidos, a redução parcial dos óxidos de ferro e provoca uma fusão parcial de parte da mistura formando assim um aglomerado (composto por partículas não fundidas juntamente com uma matriz de escória) denominado sínter. O volume e a composição da escória do sínter produto têm forte influência sobre a sua resistência mecânica e a sua redutibilidade. Estes parâmetros estão diretamente ligados, dentre outros fatores, ao teor e ao tipo de sílica da mistura total usado na sinterização.

Após as etapas de resfriamento, fragmentação e classificação por tamanho tem-se o sínter produto com características químicas, granulométricas, físicas, metalúrgicas e microestruturais adequadas para uso em altos-fornos.

As principais variáveis de processo são a produtividade da máquina de sinterizar (medida em  $t/dia/m^2$  de área de grelha), consumo de combustível (kg de combustível/tonelada de sínter produzido) e rendimento (em %). As características intrínsecas das matérias primas exercem forte influência nestes parâmetros.

---

---

### 3.3.3. Matérias primas e atributos importantes do *sinter feed*

As principais matérias primas empregadas no processo de sinterização são: minérios de ferro (*sinter feeds*), fundentes, combustível sólidos, ligantes (aglomerantes) e aditivos.

O termo utilizado para as partículas de minério de ferro alimentadas especificamente no processo de sinterização é *sinter feed*. Este deve apresentar características físicas e químicas adequadas; sendo que atualmente tem se buscado conhecer também as suas características mineralógicas e microestruturais que apresentam grande influência na etapa de aglomeração a frio do processo de sinterização e na qualidade final do sinter produzido (Vieira et alii, 2003).

São três as principais variedades de minerais-minérios nos *sinter feeds* brasileiros e são listados abaixo (Vieira e Pena, 2008):

Hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ): é mineral de ferro mais comum nos minérios brasileiros e apresenta-se em diversos tipos (especular, granular, martita, etc.). Usualmente o teor de ferro de uma hematita compacta varia entre 62 a 68 %, com baixos teores de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e PPC (perda por calcinação). Os minérios hematíticos apresentam, via de regra, a coloração cinza azulada.

Magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ): é um mineral com propriedades magnéticas, sendo fortemente atraído por ímã de mão. Não é comum se encontrar minérios brasileiros tipicamente magnetíticos para fins industriais. Esse mineral pode estar presente em alguns minérios, mas geralmente em proporções muito baixas.

Goethita ( $\text{FeO.OH}$ ): é um hidróxido de ferro e geralmente está diretamente relacionado ao PPC dos minérios. Às vezes é ainda comum utilizar o termo "Limonita" para descrever, de forma genérica, misturas de hidróxidos de ferro com variado grau de cristalinidade. Os minérios com maior participação de goethita apresentam coloração marrom, são porosos, com maiores teores de ganga ( $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e contaminantes mais altos (principalmente P). Apresentam teor de ferro total mais baixo quando comparados com os minérios hematíticos anidros. Os minérios goethíticos têm um efeito marcante na estrutura da parte fundida do sinter, influenciando na formação de ferritos de cálcio, escória vítrea e porosidade, que por sua vez controlam os parâmetros metalúrgicos e mecânicos do

---

---

sínter, tais como redutibilidade, resistência, RDI, etc (Hsieh & Whiteman, 1993). A presença de finos de minérios limoníticos influencia a temperatura de fusão das partículas aderentes (Sato et alii, 1986) na sinterização;

Sob o ponto de vista químico, o *sinter feed* deve atender ao requisito fundamental do balanço de massa dos processos sinterização e alto-forno, no que diz respeito aos atributos químicos do sínter produto ( $Fe_T$ , % de escorificáveis, basicidade binária, volume de escória, e teor de impurezas como P, S,  $Na_2O$ ,  $K_2O$ ,  $ZnO$  que devem ser mínimas).

A sílica no *sinter feed* pode estar na forma disseminada na matriz de minério (por ex sílex contido nos minérios da mina de Urucum), na forma de partículas mistas e do tipo liberada. Existem poucos estudos sobre esta questão com relação ao *sinter feed*. Outro ponto importante é a distribuição da sílica por faixa granulométrica. Existe um sentimento por parte dos siderurgistas de que a  $SiO_2$  na fração grosseira do *sinter feed* é ruim para o processo, no tocante a rendimento, produtividade e variação de qualidade do sínter. Entretanto, são ainda escassos os estudos neste campo. O *sinter feed* é a matéria prima que tem maior contribuição no tocante ao teor de sílica no sínter produto. Assim, como a percentagem de  $SiO_2$  afeta os itens de qualidade, sua alteração e seu controle nas usinas de beneficiamento devem ser avaliadas com critérios técnicos (Vieira et alii, 2003; Vieira e Pena, 2008; Coelho, 2002).

Além da sílica, deve-se ter um controle dos teores de  $Al_2O_3$  do *sinter feed* devido principalmente ao seu efeito negativo sobre o parâmetro RDI do sínter produto e também por restrição do balanço de massa no alto-forno (para controle do teor de alumina na escória do alto-forno). A intensidade de degradação granulométrica dos sínteres, durante redução em baixas temperaturas, é fortemente influenciada pelos seus tipos de constituintes microestruturais e pela presença de  $Al_2O_3$  e  $TiO_2$  na rede cristalina das hematitas secundárias (Pimenta & Seshadri, 2002). A forma mineralógica da  $Al_2O_3$  no minério (caulinita, gibbsita, etc), sua distribuição por faixa granulométrica e a relação  $Al_2O_3 / SiO_2$  nas frações finas também devem ser avaliadas (Vieira et alii, 2003; Vieira e Pena, 2008, Coelho, 2002).

No tocante à suas características granulométricas o *sinter feed* deve também possuir



uma distribuição granulométrica adequada de modo a garantir uma boa permeabilidade do leito de partículas na máquina de sinterização. A obtenção de altas taxas de produtividade esta diretamente associada aos parâmetros granulométricos do *sinter feed*, razão pela qual são feitas rigorosas especificações por parte dos clientes (Vieira e Pena, 2008; Vieira et alii, 2003).

Tem-se como referencia padrão a curva de Astier (figura 2) para o *sinter feed* (Azevedo, 1989; Takehara, 2004; Vieira et alii, 2003), onde se considera uma distribuição granulométrica com as seguintes premissas: não conter partículas + 6,35 mm; não conter partículas - 0,1 mm; uma curva distribuição de partículas de maneira que 50 % se situem na fração + 1 mm e outros 50 % abaixo. Contudo, em função das especificidades de cada mineração e de cada usina siderúrgica tem se comercializado *sinter feeds* com uma faixa granulométrica contendo até 10% de partículas com granulometria acima de 6,3mm e até 15% abaixo de 0,1mm, conforme mostrado na figura 2 (Vieira e Pena, 2008).

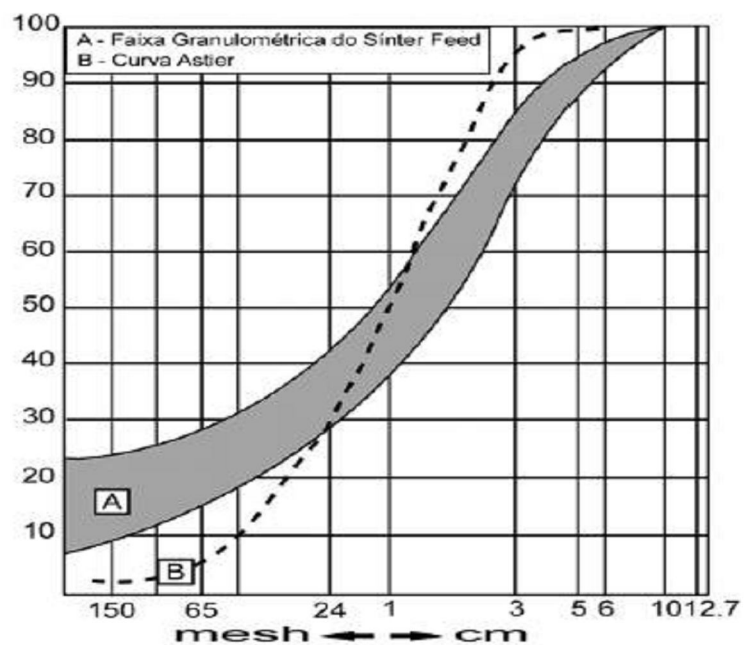


Figura 2: Curva de Astier (modificado de Azevedo, 1989).

---

---

### 3.3.4. Classificação das partículas do *sinter feed* quanto a capacidade de microaglomeração: partículas nucleantes, intermediárias e aderentes

Na rotina operacional do processo industrial de sinterização são empregados dois conceitos distintos de misturas: mistura de minérios e mistura total. O primeiro se refere à mistura dos diferentes tipos de minérios de ferro que compõem a pilha de *sinter feed*. O segundo se refere à mistura de minérios juntamente com as outras matérias primas, as adições e combustível sólido.

A mistura total apresenta uma ampla faixa granulométrica, contendo partículas consideradas finas até aquelas mais grosseiras. Esta é alimentada num tambor com objetivo de propiciar o misturamento (etapa de homogeneização feita a seco) e a aglomeração a frio das partículas (etapa a úmido). Através do controle da velocidade de rotação do tambor, da adição de água e do fator de ocupação da mistura é possível atuar sobre o tipo de movimento das partículas no interior do tambor (regimes cascata, catarata e deslizamento). O controle é feito para assegurar o regime cascata, de modo que depois de determinado tempo de residência tem-se a formação de microaglomerados, com boa resistência física que serão carregados na máquina de sinterizar (Vieira e Pena, 2008; Vieira et alii, 2003).

Estes microaglomerados são formados por um núcleo (constituído por partículas mais grossas) coberto por uma camada aderente (constituída de partículas finas). Assim, em função do comportamento nesta etapa, as partículas do *sinter feed* podem ser classificadas em três tipos: nucleantes (- 8 + 1mm), que participam do núcleo; as aderentes (- 0,25mm) que formam a camada aderente e as intermediárias (- 1 + 0,25mm) que não apresenta nenhum destes comportamentos. De acordo com alguns trabalhos da literatura a mistura deve conter a menor quantidade possível de partículas intermediárias e uma relação nucleantes/aderentes adequada de modo a propiciar uma boa permeabilidade do leito a sinterizar e conseqüentemente maior índice de produtividade da máquina de sinterização (Vieira e Pena, 2008; Vieira et alii, 2003).

### 3.3.5. Metodologia de caracterização mineralógica e microestrutural das partículas *sinter feed* por microscopia ótica

De um modo geral, no Brasil, a caracterização mineralógica quantitativa e qualitativa de partículas de *sinter feed* tem sido feita empregando a técnica de microscopia ótica de luz refletida. Um roteiro completo da metodologia desta caracterização foi proposto por Coelho (2002).

Na tabelas 1 e 2 são apresentadas a classificação da CVRD e UFOP dos principais minerais de ferro presentes nos minérios brasileiros (Rosière et alii, 2001).

Tabela 1: Classificação da CVRD e UFOP dos principais minerais de ferro presentes nos minérios brasileiros segundo Rosière et alii (2001).

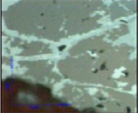
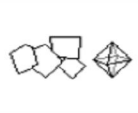
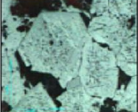
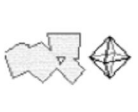
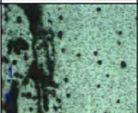

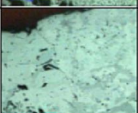
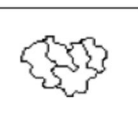
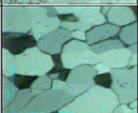
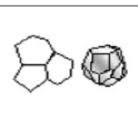
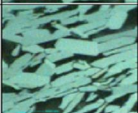

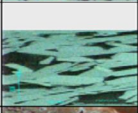
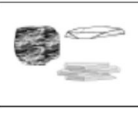



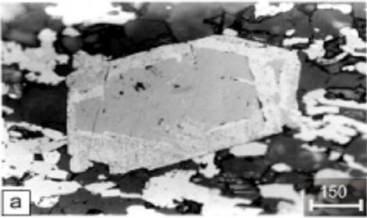
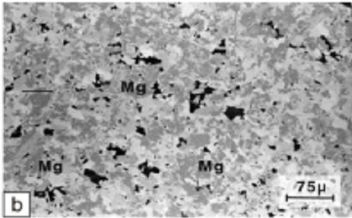
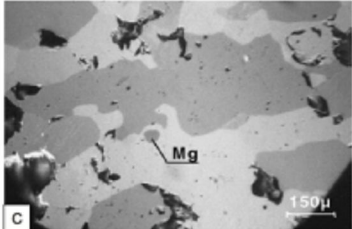
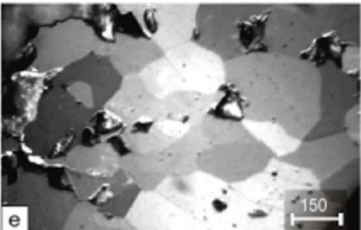
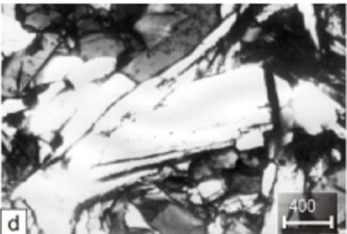
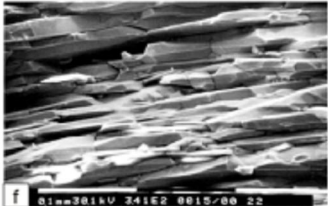
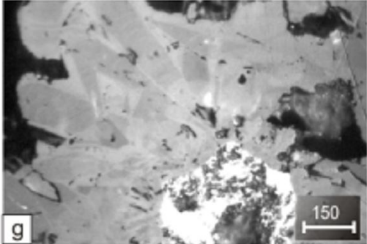
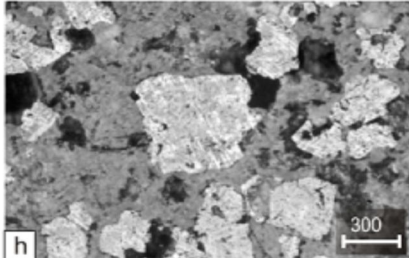
MINERAL DE FERRO	CARACTERÍSTICAS TEXTURAS	CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS	EXEMPLOS: PRESENTE NAS MINAS	FOTOMICROGRAFIAS (MICROESTRUTURA TÍPICA)	FORMA / TEXTURA	DESENHO ESQUEMÁTICO
<b>MAGNETITA</b>	Cristais euédricos, isolado ou em agregados. Cor bege-rosa. Ger. martizado.	Domínios de baixa deformação/baixo metamorfismo (Oeste do QF) Itabiritos anfibolíticos e dolomíticos.	C. de Feijão			a, b
<b>HEMATITA MARTITA</b>	Hábito da magnetita. Agregados porosos em luz natural, com relictos de magnetita. Oxidação das bordas para o centro ou seq. os planos crist. da magnetita.	Domínios de baixa deformação/baixo metamorfismo (Oeste do QF) Itabiritos anfibolíticos e dolomíticos.	Mutuca, C. de Feijão			a, b, h
<b>HEMATITA MICROCRISTALINA</b>	Cristais muito pequenos <0,01mm. Textura porosa. Contatos pouco desenvolvidos.		Minas de Carajás			
<b>HEMATITA LOBULAR</b>	Cristais inequidimensionais, de bordas irregulares, lobadas ou semilhadadas.	Domínios de baixa deformação/metamorfismo baixo a intermediário (Oeste do QF)				c
<b>HEMATITA GRAHULAR (L1 &lt; 2)</b>	Cristais regulares, bordas retas a lig. Curvas, contos triplicados.	Domínios de baixa deformação/metamorfismo intermediário a alta (Centro e Leste do QF)	Mina do Pico			e
<b>HEMATITA TABULAR (2 &lt; L1 &lt; 5)</b>	Cristais euédricos, formas cristalinas visíveis.	Domínios de deformação baixa e alta				d
<b>HEMATITA ESPECULAR (L1 &gt; 5)</b>	Cristais placóides, alongados. Contatos retilíneos.	Domínios de alta deformação. (Leste do QF)	Minas de Cauê, Andrade			f
<b>GOETHITA</b>	Material amorfo ou criptocristalino. Estrutura colóide, hábito botroidal.	Minérios martíticos/magnetíticos VV do Quadrilátero Ferrífero	Minas de Alegria e Capanema			g, h
<b>AGREGADO TERROSO</b>		Contaminação superficial, Princ. assoc. minérios martíticos e it. dolomíticos				h

Tabela 2: Prancha de microestruturas típicas de acordo com Rosière et alii (2001).

<p style="text-align: center;"><b>Magnetita / Martita</b></p>  <p style="text-align: center;">a</p> <p style="text-align: center;">Porfiroblasto de magnetita parcialmente martitizada. Mina de Cauê. Nic. //</p>	<p style="text-align: center;"><b>Magnetita / Martita</b></p>  <p style="text-align: center;">b</p> <p style="text-align: center;">Agregado de magnetita (Mg) parcialmente martitizada em minério compacto. Mina do Corrego do Feijão. Nic. //</p>
<p style="text-align: center;"><b>Hematita Lobular</b></p>  <p style="text-align: center;">c</p> <p style="text-align: center;">Agregado de cristais interescudados de hematita lobular com bordas curvas formando embainhamentos. Relicto de magnetita (Mg) e observado uma porção central da foto. Mina do Pico. Nic. parc. X</p> <p style="text-align: center;"><b>Hematita Granular</b></p>  <p style="text-align: center;">e</p> <p style="text-align: center;">Agregado granoblástico de hematita granular. Mina do Pico. Nic. parc. X</p>	<p style="text-align: center;"><b>Hematita Tabular</b></p>  <p style="text-align: center;">d</p> <p style="text-align: center;">Cristal de hematita tabular formado por precipitação em macro cavidade. Mina de Conceição. Radiação infravermelha</p> <p style="text-align: center;"><b>Hematita Especular</b></p>  <p style="text-align: center;">f</p> <p style="text-align: center;">Cristais orientados de especularita constituindo trama lepidoblástica em minério xistoso. Mina de Andrade. Imagem de microscópio eletrônico de varredura.</p>
<p style="text-align: center;"><b>Goethita</b></p>  <p style="text-align: center;">g</p> <p style="text-align: center;">Seção em goethita botroidal crescida a partir de um núcleo constituído por cristal corroído de martita. Os espaços vazios da martita seriam originalmente constituídos por magnetita, posteriormente hidratada e lixiviada. Mina do Pico. Nic. X.</p>	<p style="text-align: center;"><b>Goethita Agregado Terroso / Martita</b></p>  <p style="text-align: center;">h</p> <p style="text-align: center;">Goethita maciça e agregado limonítico terroso cimentando cristais de martita. Mina Corrego do Feijão. Nic. X</p>

---

---

### 3.3.6. Formação do sinter heterogêneo

Na figura 3 é mostrado um desenho esquemático ilustrativo da formação do sinter produto denominado de sinter heterogêneo. De acordo com esta figura, existe uma seqüência de reações que podem ser descritas da seguinte maneira (Vieira e Pena, 2008).

- As partículas de hematita da camada aderente do *sinter feed* ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) reagem com as partículas de cal (seja a cal adicionada ou a resultante da calcinação dos calcários), em temperatura da ordem de  $1100^\circ\text{C}$ , formando assim os primeiros ferritos de cálcio. Próximo a  $1200^\circ\text{C}$  inicia-se a formação de um líquido, consistindo principalmente de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{CaO}$  (reação de ferrito de cálcio representada por **1**);
- A seguir esse líquido passa a assimilar os óxidos de ferro juntamente com outros óxidos presentes na camada aderente do microaglomerado, isto é, a  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{MgO}$ . Nesse momento pode ocorrer a desagregação superficial das partículas policristalinas do núcleo hematítico do microaglomerado, em função da penetração do líquido nos contornos de grão, formando a "hematita granular", ou seja, cristais desagregados de hematita (representada por **2**);
- Após o líquido ter assimilado parcialmente o  $\text{CaO}$  e a  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , ele passa a reagir com óxido de ferro produzindo um ferrito de cálcio acicular sólido (em forma de agulhas), rico em  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{SiO}_2$  (reação representada por **3**);
- Se a temperatura máxima do perfil de queima não exceder ao valor de  $1300^\circ\text{C}$ , ou se o tempo de retenção for curto, a microestrutura resultante após o resfriamento será do tipo apresentada em **(3)** na figura 3. Assim, será formado um aglomerado com elevada proporção de ferrito de cálcio acicular em meio a silicatos cristalinos e partículas de hematita granular, estando toda matriz solidificada ao redor de partículas de hematita (originalmente um nucleante de um microaglomerado formada na etapa de aglomeração a frio). Esse produto é chamado sinter

heterogêneo, de baixo teor de FeO, é aquele que apresenta satisfatórias propriedades metalúrgicas para uso em altos-fornos.

- Contudo, se a temperatura máxima do perfil térmico exceder 1300°C, o ferrito de cálcio e os nucleantes de hematita se fundem e dissolvem, formando hematita secundária ou magnetita e uma escória líquida, representada por (4) na figura 3. (Se o teor de  $Al_2O_3$ , for muito baixo, o ferrito de cálcio começa a se dissolver em temperatura mais baixa, em torno de 1250°C);
- Ao se resfriar, conforme (5) na figura 3, forma um tipo de hematita chamada de hematita secundária romboédrica esqueletiforme, que torna o sínter produto mais susceptível à desintegração durante redução (aumenta os valores de RDI). Os ferritos de cálcio formados nessa situação são os do tipo colunares (propicia menor redutibilidade dos sínteres quando comparados com os aciculares). Esse aglomerado é chamado de sínter homogêneo, de alto teor de FeO, em referencia a uma alta intensidade de fusão das partículas. Este produto não apresenta propriedades metalúrgicas apropriadas para seu uso nos altos-fornos.

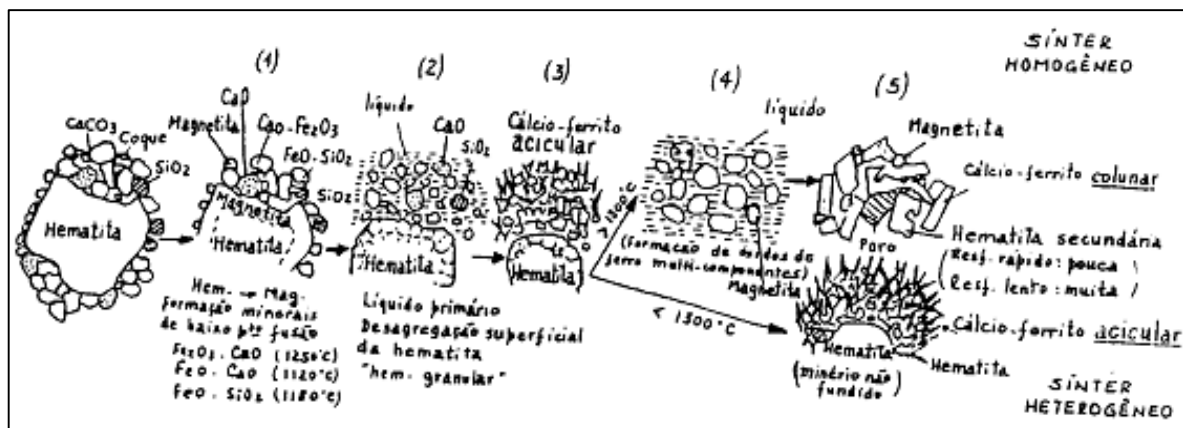


Figura 3: Desenho esquemático das reações durante o processo de sinterização (Pena e Franco, 1989).

---

---

### 3.3.7. Propriedades e a microestrutura ideal do sinter heterogêneo

As principais propriedades físicas deste aglomerado são as resistências ao tamboramento e a queda, e são avaliadas, de um modo geral, por meio de ensaios experimentais normalizados pela ISO. As principais propriedades metalúrgicas dos sínteres são a redutibilidade, a degradação granulométrica durante redução (RDI) e os parâmetros de amolecimento e fusão. As duas primeiras são também, de um modo geral, avaliadas por meio de ensaios experimentais normalizados pela ISO. Ainda não existe metodologia ISO para avaliação dos parâmetros de amolecimento e fusão.

Do ponto de vista tecnológico, o processo de sinterização tem como objetivo a produção de sínteres constituídos por uma parte fundida e outra não fundida. Em contraste com os sínteres produzidos no passado e chamados de sínteres homogêneos, onde se tinha praticamente todo material fundido, tem-se atualmente produzido o sinter heterogêneo, onde a parte não fundida aumentou significativamente, atingindo patamares de 30% a 40%, ou mais, da área da seção do aglomerado (Nogueira, 1987). Assim, tem-se como finalidade calcinar, mas não fundir, os núcleos (partículas nucleantes) dos microaglomerados durante o ciclo térmico na máquina de sinterizar e permitir que ocorra a fusão somente das partículas na camada aderente. As partículas dos fundentes estão presentes na camada aderente para que, após a queima, venha compor a parte fundida do sinter com características mais homogêneas possíveis.

Um ciclo térmico apropriado deve ser empregado, a fim de obter-se um sinter com uma microestrutura ideal, mostrada na figura 4, capaz de garantir um excelente comportamento no interior do alto-forno.

Existe uma forte relação entre os parâmetros físicos e metalúrgicos redutibilidade e o RDI do sinter produto com a microestrutura do sinter heterogêneo conforme mostrado na figura 4 (Vieira et alii, 2003).

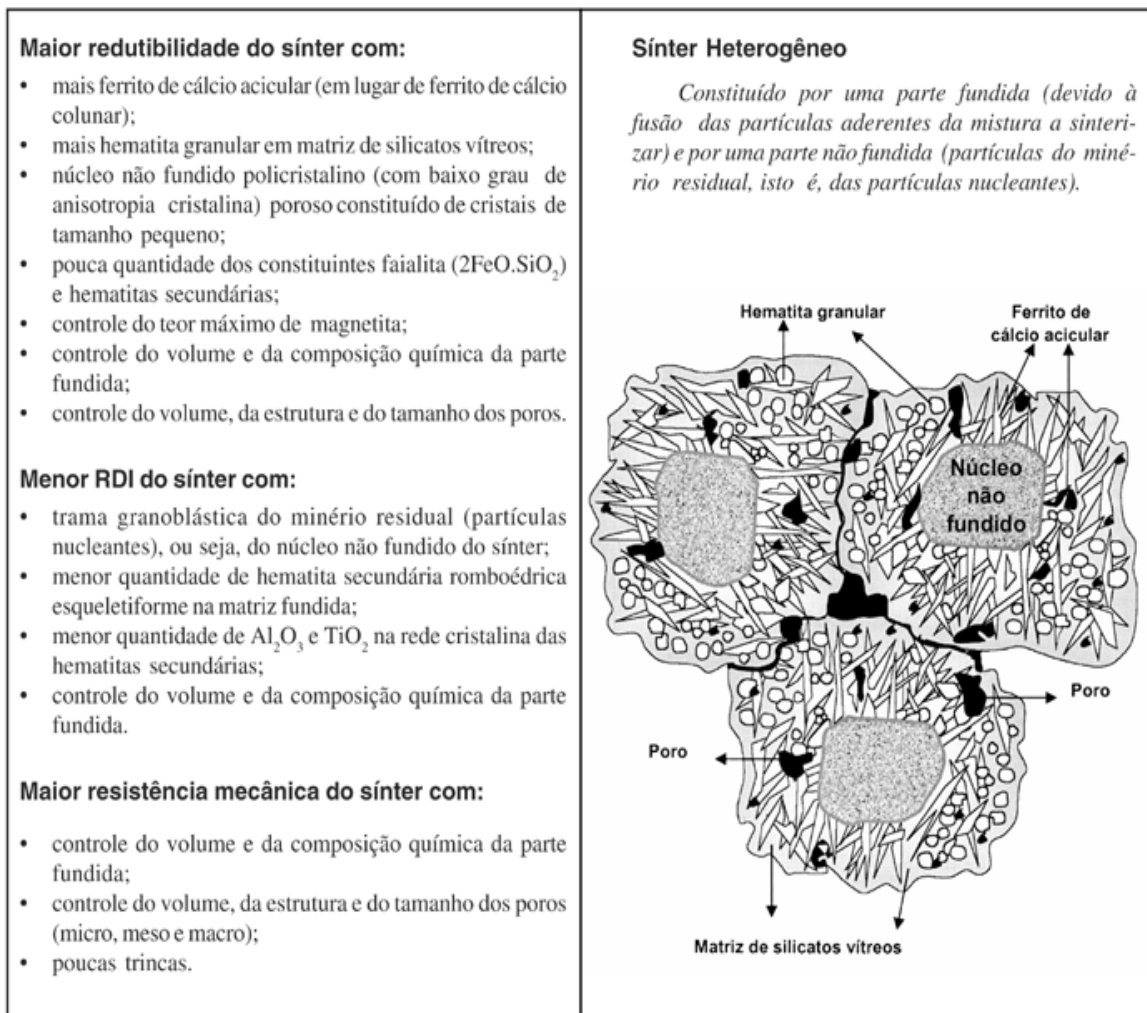


Figura 4: Relação entre os parâmetros físicos e metalúrgicos do sinter heterogêneo e a sua microestrutura (Vieira et alii, 2003).

### 3.3.8. Atributos intrínsecos do *sinter feed*: análise crítica no contexto de geometalurgia

A concepção de produzir sínteres com microestrutura desejada para os altos-fornos aliada a uma alta produtividade e baixo consumo de energia na máquina de sinterizar é fortemente dependente de diversas variáveis de processo, assim como do conhecimento dos



atributos granulométricos, mineralógicos e microestruturais das partículas do *sinter feed* em conjugação com suas características granuloquímicas (Vieira et alii, 2003).

Existem diversos trabalhos que descrevem a importância e a relação existente entre as características microestruturais das partículas do *sinter feed* (Caporali et alii, 1998) e a eficiência das etapas de aglomeração (seja a frio ou a quente) no processo de sinterização e na qualidade intrínseca dos sínteres produzidos (Vieira et alii, 2003).

Dentro desse contexto, a tabela 3 apresenta um roteiro dos principais parâmetros mineralógicos, microestruturais e granulométricos que devem constituir a identidade estrutural do *sinter feed*. (Vieira et alii, 2003). Esses atributos devem ser avaliados juntamente com as suas características químicas. O desconhecimento desses, assim como os da mistura a sinterizar, dificulta substancialmente a otimização dos fatores produtividade, qualidade e custo, que constituem o alicerce da sobrevivência desse processo de aglomeração.

Tabela 3: Principais atributos que deverão constituir a identidade estrutural de finos de minério de ferro para uso em sinterização (Vieira et alii, 1999).

Parâmetro de Controle	Descrição	Influência no sínter	Influência na sinterização
Constituintes mineralógicos das partículas aderentes, intermediárias e nucleantes.	Caracterização mineralógica quantitativa das fases presentes por meio de microscopia ótica de luz refletida.	Microestrutura, porosidade, redutibilidade, RDI, resistência, parâmetros de amolecimento, fusão e gotejamento.	Afeta fortemente a eficiência da etapa de microaglomeração, rendimento da mistura, consumo de energia e produtividade do processo.
Tamanho dos cristais das partículas nucleantes.	Tamanhos extremos e moda dos valores por meio de microscopia ótica de luz refletida.	Redutibilidade.	Afeta a qualidade metalúrgica e mecânica do sínter.
Trama das partículas nucleantes.	Avaliação qualitativa por meio de microscopia ótica.	RDI e redutibilidade.	
Forma e tipos de superfícies das partículas nucleantes, intermediárias e aderentes.	Avaliação da forma via lupa binocular e microscopia ótica de luz refletida.	RDI e resistência.	
Porosidade total, forma e tamanho dos poros de partículas nucleantes.	Grau de porosidade e tamanho dos poros via microscopia ótica de luz refletida e porosímetro de mercúrio.	Resistência e redutibilidade.	
Relação % nucleantes / %aderentes, % de partículas intermediárias, e % de partículas acima de 1,0 mm (Parâmetro granulométrico).	Avaliação por meio de análise granulométrica.	Redutibilidade, resistência e RDI.	Afeta a eficiência da etapa de microaglomeração a frio, permeabilidade do leito a sinterizar e produtividade do processo.

Na tabela 4, é apresentada a descrição geral dos tipos e das características intrínsecas de partículas do *sinter feed* de minérios de ferro brasileiros e da estrutura ideal do microaglomerado produzido na etapa de aglomeração a frio (Ishikawa et alii, 1982; Araújo Filho et alii, 1986, Rosière, 1996; Vieira et alii, 1999).

Tabela 4: Descrição geral dos tipos e das características intrínsecas de partículas do *sinter feed* de minérios de ferro brasileiros e da estrutura ideal do microaglomerado produzido na etapa de aglomeração a frio (Ishikawa et alii, 1982; Araújo Filho et alii, 1986, Rosière, 1996; Vieira et alii, 1999).

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

## 4. Materiais e Métodos

### 4.1. Materiais

Foram estudadas três diferentes fontes de sílica adicionadas em diferentes proporções e um *sinter feed* base (*sinter feed* sul – SFS) de baixos teores de sílica (~2,50% aproximadamente) e alumina (0,80% aproximadamente). O *sinter feed* base com a fonte adicionada foi adequado de forma a permitir que esta mistura de minérios apresentasse uma distribuição granulométrica próxima à de um *sinter feed* típico (curva de Astier). As fontes de sílica adicionadas foram divididas nas três frações granulométricas: nucleante, intermediária e aderente.

O *sinter feed* sul foi gerado na região do Quadrilátero Ferrífero no Complexo Itabira situado no município de Itabira, cuja localização está apresentada no desenho esquemático da figura 5.

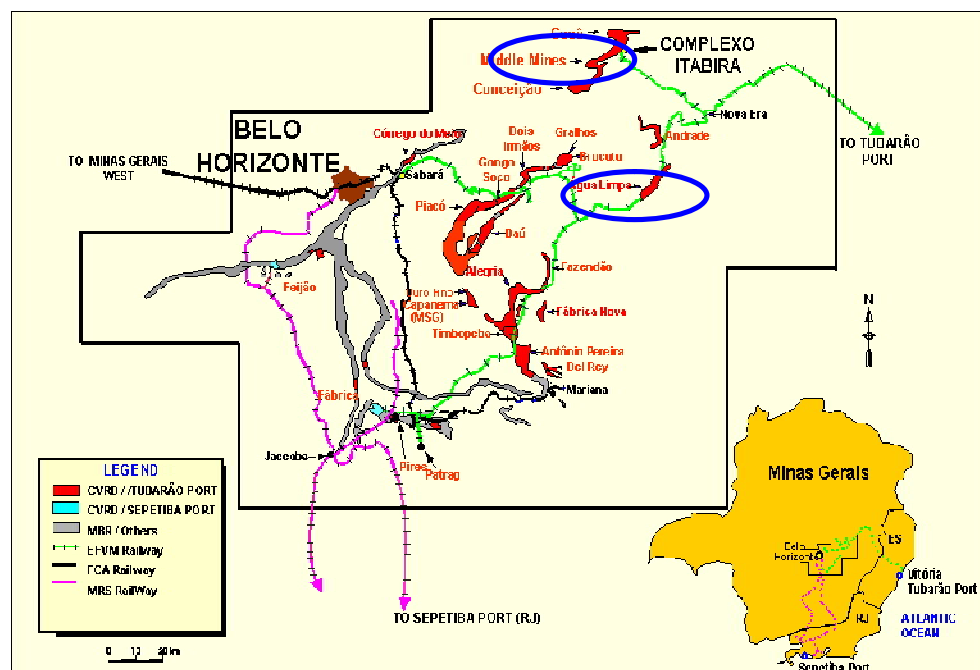


Figura 5: Desenho esquemático do Quadrilátero Ferrífero.

Com relação às amostras fontes de sílica foram definidas nomenclaturas que mais se aproximassem de alguma característica previamente conhecida. A tabela 5 mostra como ficaram as definições dos tipos em relação a cada fonte.

Tabela 5: Nomenclatura adotada para cada fonte e tipo de sílica adicionada ao *sinter feed* base.

FONTE DE SÍLICA	TIPO DE SÍLICA
REJEITO DE JIGUE: amostra originada na região sudeste do Quadrilátero Ferrífero, na mina de Água Limpa.	Sílica Liberada Monocristalina - (SLM)
QUARTZITO: originado na região sudeste, mais especificamente no Espírito Santo.	Sílica Liberada Policristalina - (SLP)
ITABIRITO COMPACTO: amostra gerada na região sudeste do Quadrilátero Ferrífero, Complexo Itabira situado no município de Itabira.	Sílica Mista - (SM)

#### 4.1.1. Geração da amostra *sinter feed* sul – (SFS)

A amostra de *sinter feed* sul foi gerada no centro de Pesquisa Tecnológica da Vale, complexo Itabira (figura 5), a partir de um granulado de hematita de baixo teor de contaminantes, sendo este separado nas frações nucleantes, intermediárias e aderentes apresentando os seguintes percentuais em massa, tabela 6.

Tabela 6: Percentual em massa por fração granulométrica do *sinter feed* sul.

Partículas nucleantes	Partículas intermediárias	Partículas aderentes
-8mm + 1mm;	-1mm + 0,25	-0,25mm
55%	14%	31%

O *sinter feed* base apresentou uma sílica global de 2,51% e alumina de 0,83%.

Foi empregada a seguinte rota de processo para a obtenção das frações: britagem em 8 mm; peneiramento (+8mm e +1mm) e classificação em espiral (-1mm + 0,25mm) e (- 0,25mm).

O granulado de hematita foi homogeneizado, sendo este britado em um britador giratório, peneirando em peneiras convencionais com telas de 8 mm e 1mm. O passante foi classificado na tela de 1mm em classificador espiral para a obtenção das frações (-1mm + 0,25mm) e (-0,25mm). Compôs-se no peneiramento o *sinter feed* grosso com o passante em 8mm e retido em 1mm. No classificador, o *sinter feed* fino foi composto com o under flow, já com o over flow compôs-se o fino abaixo de 0,25 mm.

Os produtos foram quarteados e homogeneizados para a obtenção das alíquotas para a análise química e granulométrica. As amostras processadas no classificador espiral foram peneiradas para diminuição do % de (- 0,15mm).

A figura 6 apresenta fluxograma esquemático do processo de geração da amostra.

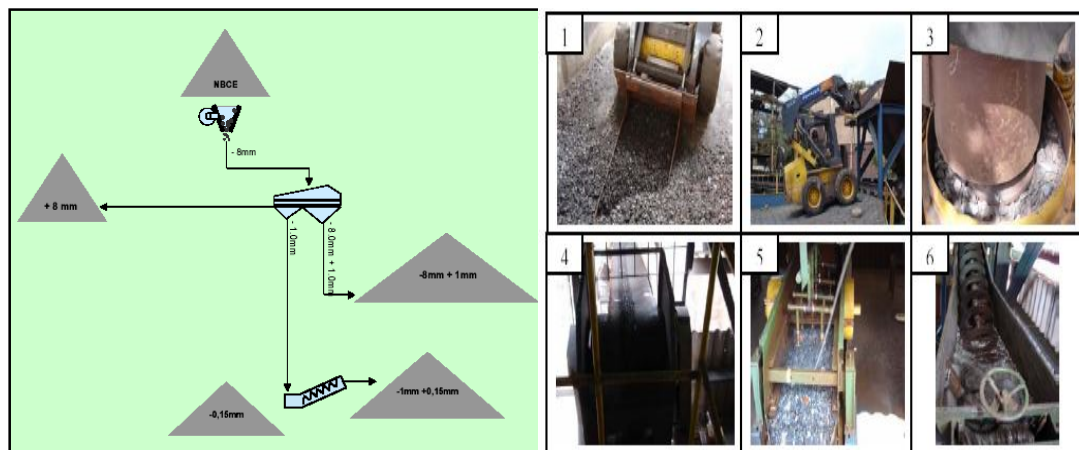


Figura 6: Fluxograma esquemático do processo de geração da amostra *sinter feed* sul.

#### 4.1.2. Geração das amostras fontes de sílica (itabirito compacto, rejeito de jigagem e quartzito)

O rejeito de jigagem (sílica liberada monocristalina – SLM) utilizado como uma das fontes de sílica adicionadas, foi gerado no Quadrilátero Ferrífero na mina de Água Limpa (figura 7). Na figura 7 está apontado o local de coleta desta amostra (jigagem) de teor médio de sílica de 61,6%.

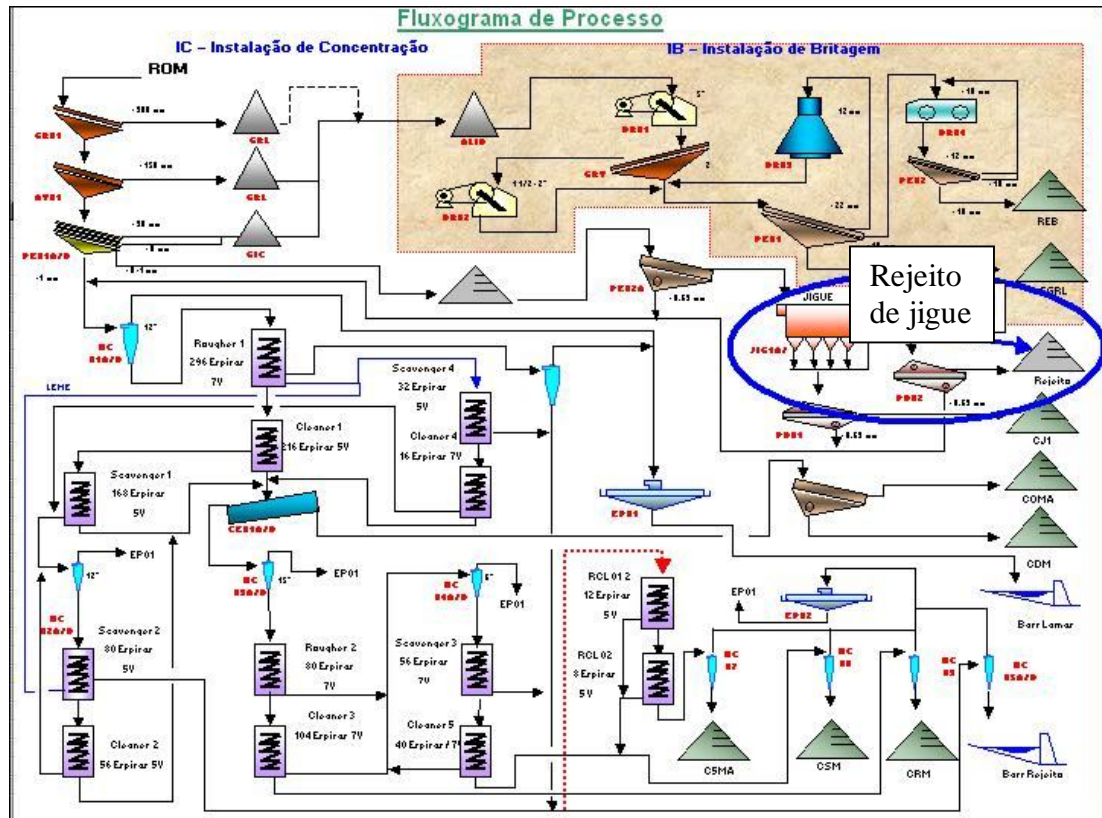


Figura 7: Fluxograma do processo onde foi gerado o rejeito de jigagem.

O quartzito (sílica liberada policristalina – SLP), foi gerado na região do Espírito Santo, através do seguinte processo de beneficiamento: desmonte na mina; britagem; classificação e lavagem. Esta fonte apresentou um teor de sílica de 96,13%.

A fonte de sílica itabirito compacto foi gerada no complexo minerador de Itabira e posteriormente beneficiado no centro de pesquisas tecnológicas situado no complexo minerador de Mariana. A figura 8 refere-se ao fluxograma da planta piloto onde esta fonte foi gerada.

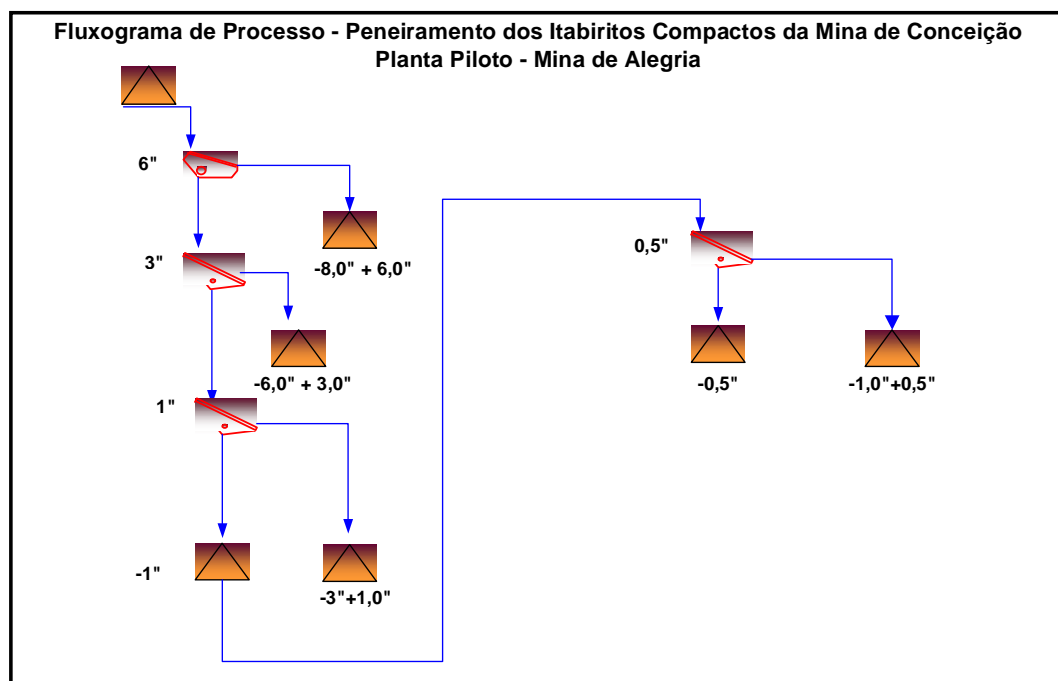


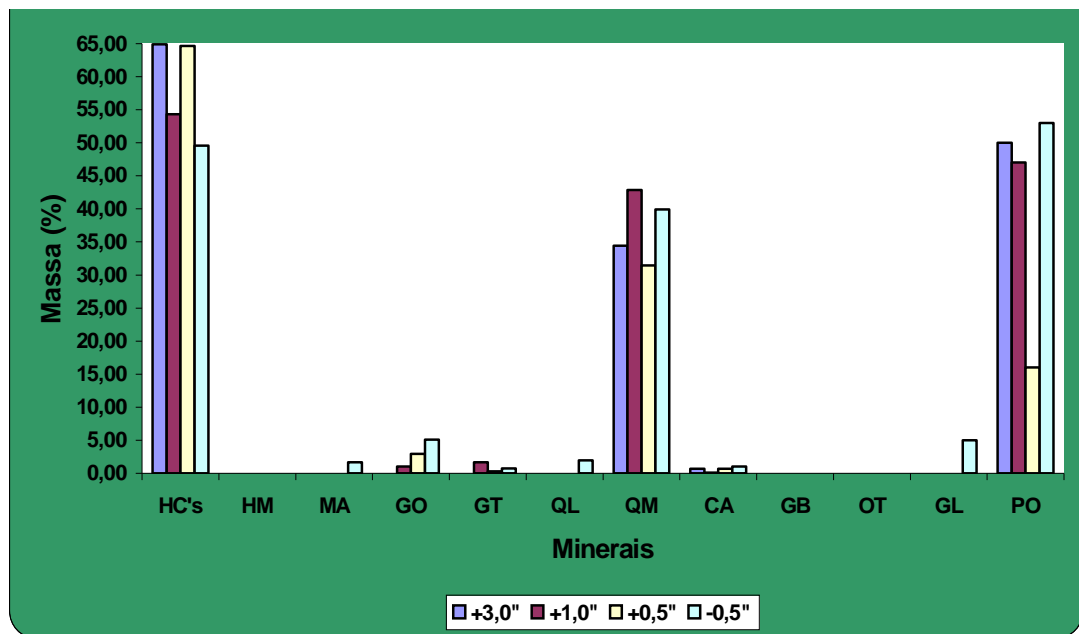
Figura 8: Fluxograma do processo de geração da amostra de itabirito compacto.

Foi feita uma caracterização exploratória da amostra global desta fonte, cujo objetivo era obter realmente uma amostra com elevada quantidade de partículas mistas, Para isso foi utilizado microscópio ótico de luz refletida sendo feita quantificação dos constituintes mineralógicos do itabirito compacto apresentados na tabela 7.

Tabela 7: Constituintes mineralógicos do itabirito compacto quantificado por microscopia ótica de luz refletida.

HCs: Hematitas Compactas (Especular, lamelar, granular e sinuosa)	QL: Quartzo Livre
HM: Hematita Martítica	QM: Quartzo Misto
MA: Magnetita	MN: Manganês
GO: Goethita	CA: Caulinita
GT: Goethita Terrosa	GB: Gibbsita

Foi realizada além da análise mineralógica cujo resultado está na figura 9, também análise química apresentando um teor de sílica para esta fonte de 39%.



Frações	HC's	HM	MA	GO	GT	QL	QM	CA	GB	OT	GL	PO
+3,0"	64,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	34,42	0,68	0,00	0,00	0,00	50,00
+1,0"	54,34	0,00	0,00	1,04	1,67	0,00	42,88	0,09	0,00	0,00	0,00	47,00
+0,5"	64,64	0,00	0,00	2,92	0,28	0,00	31,45	0,70	0,00	0,00	0,00	16,00
-0,5"	49,59	0,00	1,66	5,09	0,74	1,94	39,93	1,05	0,00	0,00	5,00	53,00

Figura 9: Resultado de análise mineralógica quantitativa (porcentagem em peso) das frações granulométricas da amostra de itabirito compacto.



---

---

## **4.2. Metodologia empregada para caracterização microestrutural das matérias-primas**

Nas últimas décadas foram disponibilizadas diferentes técnicas analíticas, cada vez mais sofisticadas, para suportar trabalhos de pesquisa e investigação na área de ciências dos materiais que incluem o estudo das matérias-primas. O fundamento de cada uma das técnicas se baseia em uma ou mais propriedades dos materiais e deve ser escolhida em função do tipo de material em estudo e do interesse específico da investigação. De modo geral as técnicas analíticas são complementares e podem ser utilizadas para identificar desde aspectos de superfície como forma de cristal até feições em nível atômico ou estrutural.

Para entender as respostas de cada método é fundamental entender do objeto em análise. Os diferentes espécimes minerais são determinados pelo arranjo dos átomos (cátions e ânions), que compõe a sua estrutura interna, e pela composição química, expressa por fórmula química estrutural.

A estrutura interna ou cristalina pode ser definida como o arranjo dos átomos no espaço, que compõe uma malha regular devido à repetição tridimensional deste arranjo em intervalos regulares. A estrutura interna ou retículo cristalino determina as propriedades físicas do cristal: contorno externo, dureza, clivagens, tipos de fratura, peso específico e propriedades ópticas. Eventualmente pode apresentar defeitos induzidos por deslocamento dos planos cristalográficos devido a esforços deformacionais da crosta terrestre, ou mesmo deslocamentos causados pela presença de impurezas com dimensão iônica diferente dos elementos que os constitui.

A composição química dos minerais pode variar dentro de limites definidos e previsíveis pelas características atômicas, gerando os diferentes grupos de minerais ou soluções sólidas. Os minerais podem conter elementos atípicos, considerados impurezas, que não são incluídos na sua fórmula. A composição química determina a cor do mineral, o traço, a transparência, densidade e o peso específico.

---

---

O agrupamento dos cristais de um mesmo mineral ou de diferentes minerais constitui uma rocha, cuja textura ou microestrutura foi condicionada pelos processos geológicos aos quais foi submetida ao longo de sua formação. As matérias-primas naturais utilizadas na siderurgia são rochas, beneficiadas ou in natura, que trazem para o processo siderúrgico uma diversidade de características cujas influências estão sendo paulatinamente investigadas visando um melhor desempenho no processo produtivo.

A caracterização microestrutural passou a ter, ao longo das três últimas décadas, destaque especial na exploração, beneficiamento e utilização do minério de ferro na siderurgia. Devido às características intrínsecas deste minério e facilidade de acesso às técnicas mais convencionais, os métodos analíticos mais utilizados têm sido a microscopia óptica de luz refletida e a difratometria de raios-X.

A Vale utiliza recursos de mineralogia aplicada deste a década de 70 século XX quando desenvolveu o processo de beneficiamento de minérios de mais baixo teor (itabiritos). Nesta ocasião, a maior ênfase dos estudos foi dada a estudos de liberação do quartzo, com objetivo de retirar o principal mineral de ganga através do beneficiamento mineral. No início da década de 90 a Vale desenvolveu uma metodologia própria de caracterização de produtos de minérios de ferro, com ênfase na distinção de diferentes morfologias e determinação do tamanho de cristais de óxidos e oxi-hidróxidos de ferro. A metodologia considera também a determinação dos minerais presentes e determinação da distribuição do tamanho dos cristais de quartzo. Por ser uma fase minoritária e considerada genericamente como mineral de ganga, pouca atenção foi dada à influência das suas características nos processos siderúrgicos, em especial de aglomeração a quente.

O quartzo apresenta fórmula estrutural  $\text{SiO}_2$  e pertence ao grupo dos silicatos, no qual estão inseridos os principais minerais constituintes das rochas. O principal arcabouço deste grupo é o agrupamento  $\text{SiO}_4$  que apresenta configuração tetraédrica onde o silício se posiciona na parte central e é rodeado pelos átomos de oxigênio. Dentre os demais constituintes deste grupo estão outros minerais, que também podem ser encontrados nas

---

matérias primas utilizadas nos processos siderúrgicos como os argilo-minerais, serpentinito, e minerais do grupo das micas.

Os cristais podem ou não apresentar formas características externas, em função da sua origem. Como exemplos de cristais de quartzo que apresentam formas características existem aqueles formados em bolhas gasosas de rochas magmáticas que geram os geodos, aqueles se formam ao longo de fraturas de rochas consolidadas gerando os veios. Os cristais que se formam ou recristalizam confinados por outros cristais e que constituem o substrato das rochas desenvolvem arranjos de faces ou “hábito” variado como granular, lamelar, ou outros, em função das resultantes das forças ou equilíbrio energético do conjunto.

O quartzo dos itabiritos e das rochas quartzíticas submetidos a processos metamórficos tende a apresentar formas granulares, ou seja, cristais equidimensionais com contatos tendendo a retilíneos e junções com pontos tríplices em ângulos de  $120^\circ$ .

Para avaliar a influência de diferentes características intrínsecas de sílica do *sinter feed* na qualidade física e metalúrgica do sinter, foram selecionadas aquelas características que conferem maior ou menor reatividade da partícula portadora do quartzo no processo de sinterização. As partículas menos reativas tendem a permanecer como partículas primárias e trazem ao sinter suas características originais. As partículas mais reativas tendem a ser incorporadas à fase líquida e favorecer, por exemplo, maior geração da fase silicato. As características minerais consideradas como de maior impacto no processo de sinterização são: tamanho de cristal, tamanho de partícula, porosidade e rugosidade da partícula, associação mineral, grau de liberação, ou seja, grau de pureza em relação à determinada característica.

Para este estudo foram empregadas além das técnicas convencionais para caracterização das matérias-primas, análise química por fluorescência de raios-X e via úmida (para PPC, FeO e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e análise granulométrica, as seguintes técnicas analíticas para a caracterização mineralógica e microestrutural: microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura e difratometria de raios-X.

Apresenta-se na figura 10 um resumo das metodologias utilizadas na caracterização das fontes de sílica adicionadas na mistura a sinterizar e do *sinter feed* base.

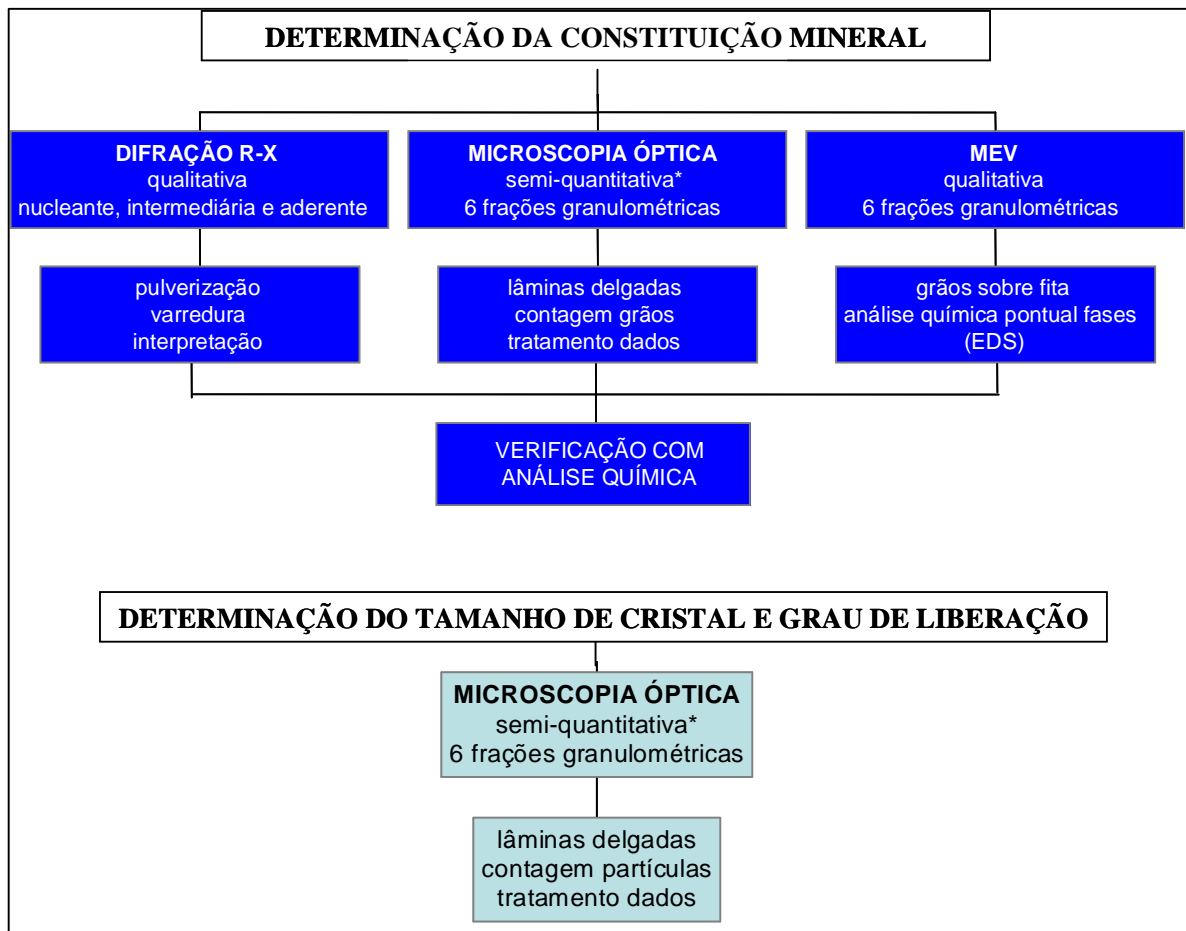


Figura 10: Técnicas experimentais empregadas para caracterização do *sinter feed* base e das fontes de sílica.

Para caracterização e identificação das principais diferenças mineralógicas e microestruturais das fontes de sílica, analisou-se a composição mineralógica de cada fonte de sílica adicionada, o grau de liberação de cada uma delas e o tipo de partícula (liberada monocristalina, liberada policristalina e mista).

---

---

#### 4.2.1. Microscopia óptica (MO)

A microscopia óptica é uma técnica convencional e bastante utilizada na indústria mineral. O fundamento desta técnica é o comportamento dos minerais a luz quando transmitida ou refletida e a observação é feita com ampliações. A identificação dos minerais depende da preparação adequada da amostra, sendo usualmente utilizados dois tipos de preparação:

i) Lâminas delgadas: a amostra é preparada e colada numa lâmina de vidro, desbastada até uma espessura de 30 $\mu$ m para que os minerais apresentem suas características diagnósticas através da transmissão da luz. Utilizada para análise de minerais translúcidos ou transparentes à luz como silicatos, carbonatos e outros;

ii) Seções polidas: a amostra é embutida em resina e, após sucessivas etapas de polimentos com abrasivos de diferentes granulações, resulta numa superfície plano-polida sobre a qual a luz irá incidir e ser refletida para a ocular. O diagnóstico é dado pela característica da luz refletida como intensidade, cor, etc. É aplicada a minerais não translúcidos ou opacos à luz (metálicos, em geral).

Tem sido muito utilizada a confecção de lâminas delgadas polidas que permite a observação de todos os tipos de minerais numa mesma preparação, além de facilitar para análises posteriores complementares, como, por exemplo, a microscopia eletrônica. Em ambos tipos de análise, luz transmitida ou refletida, os minerais são identificados através das propriedades quando submetidos à luz natural ou polarizada.

O objetivo desta técnica de análise foi o de conhecer as características mineralógicas, o tamanho dos cristais do quartzo, o percentual de partículas do tipo monocristalinas e policristalinas e o grau de liberação das mesmas.

Foram utilizados microscópios Leica modelos DM LAN e DM LP, e Nikon modelo Eclipse ME600. Para cada amostra foram feitas lâminas delgadas polidas de grãos em diversas frações obtidas por peneiramento a úmido a partir das amostras originais. Para a

---

confeção das seções polidas utilizou-se o sistema de preparação semi-automático Tegra Force-3 da Struers.

#### **4.2.2. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)**

Esta técnica foi empregada de forma a contribuir e complementar a análise via microscopia na determinação das características mineralógicas, do tamanho dos cristais do quartzo, do percentual de partículas do tipo monocristalinas e policristalinas e do grau de liberação das mesmas.

Para a visualização das características de superfície das partículas foram obtidas elétron-micrografias ao microscópico eletrônico de varredura LEO Stereoscan 440 da Universidade de São Paulo (USP/LCT). A amostra foi analisada em faixas granulométricas obtidas da amostra original por peneiramento a úmido.

#### **4.2.3. Difratometria de raios-X (DRX)**

Com esta técnica buscou-se complementar as informações de identificação e proporção das fases mineralógicas constituintes obtidas na microscopia ótica.

Para a realização das análises difratométricas, as amostras foram pulverizadas (<90% 270mesh), prensadas e analisadas no difratômetro de raios-X – MiniFlex da Rigaku. Após análise em procedimento padrão, as amostras foram submetidas a ataque químico com HCl para identificação das fases traços. As fases mineralógicas foram identificadas e interpretadas pelo software Jade com o banco de dados do International Centre Diffraction Data (ICDD).

### **4.3. Metodologia de preparação da mistura a sinterizar**

#### **4.3.1. Adequação granulométrica das amostras: *sinter feed* base, rejeito de jig, itabirito compacto e quartzito**

Definiram-se as faixas granulométricas para as amostras componentes da mistura de *sinter feed* em função de sua relevância para o processo de sinterização. A figura 11 mostra o fluxo de preparação destas matérias-primas.

---

O objetivo de se definir uma mesma faixa granulométrica para amostras a serem utilizadas nos ensaios de sinterabilidade é eliminar o efeito da granulometria no desempenho do processo.

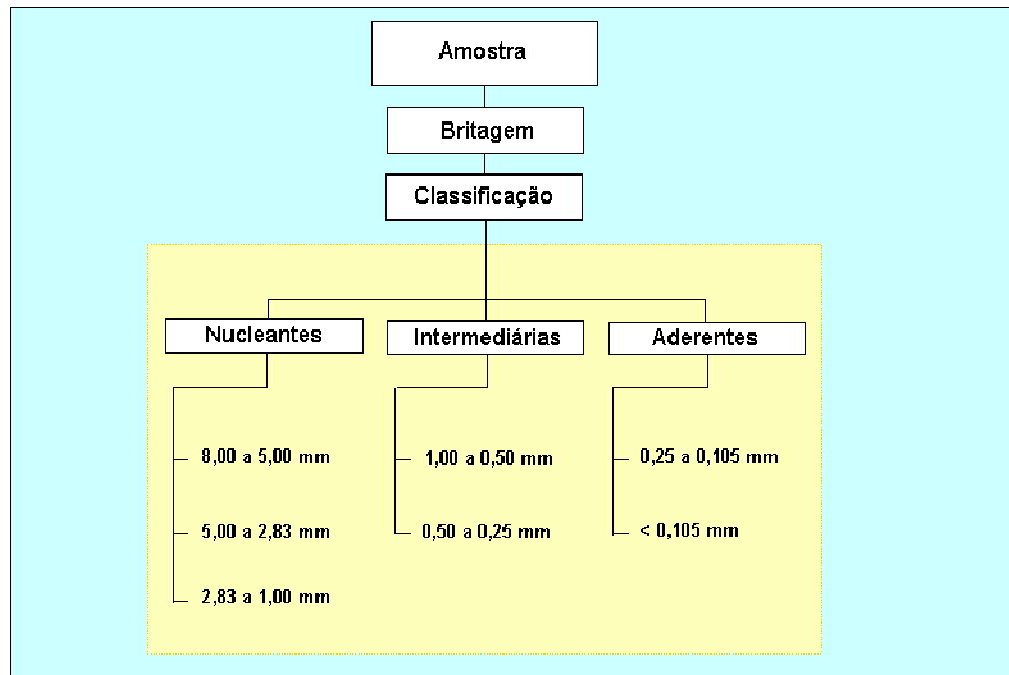


Figura 11: Fluxo de preparação das matérias-primas em faixas granulométricas.

#### 4.3.2. Sinterização piloto: qualidade química objetivada para o sinter produto e parâmetros de processo

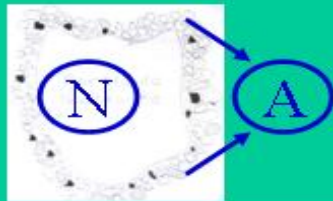
Definiram-se no planejamento experimental para este estudo nove condições de teste, sendo considerados para carregamento da sinterização os procedimentos sem segregação granulométrica.

O planejamento experimental da figura 12 demonstra em que condição as fontes de sílica foram adicionadas ao *sinter feed* base (SFS) nas diferentes frações granulométricas.


Fontes de sílica	Condições de Teste								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Rejeito de jigue	●			⊘			⊙		
Quartzito		●			⊘			⊙	
Itabirito compacto			●			⊘			⊙

**FAIXAS GRANULOMÉTRICAS**

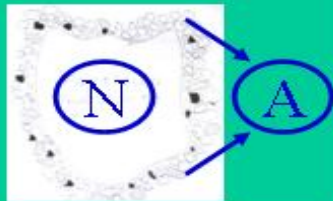
● Nucleantes	⊘ Intermediárias	⊙ Aderentes
100% da sílica adicionada na fração <b>nucleante</b> , sendo:	100% da sílica adicionada na fração <b>intermediária</b> , sendo:	100% da sílica adicionada na fração <b>aderente</b> , sendo:
8,00 a 5,00mm: 15%	1,00 a 0,50mm: 40%	0,25 a 0,105mm: 40%
5,00 a 2,83mm: 35%	0,50 a 0,25mm: 60%	< 0,105mm: 60%
2,83 a 1,00mm: 50%		



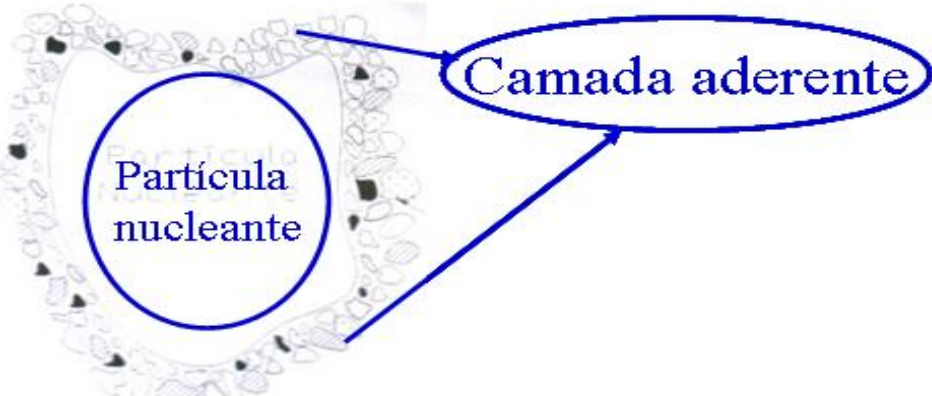
**A:** não há fonte de sílica na camada aderente  
**N:** toda fonte na camada nucleante



**I:** toda fonte é partícula intermediária  
**N:** não há fonte adicionada na camada aderente.



**A:** toda fonte adicionada na camada aderente  
**N:** não há fonte adicionada na camada nucleante.



Partícula nucleante

Camada aderente

Figura 12: Condição planejada para os ensaios na planta piloto de sinterização.



Na tabela 8 está apresentada a qualidade química objetivada para o sinter produto e demais condições de teste para a sinterização piloto.

Tabela 8: Características químicas do sinter e principais parâmetros de processo

Basicidade (CaO /SiO <sub>2</sub> ) do sinter produto	1,75
SiO <sub>2</sub> do sinter produto	4,50 %
MgO do sinter produto	1,45%
Fonte de MgO	Dolomita
Cal hidratada na mistura a sinterizar	1,00%
Coque na mistura a sinterizar	Retorno balanceado
Umidade da mistura	Ótima (medida experimental)
Altura da camada da máquina de sinter	500mm
Depressão	600mm H <sub>2</sub> O (ignição)
Finos de retorno (sinter de retorno)	30% (referência industrial)

#### 4.4. Metodologia empregada nos testes de sinterização piloto

Para realização dos testes piloto algumas matérias-primas deste estudo foram submetidas a uma preparação adicional para ajuste de suas distribuições granulométricas, definindo inclusive a massa de cada material visada para cada faixa granulométrica.

Na figura 13 está apresentado o planejamento experimental das queimas com a porcentagem de cada matéria-prima que compôs cada uma das nove misturas preparadas.

Fonte de sílica adicionada	Mistura / Constituição(%)	M01	M07	M02	M04	M05	M08	M03	M06	M09
Rejeito de jigue	SLM (Nucleantes)	1,19								
	SLM (aderente)		1,38							
	SLM (intermed.)				1,03					
Itabirito compacto	SM (Nucleantes)			4,82						
	SM (intermed.)					1,55				
	SM (Aderente)						1,36			
Quartzito	SLP (Nucleantes)							0,76		
	SLP (intermed.)								0,74	
	SLP (Aderente)									0,73
	SFS	54,70	54,25	50,93	54,77	54,16	54,36	55,09	54,98	54,90
	CALCARIO	9,42	9,38	9,41	9,41	9,40	9,39	9,41	9,39	9,38
	CAL VIRGEM	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
	COQUE/ANTRACITO	3,70	4,00	3,85	3,80	3,90	3,90	3,75	3,90	4,00
	RETORNO DE SINTERIZAÇÃO	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
	TOTAL (%)	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Figura 13: Planejamento dos ensaios na planta piloto e balanço de massa de cada mistura a sinterizar (porcentagem em peso).

No anexo encontram-se estabelecidos os procedimentos e orientações para realização de queimas normais na planta piloto de sinterização

A diferença entre a massa atual preparada e a massa visada, quando negativa, significa que foi preparado mais material que o necessário na faixa em questão. E, quando positiva, está em falta, devendo ser aumentada.

É importante que as ações para os ajustes devidos não alterem a composição química de cada fração granulométrica

Para a execução dos ensaios de sinterização trabalhou-se com retorno de sinterização alimentado e gerado, taxa de coque ajustada para equilibrar a taxa de retorno e FeO do sinter.

Ainda, não foi considerada a utilização de sinter degradado na mistura e com relação aos finos de retorno ficou definida a utilização de 30% de finos de retorno na mistura total. Quanto a umidade ótima de mistura, foi adotada uma umidade fixa de 6,0%.

Com relação às condições do ensaio foram consideradas a utilização de cal virgem (1,0% da mistura total), altura do leito de 550 mm e depressão de queima de 1400 mmH<sub>2</sub>O.

A ajuste da sílica do sinter produto foi feito por meio da adição das fontes de sílica em diferentes proporções nas diferentes frações granulométricas resultando nas nove condições de teste. Na tabela 9 estão apresentadas as condições operacionais simuladas para a sinterização piloto.

Tabela 9: Condições operacionais simuladas para a sinterização piloto.

PARÂMETRO	VALOR OU CARACTERÍSTICA
Umidade (%)	6,0
Tempo de mistura	
Mistura de minérios, (min.)	mistura manual
Mistura seca, (min.)	2
Mistura com água, (min.)	6
Mistura com adição de finos de retorno. grosso, (min.)	-
Altura do Leito, (mm)	550
Peso de <i>bedding</i> , (kg)	3 (usar bolas na 1 <sup>o</sup> queima)
Ignição	
Intensidade, (Mcal)	20
Vazão de GLP, (Nm <sup>3</sup> /h)	3,7
Vazão de ar, (Nm <sup>3</sup> /h)	140
Tempo, (min.)	1
Depressão,	
Ignição, (mmCA)	600
Queima 1 <sup>o</sup> fase, (mmCA)	1400
Queima 2 <sup>o</sup> fase, (mmCA)	1400
Resfriamento, (mmCA)	700
Desagregação do bolo	
N <sup>o</sup> de rotações do tambor ASTM	50

Combustível	
Antracito (50%) + Coque (50%)	Ajustado p/ balanço de retorno
Carregamento da panela	Em cima da caixa de vento
Exaustores	Ligar os dois exaustores
Retorno	
Retorno de AF, (%)	
Fino (0-5mm), (%)	
Grosso (5-10mm), (%)	
Retorno de sinterização, (%)	30 da MT
Fino (0-5mm), (%)	100
Grosso (5-10mm), (%)	0
Química especificada do sínter	
Basicidade (CaO /SiO <sub>2</sub> )	1,75
SiO <sub>2</sub> , (%)	4,50
MgO, (%)	1,45
Adições fixas na mistura parcial	
Cal virgem, (%)	1,00

#### 4.5. Metodologia empregada para caracterização do sínter produto

##### 4.5.1. Caracterização microestrutural do sínter produto

Apresenta-se na tabela 10 está apresentada a técnica experimental empregada na caracterização do sínter produto.

Tabela 10: Técnica experimental empregada na caracterização mineralógica do sínter produto.

MÉTODO	FAIXA	FRAÇÕES	PREPARAÇÃO	INFORMAÇÕES
MO – LCM (microscopia óptica)	global	global	<ul style="list-style-type: none"> <li>† peneiramento seco</li> <li>† 80% &lt; 0,500mm</li> <li>† 200g cada fração</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>† identificação das fases</li> <li>† quantificação das fases</li> <li>† descrição e interpretação da microestrutura</li> </ul>
	+ 1mm	+1mm		
	-1+0,25mm	-1+0,25mm		
	-0,25mm	-0,25mm		

---

Através desta técnica (MO) objetivou-se realizar análise metalográfica dos sinteres para conhecer as relações e proporções entre os seus principais constituintes minerais.

Foram utilizados microscópios Leica modelos DM LAN e DM LP, e Nikon modelo Eclipse ME600. Para cada amostra foram feitas lâminas delgadas polidas de grãos em diversas frações obtidas por peneiramento a úmido a partir das amostras originais. Para a confecção das seções polidas utilizou-se o sistema de preparação semi-automático Tegra Force-3 da Struers.

#### **4.5.2. Avaliação física e metalúrgica do sinter produto**

Para avaliação do sinter produto foram feitos testes físicos com o objetivo de medir a resistência do sinter. Para esta avaliação utilizou-se o teste de tamboramento (*Tumbler Test*) e o teste de queda (*Shatter Test*), adotando-se as normas “JIS M 8711” e “ISO 3271” respectivamente.

Para da redutibilidade e do RDI foram realizados ensaios metalúrgicos segundo as normas IR 7215 e ISO 4696-2 respectivamente.

#### 4.6. Macro fluxograma do desenvolvimento experimental

Na figura 14 pode-se ter uma visão geral dos procedimentos experimentais, desde a produção da amostra até a obtenção dos resultados finais.

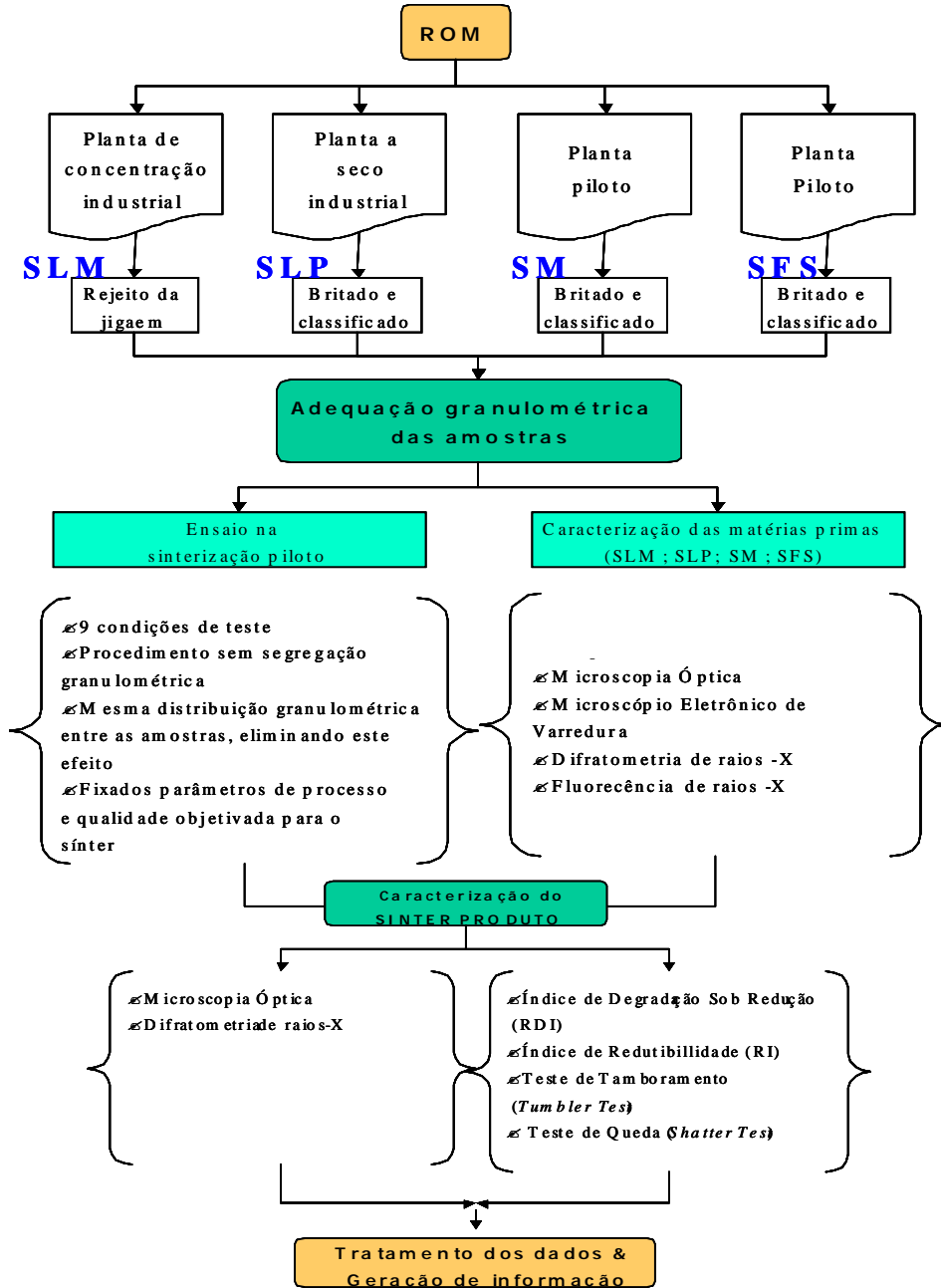


Figura 14: Macro fluxograma dos procedimentos experimentais utilizados neste trabalho.

## 5. Resultados e Discussão

A figura 15 demonstra que a sílica oriunda das fontes adicionadas (itabirito compacto, rejeito de jigge e quartzito) representou cerca de 26% do total presente na mistura total e em média 35% da mistura de minérios (*sinter feed* sul + fontes de sílica adicionadas).

Ainda na figura 15 está apresentado o teor de sílica de cada uma das nove misturas de minérios (*sinter feed* base + fontes de sílica adicionadas).

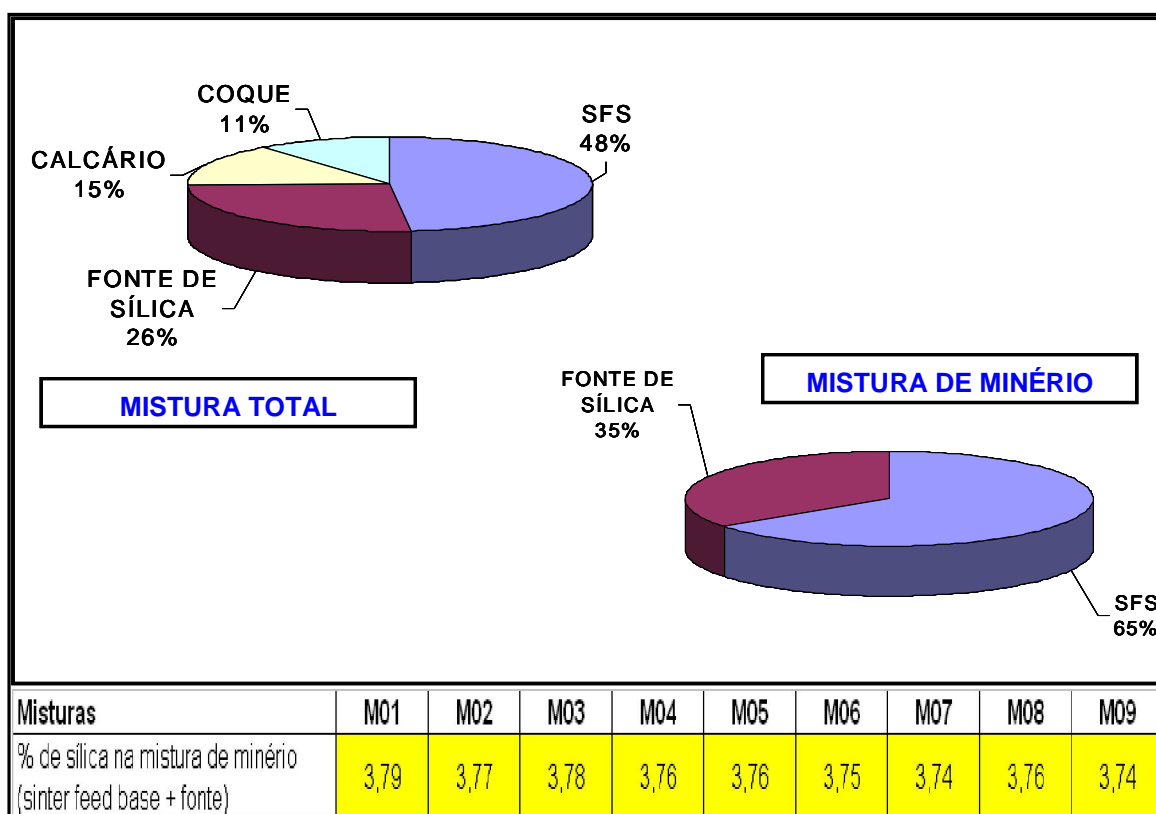


Figura 15: Participação percentual da sílica adicionada por componente da mistura a sinterizar e o teor de sílica de cada mistura de minério.

## 5.1. Caracterizações química, granulométrica e mineralógica do *sinter feed* hematítico

Na tabela 11 estão apresentados os resultados das análises químicas e granulométricas do *sinter feed* base (SFS).

Tabela 11: Resultados de análise química e granulométrica do *sinter feed* base.

Parâmetro	% por fração	Fet	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P	Mn	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	PPC	Fech.
Química Global	100,0	66,98	2,51	0,83	0,017	0,077	0,080	0,040	0,038	0,59	99,99
-6,3+1,0mm	54,95	68,81	0,64	0,46	0,019	0,042	0,015	0,045	0,034	0,350	100,01
-1,0+0,25mm	14,04	67,08	2,26	0,82	0,020	0,112	0,080	0,060	0,043	0,610	99,97
-0,25mm	31,01	64,50	5,89	0,83	0,020	0,123	0,100	0,060	0,055	0,720	100,08

O *sinter feed* base utilizado na mistura apresentou os seus maiores teores de sílica na fração aderente, no entanto esta representou 31,01% do total. Este *sinter feed* hematítico apresentou no resultado de análise global baixos níveis de contaminantes, como por exemplo, uma alumina de 0,83%. Sua fração nucleante apresentou um resultado de 54,95% da massa total.

Os resultados da caracterização mineralógica e microestrutural (figura 16) demonstram que sua fração nucleante possui 25% de quartzo e 75% de hematita, sendo 21% do quartzo como do tipo monocristalino e 79% do tipo policristalino, com um grau de liberação de 38% e um tamanho de cristal de aproximadamente 0,43mm. Na fração intermediária obteve-se um resultado de 56% de quartzo e 44% de hematita, com 63% de quartzo do tipo monocristalino e 37% do tipo policristalino, com grau de liberação de 70% tamanho médio de cristal do quartzo igual a 0,30 mm.

Na fração aderente obteve-se um valor de 80% de quartzo e 20% de hematita, com 100% do quartzo do tipo monocristalino, com grau de liberação de 91% e com tamanho médio de cristal do quartzo de 0,07 mm.

Observa-se na figura 16 que há uma redução do tamanho de cristal da fração nucleante para a fração aderente, da mesma forma, há também uma tendência das partículas se tornarem mais monocristalinas nas frações aderentes.



A fração aderente é também a que apresenta o maior grau de liberação. As tendências observadas podem ser resultado da degradação ocorrida com o manuseio do minério.

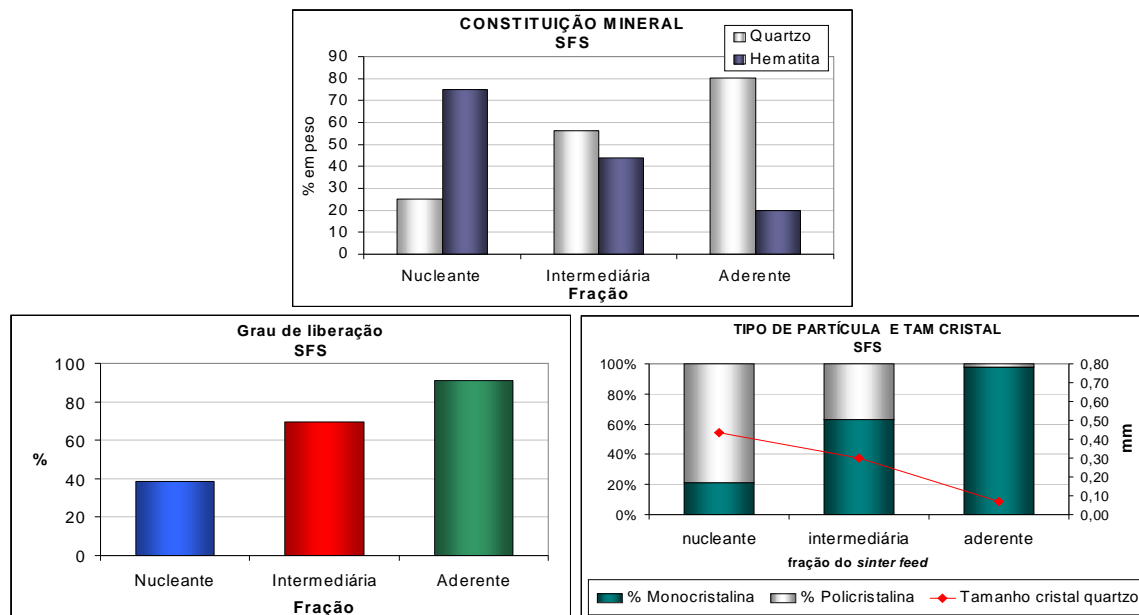


Figura 16: Resultado da caracterização mineralógica e microestrutural do *sinter feed* sul.

## 5.2. Caracterizações química, mineralógica e microestrutural das diferentes matérias primas empregadas como fontes de sílica

Na tabela 12 estão apresentados os resultados das análises químicas das fontes de sílica adicionadas em cada uma das misturas a sinterizar

Tabela 12: Resultados das análises químicas das fontes de sílica adicionadas.

Fontes de sílica	Tipos	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	Mn	MgO	CaO	TiO <sub>2</sub>	P	PF
Itabirito compacto	SM Nucleante	80,65	17,03	1,00	0,04	0,29	0,03	0,06	0,064	0,022	0,77
	SM Intermediária	50,15	47,27	1,17	0,06	0,41	0,09	0,04	0,072	0,020	0,91
	SM Aderente	43,54	53,63	1,59	0,04	0,19	0,04	0,04	0,082	0,015	0,76
Rejeito de jigue	SLM Nucleante	31,37	62,40	2,29	0,04	0,91	0,02	0,05	0,062	0,094	2,35
	SLM Intermediária	25,31	70,36	2,10	0,06	0,69	0,08	0,06	0,097	0,081	1,99
	SLM Aderente	41,02	52,18	2,66	0,14	0,79	0,03	0,06	0,076	0,098	2,61
Quartzito	SLP Nucleante	0,71	96,13	1,49	0,00	0,01	0,03	0,32	0,002	0,005	0,73
	SLP Intermediária	0,71	96,13	1,49	0,00	0,01	0,03	0,32	0,002	0,005	0,73
	SLP Aderente	0,71	96,13	1,49	0,00	0,01	0,03	0,32	0,002	0,005	0,73

---

Observa-se na tabela 12 a diferença de sílica das fontes adicionadas nas diferentes frações granulométricas foi de um teor mínimo de 17,03% a um máximo de 96,13%. A fonte de sílica itabirito compacto foi a que apresentou a maior variação no teor de sílica entre suas frações granulométricas, 36% de diferença entre a fração nucleante e a aderente.

Esta variação do teor de sílica pode estar associada à redução do tamanho da partícula, ou seja, à medida que as frações vão se tornando aderentes no itabirito compacto, há uma elevação substancial da porcentagem de SiO<sub>2</sub>.

O resultado da análise química do quartzito demonstrou que esta fonte de sílica é bastante homogênea, já que para as três frações granulométricas os resultados foram os mesmos.

A fonte rejeito de jigage foi a que apresentou os mais elevados níveis de alumina, acima de 2,0% conforme a tabela 12. Este fato deve estar relacionado à operação unitária de jigagem (concentração gravítica) onde foi coletada a amostra, esta é realizada num processo a úmido que direciona para seu rejeito a sílica grossa (acima de 1,0mm) e parte da alumina contida no minério.

Nos resultados da caracterização mineralógica e microestrutural da fonte itabirito compacto (figura 17), observa-se que a sua fração nucleante possui 31% de quartzo e 69% de hematita, com 89% do quartzo do tipo policristalino e 11% monocristalino, sendo o grau de liberação das partículas igual a 25% e o tamanho médio de cristal de quartzo de 0,29mm.

A fração intermediária apresentou 30% de quartzo e 70% de hematita, com 62% do tipo monocristalino e 38% policristalino, com grau de liberação de 89% e tamanho médio de cristal de quartzo de 0,34. Na fração aderente o quartzo presente é 46%, sendo mais de 96% deste quartzo do tipo monocristalino, com um grau de liberação de 80% e tamanho médio do cristal de quartzo de 0,10 mm (figura 17).

Nota-se na figura 17 que a partícula dessa fonte somente pode ser considerada de fato mista na fração nucleante, já que nas frações intermediárias e aderentes seu grau de liberação é de 80%, sugerindo uma sílica do tipo liberada majoritariamente monocristalina.

Esta alteração de característica pode estar associada à cominuição para sua adequação granulométrica ou mesmo à degradação natural fruto do manuseio.

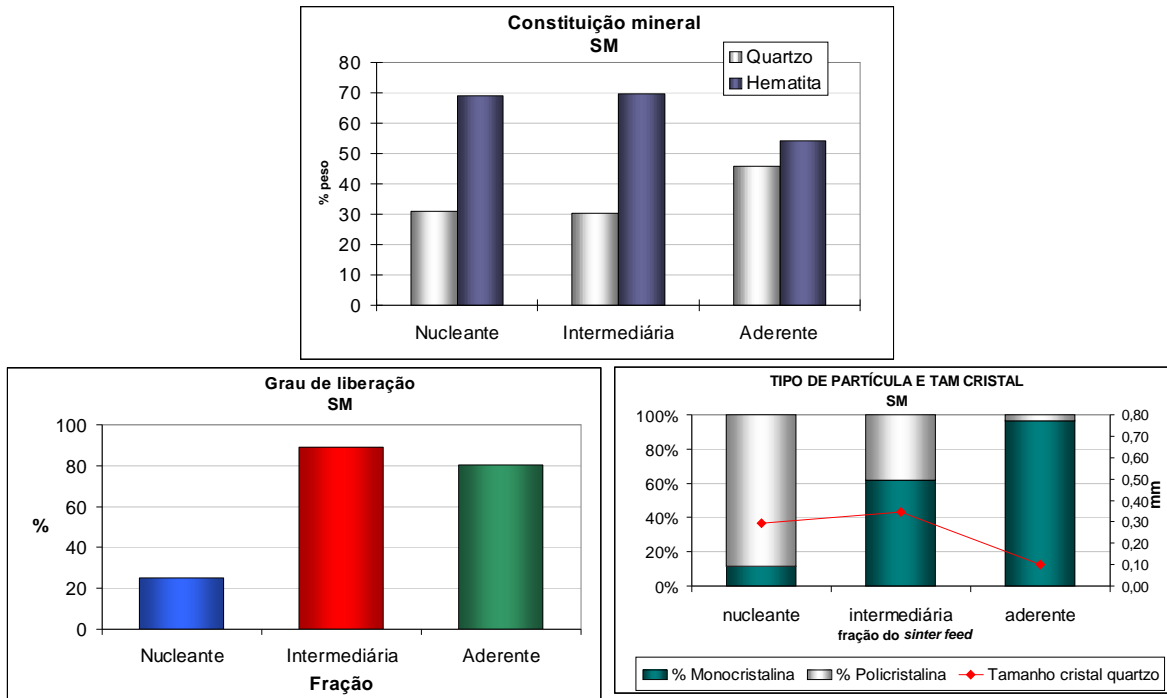


Figura 17: Resultado da caracterização mineralógica e microestrutural da fonte itabirito compacto.

Na figura 18 apresenta-se o resultado da fotomicrografia de MEV e microscopia ótica da fonte de sílica adicionada, itabirito compacto. Nota-se mais uma vez a maior presença de partículas mistas e do tipo policristalina na fração nucleante em relação às frações aderentes e intermediárias.

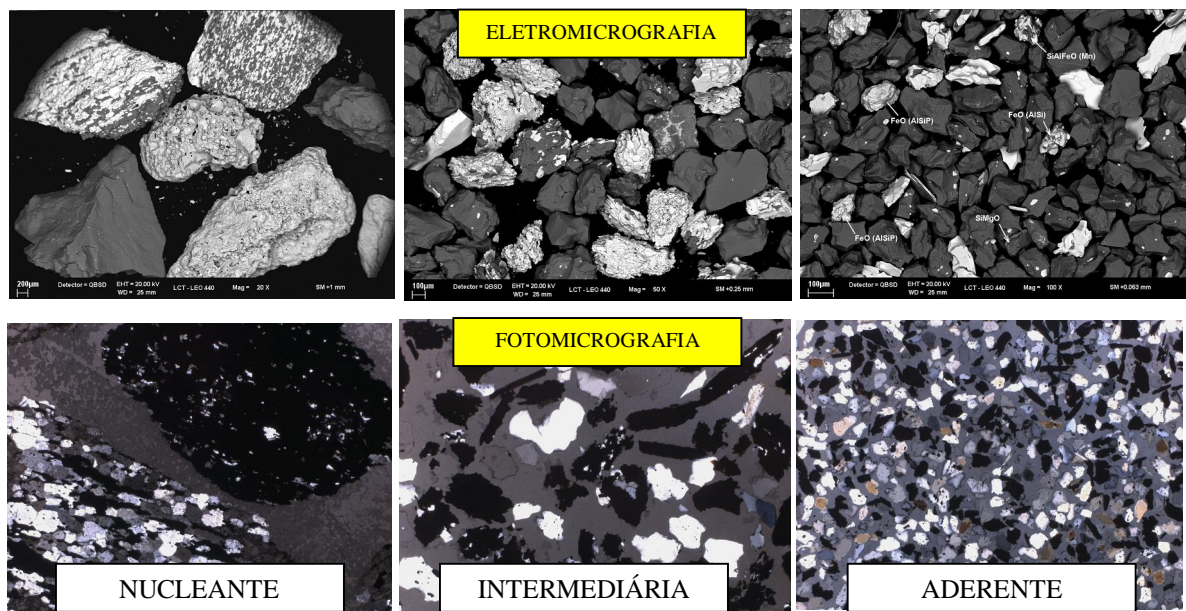


Figura 18: Resultado da fotomicrografia de MEV e microscopia ótica do itabirito compacto.

Na figura 19 apresentam-se os resultados da caracterização mineralógica e microestrutural da fonte rejeito de jigge apresentando um grau de liberação acima de 86% para as frações nucleante, intermediária e aderente. A sua fração nucleante possui 74% de quartzo e 26% de hematita, sendo 78% do tipo monocristalino e 22% policristalino, com tamanho médio de cristal de quartzo de 0,73 mm. A fração intermediária possui 51% de quartzo e 49% de hematita, sendo 92% do quartzo do tipo monocristalino e 8% policristalino com tamanho médio de cristal de quartzo de 0,45 mm. A sua fração aderente apresentou 39% de quartzo e 61% de hematita, sendo praticamente 100% do tipo monocristalino com tamanho médio de cristal de quartzo de 0,10mm.

O tamanho médio de cristal de quartzo desta fonte reduz das frações nucleantes para as aderentes, fruto provavelmente da cominuição.

Já com relação ao tipo de partícula a tendência da partícula se tornar do tipo monocristalina nas frações aderentes pode ser uma condição natural, com algum pequeno efeito da degradação/cominuição, já que na fração nucleante apenas 22% das partículas são do tipo policristalinas.

O seu elevado grau de liberação já nas frações nucleantes (acima de 80%) pode estar associado à eficiência de concentração da jigagem onde a amostra foi coletada, uma provável baixa participação de um ROM com perfil de partículas mistas na alimentação da planta e a degradação natural das partículas.

Na figura 20 apresenta-se o resultado da fotomicrografia de MEV e microscopia ótica da fonte de sílica adicionada, rejeito de jigue. Nota-se através das imagens o elevado grau de liberação em todas as frações granulométricas e a elevada quantidade de partículas do tipo monocristalinas.

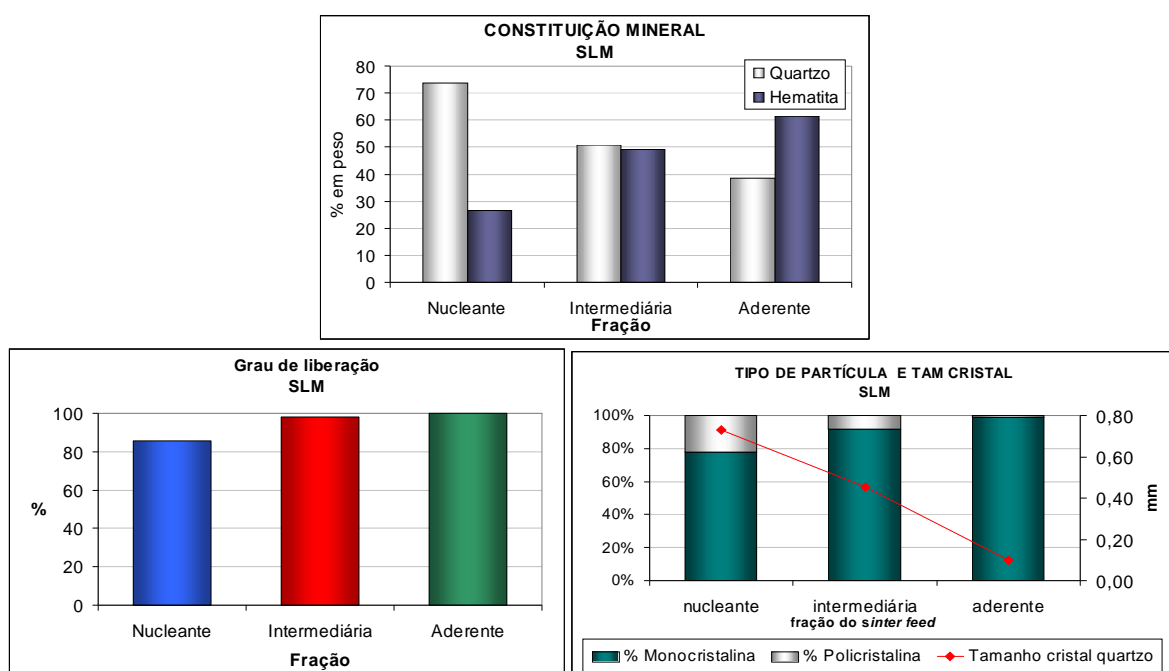


Figura 19: Resultado da caracterização mineralógica e microestrutural da fonte rejeito de jigue.

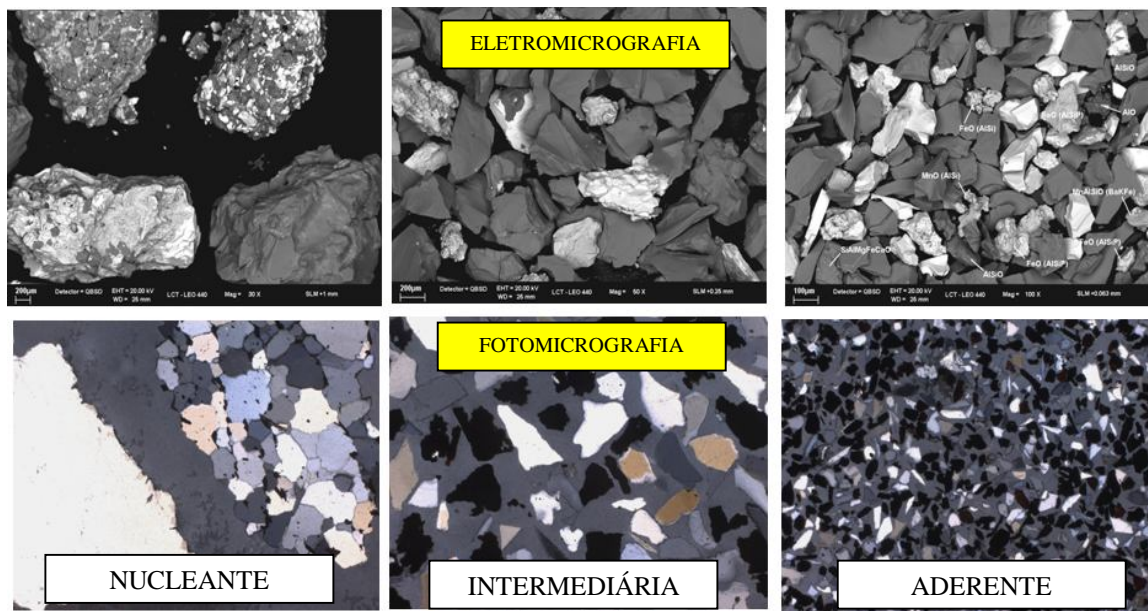


Figura 20: Resultado da fotomicrografia de MEV e microscopia ótica da fonte rejeito de jigue.

Na figura 21 estão apresentados os resultados da caracterização mineralógica e microestrutural do quartzito que nas três frações granulométricas possui praticamente 100% de quartzo, com grau de liberação de 100%. Na sua fração nucleante o quartzo é 96% do tipo policristalino e 4% monocristalino, com tamanho médio de cristal de quartzo de 0,43mm. Na fração intermediária possui 70% do quartzo do tipo policristalino e 30% monocristalino, com tamanho médio de cristal de quartzo de 0,28mm. Na fração aderente 56% do quartzo é do tipo policristalino e 44% monocristalino, com 0,09 mm de tamanho médio de cristal de quartzo.

O tamanho médio de cristal de quartzo reduz das frações nucleantes para as aderentes. No entanto, com relação ao tipo de partícula nota-se que a cominuição/degradação não foram suficientes para torná-la 100% monocristalina na fração aderente.

A sua constituição mineralógica e o seu grau de liberação refletem a homogeneidade desta fonte de sílica.

Na figura 22 apresenta-se o resultado da fotomicrografia de MEV e microscopia ótica da fonte de sílica adicionada, quartzito. Nota-se o elevado grau de liberação e a maior presença de partículas policristalinas.

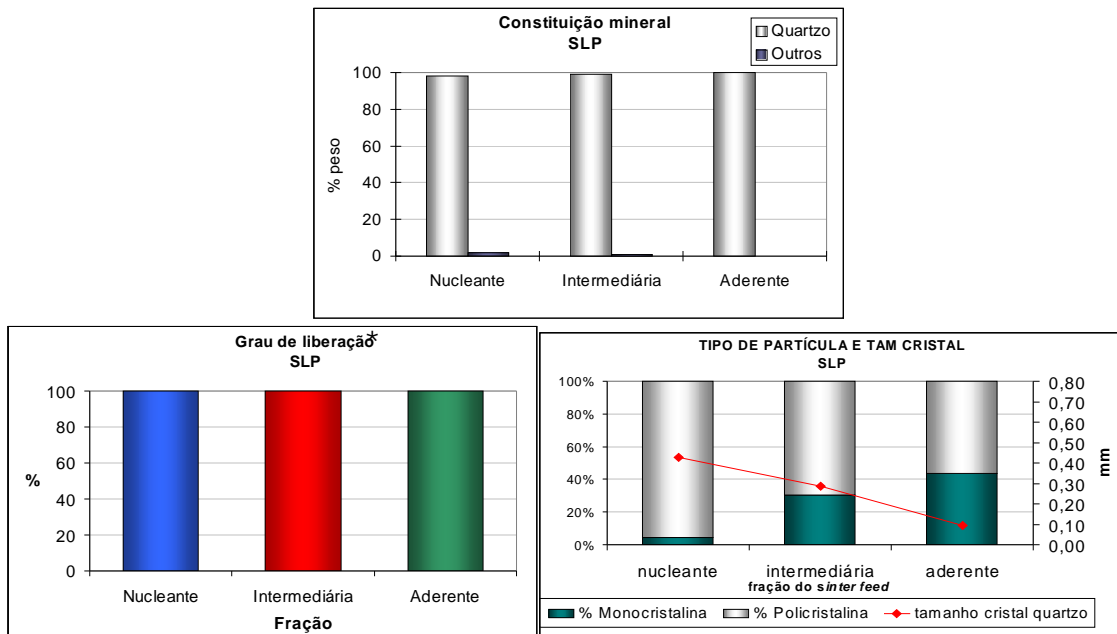


Figura 21: Resultado da caracterização mineralógica e microestrutural do quartzito.

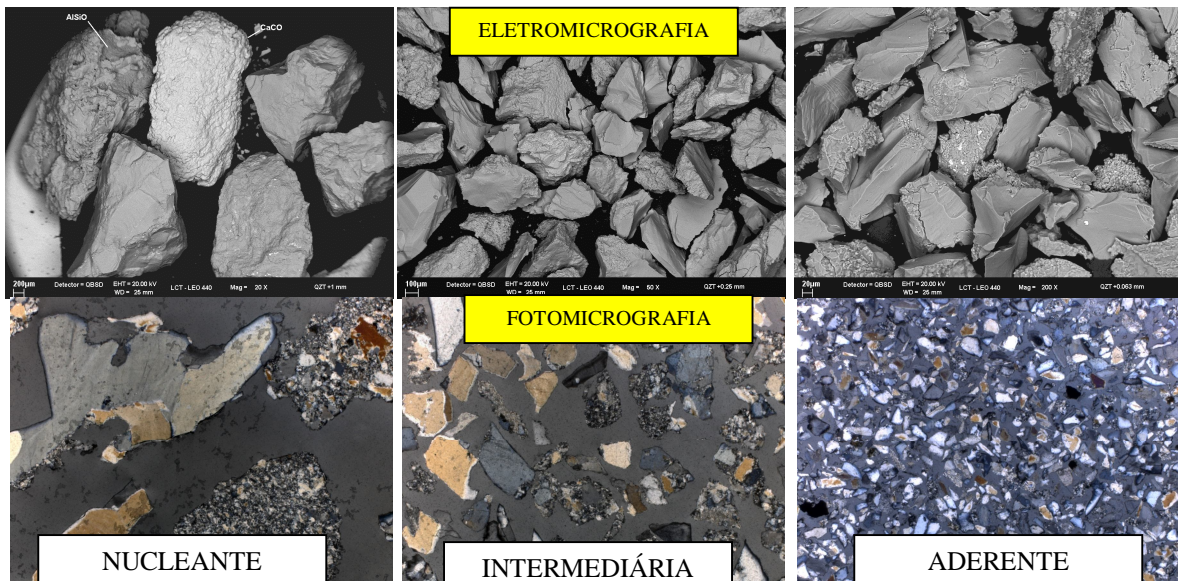


Figura 22: Resultado da fotomicrografia de MEV e microscopia ótica da fonte quartzito.

Na figura 23 é possível visualizar de forma esquemática as três fontes de sílica distribuídas nas frações nucleantes, intermediárias e aderentes, em relação a tamanho médio do cristal de quartzo, o tipo de partícula e o grau de liberação de cada uma delas.

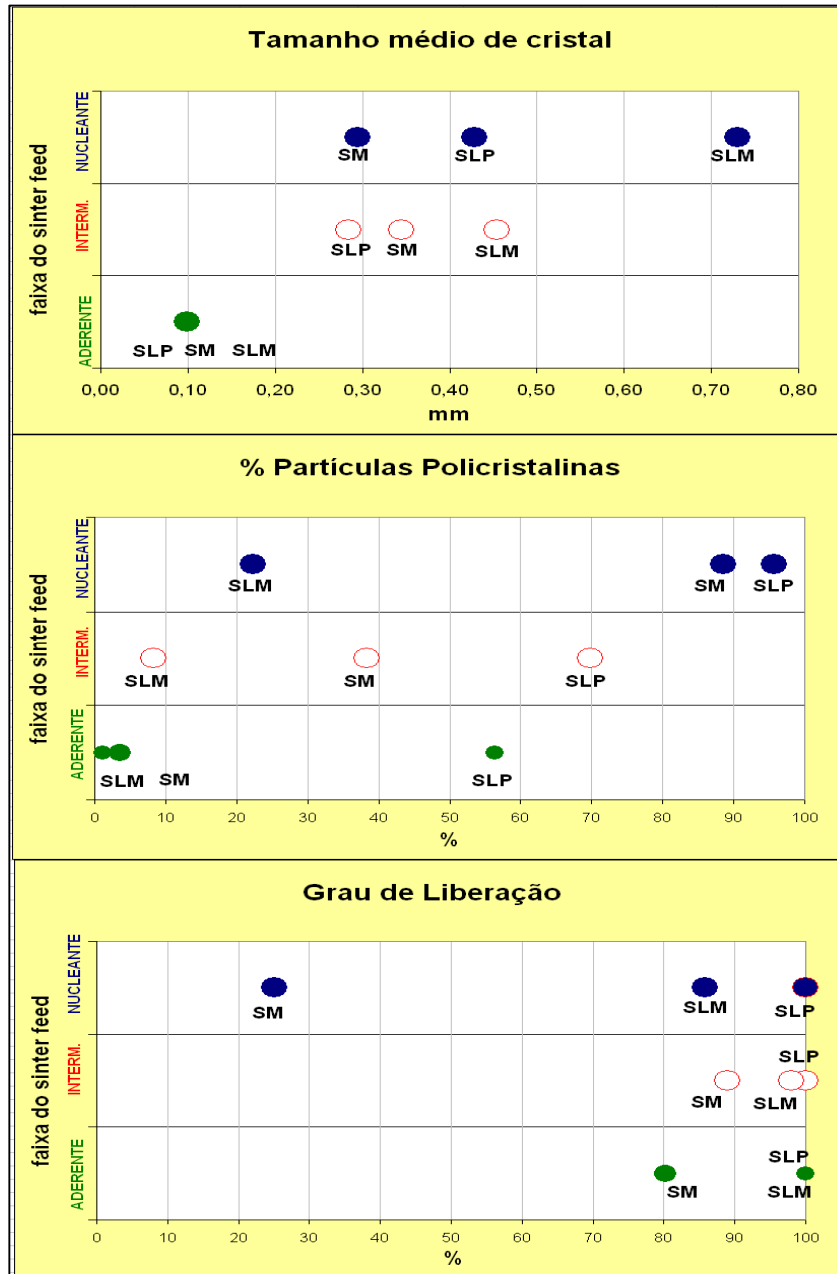


Figura 23: Fontes de sílica distribuídas nas frações nucleantes, intermediárias e aderentes, em relação a tamanho médio do cristal de quartzo, o tipo de partícula e o grau de liberação.



Na tabela 13 estão apresentados de forma consolidada os principais resultados da caracterização mineralógica e microestrutural das fontes de sílica adicionadas.

Tabela 13: Resultados consolidados das análises mineralógicas e microestruturais das fontes de sílica adicionadas.

Fonte de sílica adicionada	Fração granulométrica	Quartzo (%)	Hematita / outros (%)	% de partícula policristalina (%)	% de partícula monocristalina (%)	Grau de liberação (%)	Tamanho médio de cristal (mm)
Rejeito de jigue	Nucleante (-8 + 1mm)	74	26	22	78	86	0,73
	Intermediária (-1 + 0,25mm)	51	49	8	92	98	0,45
	Aderente (-0,25mm)	39	61	1	99	100	0,10
Itabirito Compacto	Nucleante (-8 + 1mm)	31	69	89	11	25	0,29
	Intermediária (-1 + 0,25mm)	30	70	38	62	89	0,34
	Aderente (-0,25mm)	46	54	4	96	80	0,10
Quartzito	Nucleante (-8 + 1mm)	98	2	96	4	100	0,43
	Intermediária (-1 + 0,25mm)	99	1	70	30	100	0,28
	Aderente (-0,25mm)	100	0	56	44	100	0,09

Através da tabela 13 e da figura 23, nota-se que as partículas de todas as fontes tendem a se tornarem do tipo monocristalinas com a redução de tamanho da fração granulométrica (nucleante para aderente). O mesmo ocorrendo para o tamanho de cristal que é sempre menor nas frações aderentes. Com relação ao grau de liberação este aumenta devido provavelmente à degradação ou cominuição.

### 5.3. Caracterizações químicas, físicas, mineralógicas e metalúrgicas dos sínteres produzidos em escala piloto

Na tabela 14 estão apresentados os resultados das análises químicas e granulométricas do sínter produto.

Tabela 14: Qualidade química e granulométrica de cada sínter.

Análise química (%)	M01	M04	M07	M02	M05	M08	M03	M06	M09
Fe total	59,80	60,03	59,78	59,73	59,67	59,68	60,04	59,47	59,67
FeO	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
SiO <sub>2</sub>	4,30	4,25	4,25	4,20	4,45	4,45	4,15	4,46	4,49
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,02	1,02	1,03	1,01	1,01	1,04	1,01	1,09	1,07
CaO	7,54	7,54	7,31	7,25	7,76	7,71	7,18	7,87	7,74
MgO	1,69	1,72	1,70	1,77	1,76	1,69	1,68	1,74	1,74
Mn	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,06	0,30	0,12
P	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Fechamento	99,88	100,19	99,59	99,45	100,12	100,04	99,66	100,30	100,23
<b>Basicidade</b>	<b>1,75</b>	<b>1,77</b>	<b>1,72</b>	<b>1,73</b>	<b>1,74</b>	<b>1,73</b>	<b>1,73</b>	<b>1,76</b>	<b>1,72</b>
<b>Granulometria</b>	<b>M01</b>	<b>M04</b>	<b>M07</b>	<b>M02</b>	<b>M05</b>	<b>M08</b>	<b>M03</b>	<b>M06</b>	<b>M09</b>
50,0 mm	10,87	12,39	15,31	14,33	13,10	15,37	10,62	12,62	13,77
35,5 mm	26,15	27,28	30,06	30,29	27,02	28,59	24,95	27,01	32,63
25,0 mm	38,77	37,84	41,11	41,58	39,91	38,13	36,65	38,47	42,57
10,0 mm	66,12	63,03	65,42	67,76	63,29	61,71	62,93	63,67	68,54
5,0 mm	93,78	94,40	94,97	96,15	93,50	92,73	92,08	93,35	94,51
-5,0 mm	6,22	5,60	5,03	3,85	6,50	7,27	7,92	6,65	5,49
Tamanho médio (mm)	23,85	23,93	25,60	25,99	24,35	24,65	22,99	24,14	25,87

O sínter produzido apresentou nos seus resultados uma variação no teor de sílica de 4,15% a 4,49% e uma basicidade de 1,72 a 1,77. Os resultados de granulometria apresentados mostraram um tamanho médio de partículas variando de 25,99mm a 22,99mm.

Na figura 24 estão apresentados os resultados da caracterização mineralógica do sínter produto por mistura sinterizada.

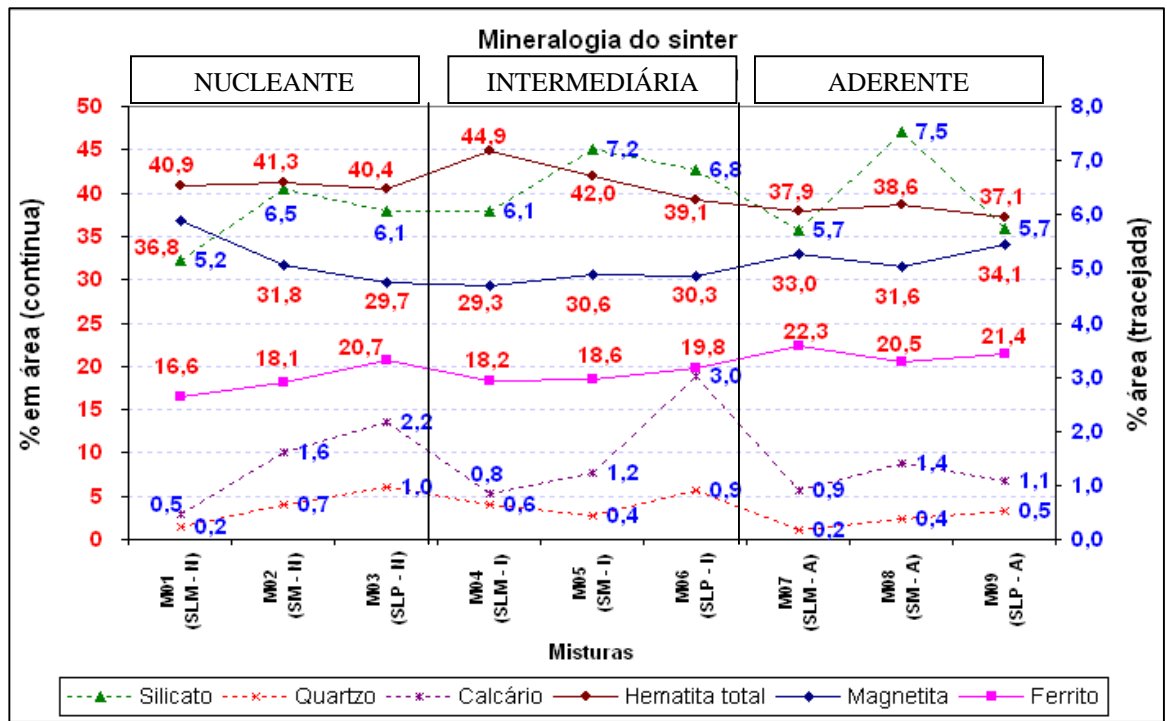


Figura 24: Mineralogia do sinter produto medida em área (%).

Os sínteres produzidos apresentaram em média 40% de hematita, 32% de magnetita, 20% de ferritos, 6% de silicatos, 1,5% de calcário residual e 0,5% de quartzo residual.

Percebem-se nos resultados de mineralogia, confirmado via análise química, uma certa similaridade entre os sínteres gerados, com uma variação da hematita total e da magnetita de 7,8%.

Dentro de uma mesma faixa granulométrica o sinter produto daquela mistura com a adição da fonte de sílica itabirito compacto foi a que sempre apresentou um maior percentual de silicatos. O rejeito de jigge por sua vez, apresentou os menores níveis de silicato numa mesma fração granulométrica.

Para avaliação da qualidade física do sinter produtos, foram realizados ensaios tamboramento e queda. Na tabela 15 estão apresentados os resultados destes ensaios.

Tabela 15: Resultados dos ensaios de queda e tamboramento de cada sinter.

Avaliação física do sinter									
Ensaio de queda (%)	M01	M02	M03	M04	M05	M06	M07	M08	M09
JIS M 8711									
+10,00 mm	85,80	86,20	86,10	85,10	85,00	85,80	85,40	84,30	87,30
Ensaio de tamboramento (%)									
ISO 3271									
+6,30 mm	64,50	63,40	64,10	64,90	62,50	64,00	65,20	63,80	65,20
-0,50 mm	6,30	6,40	6,40	6,10	6,40	6,30	6,10	6,30	6,10

Através da tabela 15 e da figura 25 nota-se que ocorreram significativas alterações nos resultados nos ensaios de queda e tamboramento para as diferentes misturas sinterizadas. Os resultados de tamboramento variaram de 65,20% a 62,50% e os de queda de 87,3% a 84,3%.

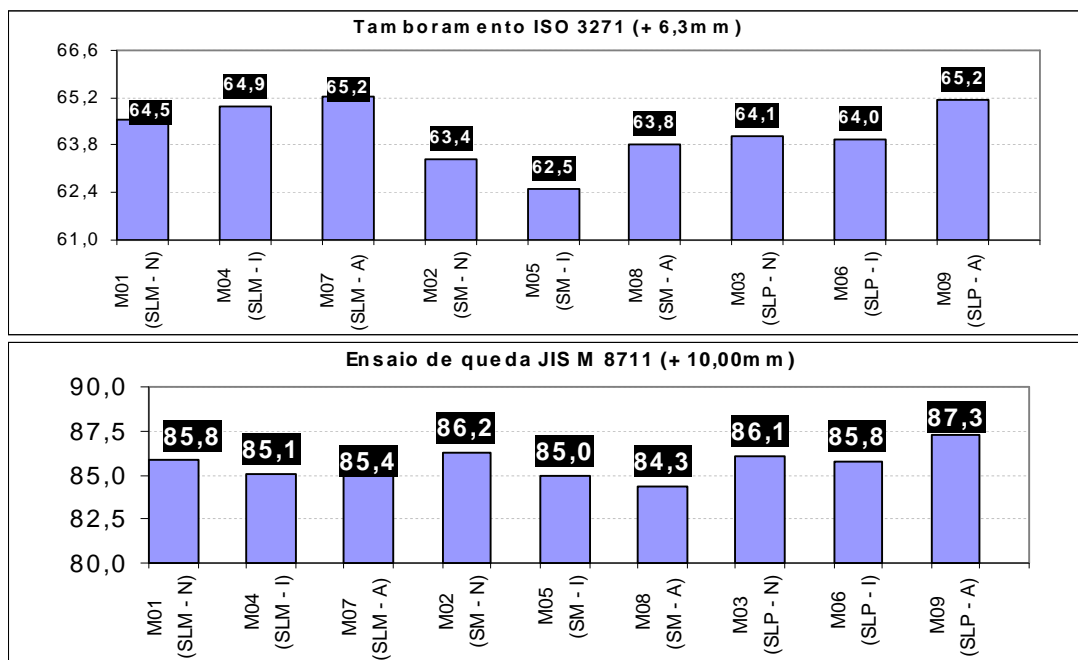


Figura 25: Resultados dos ensaios de tamboramento e queda de cada sínter.

Na figura 26 estão apresentados os resultados dos ensaios para avaliação da qualidade metalúrgica do sínter. Observa-se que para a redutibilidade a variação foi de 69,2% a 72,8% entre os nove sínteres produzidos na sinterização piloto.

Para o RDI notam-se alterações no patamar do índice de degradação sob redução entre os diferentes sínteres. Sua variação foi de 28,3% a 32,1%.

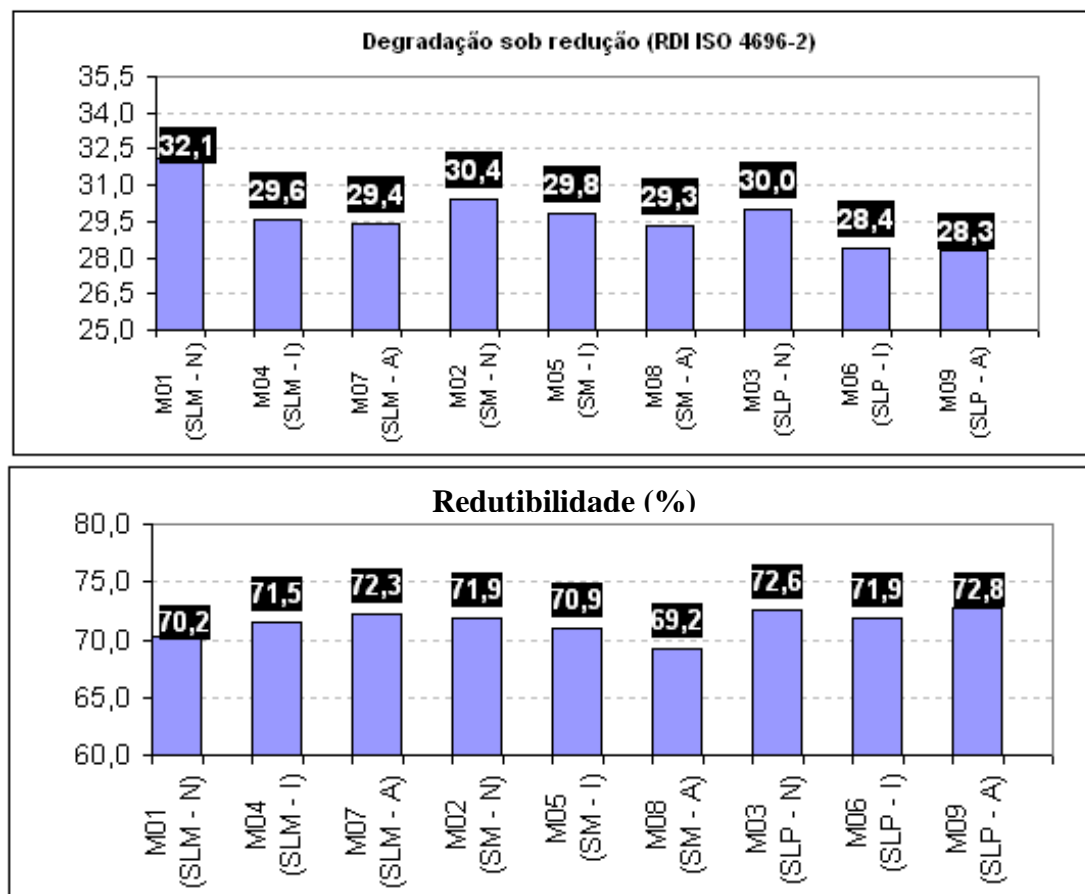


Figura 26: Resultados dos ensaios de redutibilidade e RDI do sínter.

#### 5.4. Influência de diferentes características intrínsecas da sílica e da distribuição dela nas frações nucleantes, intermediárias e aderentes do *sinter feed* nas qualidades químicas, físicas e metalúrgicas dos sínteres produzidos em escala piloto

Os níveis de variação apresentados na tabela de resultados químicos e granulométricos (tabela 14) sugerem pouca influência da fonte de sílica adicionada e de sua proporção nas diferentes frações granulométricas.

Na avaliação de interação via tratamento estatístico com método de otimização das respostas (DOE e ANOVA) entre o resultado do ensaio de tamboramento, a fonte de sílica adicionada e a fração granulométrica (figura 27), nota-se forte influência do tipo de sílica adicionada em determinada fração granulométrica na resistência física do sínter produto.

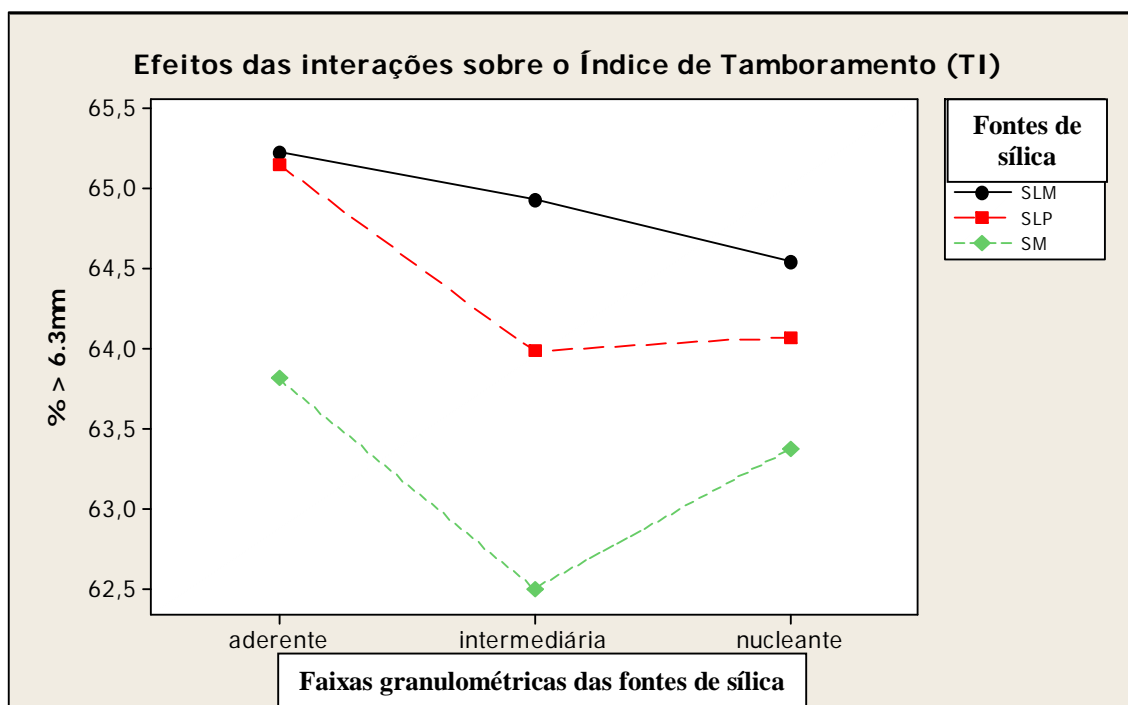


Figura 27: Resultado da interação entre o resultado do ensaio de tamboramento de cada sínter, a fonte de sílica e a fração granulométrica.

As frações aderentes contribuem para uma melhor resistência do sinter para uma mesma fonte de sílica adicionada. Agrupando-se as diferentes fontes de sílica adicionadas em uma mesma fração granulométrica (figura 28), nota-se que a fonte de sílica itabirito compacto é a que apresenta sempre os menores níveis de tamboramento.

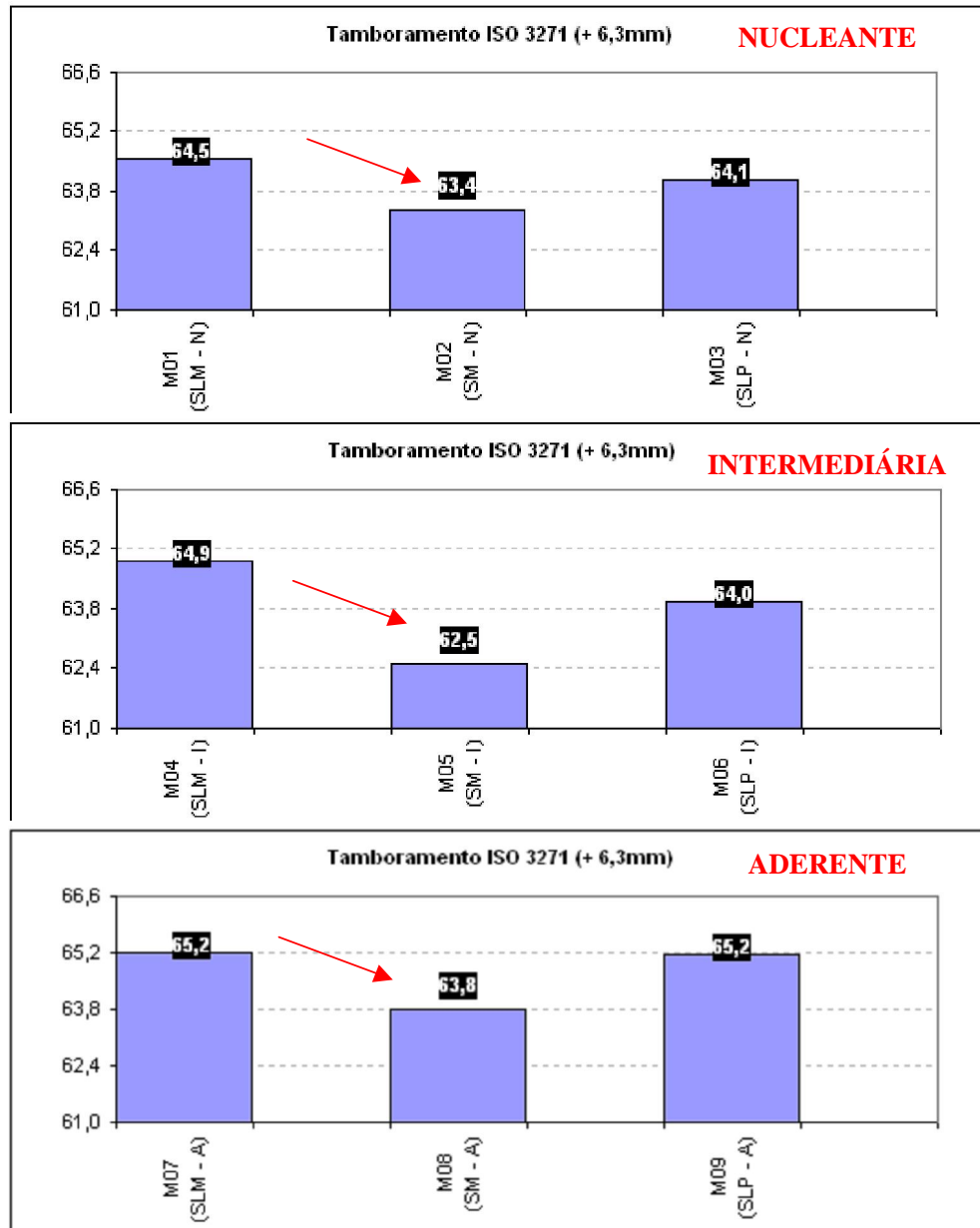


Figura 28: Resultados do ensaio de tamboramento de cada sinter agrupado por faixa granulométrica.

---

Esta menor resistência do sinter com adição da fonte de sílica itabirito compacto pode ser explicada em função do maior percentual de hematita em relação ao quartzo nesta fonte em todas as frações granulométricas, sugerindo uma melhor distribuição da sílica, favorecendo a formação dos silicatos de cálcio (figura 24) o que pode inibir a formação dos ferritos necessários para conferir uma boa resistência física ao sinter produto.

O rejeito de jigue foi a fonte adicionada que propiciou os melhores níveis de resistência ao tamboramento independentemente da fração granulométrica. Esta mesma fonte foi a que apresentou os menores níveis de silicato no sinter produto em uma mesma fração granulométrica.

A caracterização mineralógica e microestrutural das fontes de sílica adicionadas apontaram para uma similaridade do ponto de vista da mineralogia e do tipo de partícula entre as fontes rejeito de jigue e itabirito compacto na fração aderente. Diante disto esperava-se um resultado de resistência ao tamboramento similar entre os sínteres gerados.

Um dos fatores que pode ter contribuído para que isto não ocorresse, pode ser o grau de liberação que na fração aderente do rejeito de jigue foi de 100% e no itabirito compacto 80%.

Os resultados do ensaio de queda (figura 25) demonstram uma tendência de redução nos seus resultados nas frações aderentes, excetuando-se a fonte de sílica quartzito.

Os resultados de RDI (figura 29) se mostraram influenciáveis pelas diferentes fontes de sílica adicionadas e pelas frações granulométricas destas fontes.



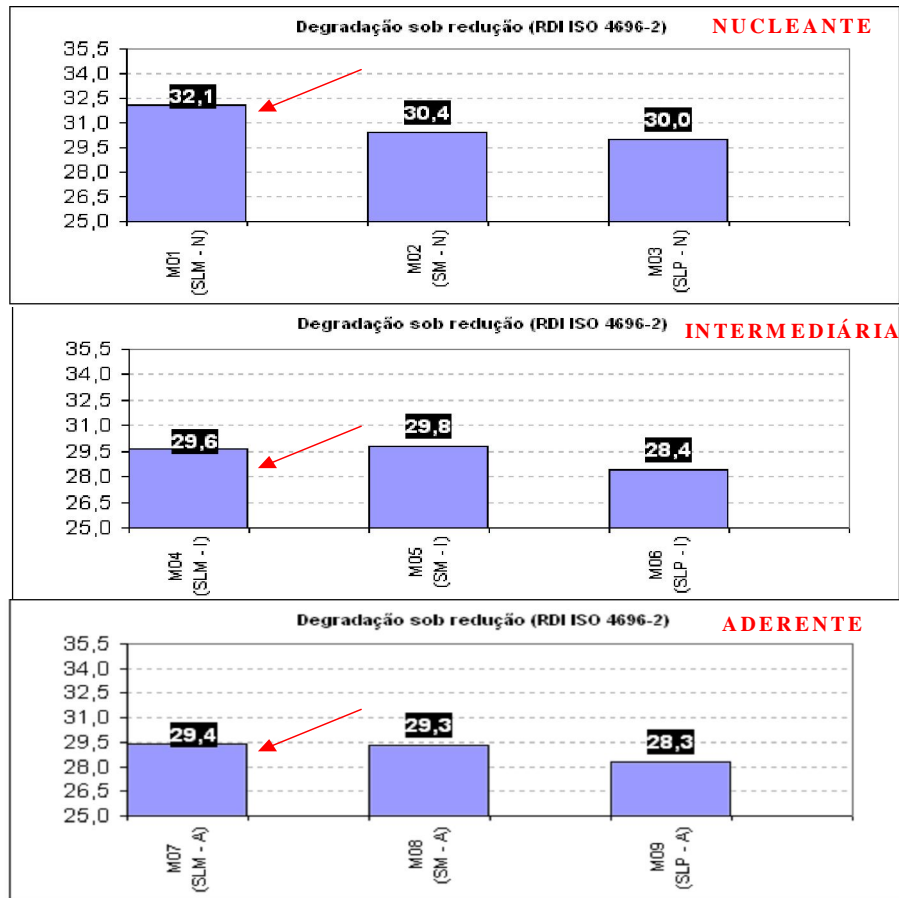


Figura 29: Resultados do RDI agrupado por faixa granulométrica de cada sínter.

Os resultados de RDI apresentaram seus mais baixos níveis com o aumento da proporção de sílica na fração aderente.

A fonte de sílica rejeito de jigge quando adicionada foi a que propiciou, para praticamente todas as frações granulométricas os maiores níveis de RDI, sendo este fato, resultado do seu maior teor de alumina presente em todas as frações granulométricas (porcentagem de alumina no rejeito de jigge maior que 2,0%).

Os melhores resultados de redutibilidade (figura 26) foram os obtidos com a adição da fonte de sílica quartzito, esta mesma fonte conferiu ao sínter produzido uma melhor

---

estabilidade nos resultados entre diferentes frações granulométricas. Este fato pode ser explicado pela sua homogeneidade do ponto de vista químico.

Comparando-se os resultados de redutibilidade obtidos para o sinter gerado com a adição do rejeito de jigite e itabirito compacto, nota-se uma inversão de tendências, o rejeito de jigite tem seu melhor resultado na fração aderente (72,3%), e a fonte itabirito compacto apresentou seu melhor resultado na fração nucleante (71,9%).

### **5.5. Influência de diferentes características intrínsecas da sílica e da distribuição dela nas frações nucleantes, intermediárias e aderentes do *sinter feed* na produtividade e no consumo de combustível da sinterização piloto**

Na tabela 16 estão apresentados os resultados encontrados dos principais índices operacionais da sinterização piloto para cada mistura sinterizada: consumo de combustível e produtividade.

Tabela 16: Resultados de produtividade e consumo de combustível da sinterização piloto.

Índices Operacionais:	M01	M02	M03	M04	M05	M06	M07	M08	M09
<b>Produtividade</b>									
<b>Leito</b>									
(t/m <sup>2</sup> /h)	1,67	1,76	1,64	1,67	1,66	1,61	1,59	1,67	1,64
(t/m <sup>2</sup> /24h)	40,10	42,30	39,30	40,20	39,90	38,60	38,30	40,10	39,50
<b>Mistura</b>									
(t/m <sup>2</sup> /24h)	39,80	41,90	39,00	39,90	39,60	38,30	38,00	39,80	39,10
<b>Consumo específico de</b>									
Combustível (kg/t sinter)	61,20	63,60	61,60	62,40	64,60	64,60	66,30	64,70	65,90

Os resultados dos índices operacionais em questão, apresentados nas figuras 30, 31 e 32 apontam para uma significativa influência da fonte de sílica adicionada e de sua fração granulométrica no consumo de combustível e produtividade.

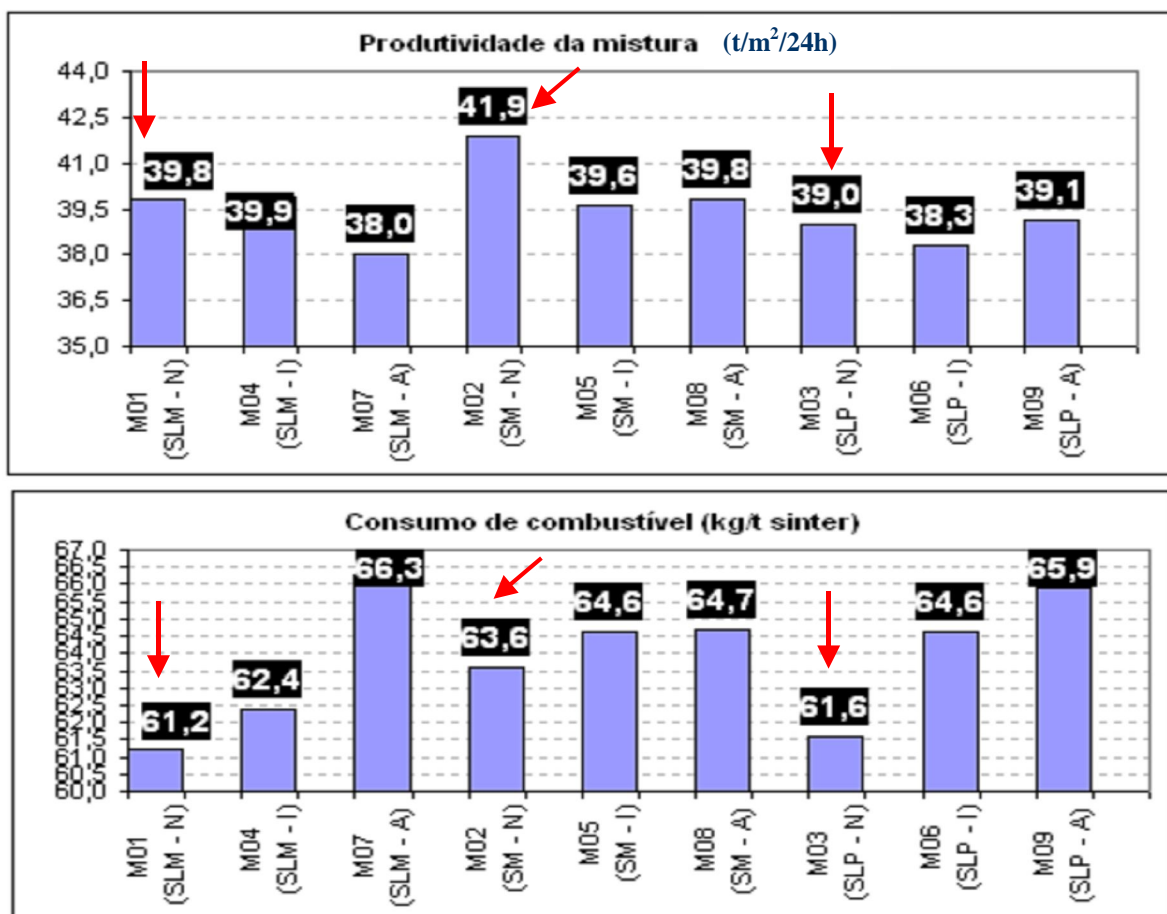


Figura 30: Resultados de produtividade e consumo de combustível da sinterização piloto.

Na figura 30 nota-se que existe uma forte tendência da sílica na fração nucleante contribuir para melhores níveis de produtividade na sinterização quando comparada com a sílica nas outras frações.

Este fato pode ser explicado pelo favorecimento da permeabilidade do leito com as frações nucleantes (-8 + 1mm).

Em uma mesma fração granulométrica o itabirito compacto contribuiu para uma melhor produtividade conforme apresentado na figura 30. Uma possível explicação para este fato pode estar relacionada ao grau de liberação desta fonte de sílica na fração nucleante, que apresentou o maior resultado de produtividade (41,9%), associado à

mineralogia desta fonte de sílica que apresentou em todas as frações granulométricas elevados níveis de hematita e baixo percentual de quartzo.

Estes dois fatos observados na caracterização mineralógica e microestrutural das fontes de sílica sugerem uma boa distribuição da sílica, já que a o itabirito compacto foi a fonte de maior percentual adicionado em massa, aumentando a probabilidade de reação entre a sílica e o calcário.

Nas figuras 31 e 32 estão apresentados os resultados da interação entre as características físicas e mineralógicas das matérias-primas, o consumo de combustível e a produtividade do processo de sinterização. Utilizou-se um tratamento estatístico via DOE e ANOVA com métodos de otimização das respostas para análise verificação da interação.

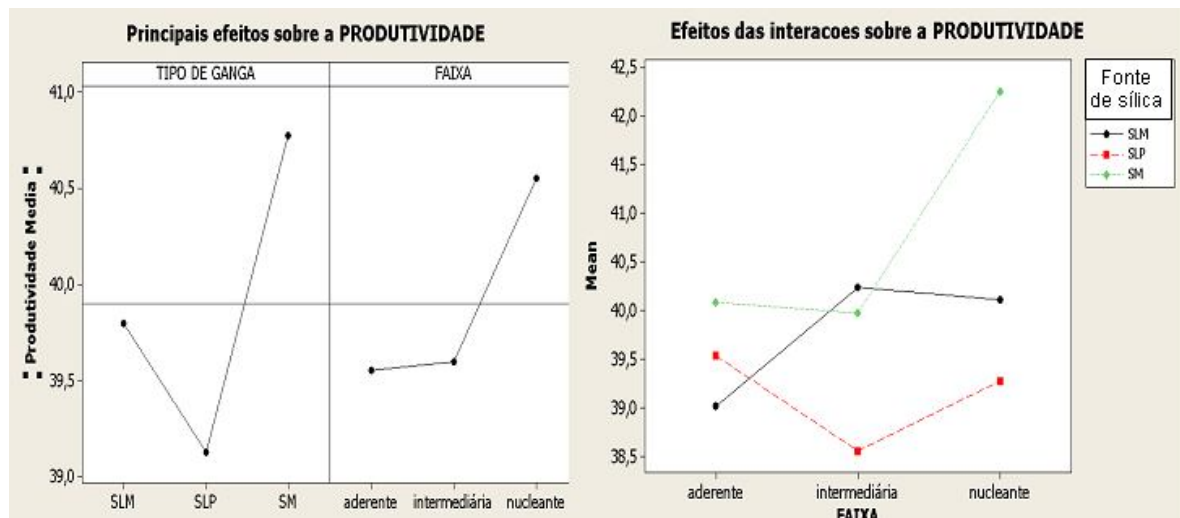


Figura 31: Resultado da interação entre as características físicas e mineralógicas das matérias-primas e a produtividade da sinterização piloto.

Observa-se também uma tendência do quartzito (SLP) estar sempre em patamares inferiores de produtividade, podendo ser este um efeito da grande presença de quartzo (100%), o que resulta na ausência de uma base de hematita que permita uma boa distribuição das suas partículas.

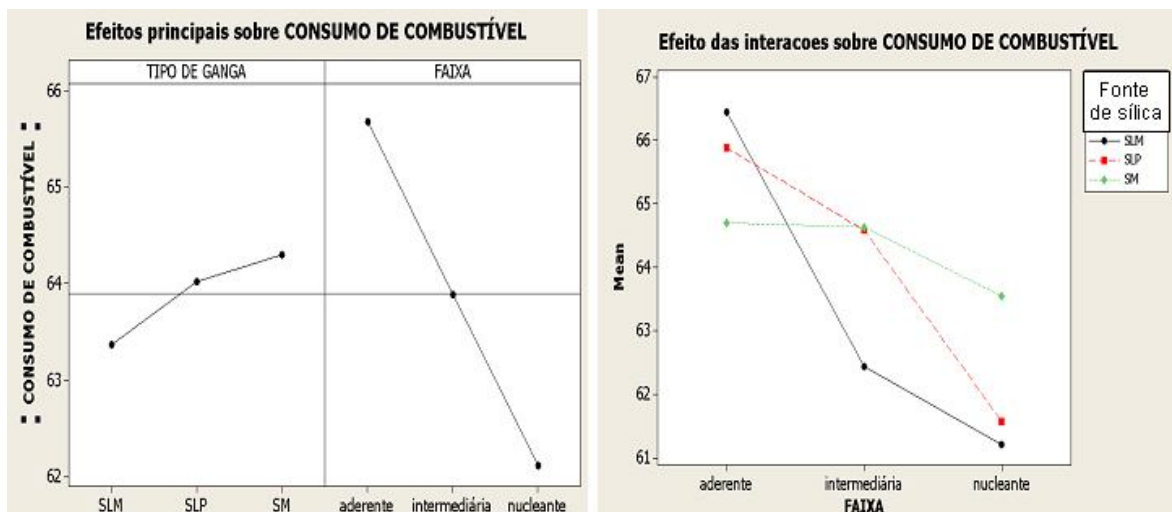


Figura 32: Resultado da interação entre as características físicas e mineralógicas das matérias-primas e o consumo de combustível da sinterização piloto.

O resultado do consumo de combustível atingiu os seus mais baixos níveis na fração nucleante conforme figura 32.

Com relação às fontes de sílica adicionadas há uma tendência de um menor consumo de combustível para o caso do rejeito de jigge (SLM), exceto quando na fração aderente (figura 32).

A figura 33 mostra um desenho esquemático, baseado nos resultados deste trabalho, da influência do tamanho de partícula e do tamanho de cristal do quartzo sobre os parâmetros de processo da sinterização piloto (consumo de combustível e produtividade) e resistência ao tamboramento do sinter produto.

No caso do consumo de combustível a seta encontra-se pontilhada e em vermelho chamando a atenção para o fato de que é necessária uma composição “base” mínima, como no caso deste estudo, o *sinter feed* sul garantindo uma boa resistência do sinter produto. Neste estudo este minério base participou em média com 50% da massa total da mistura.

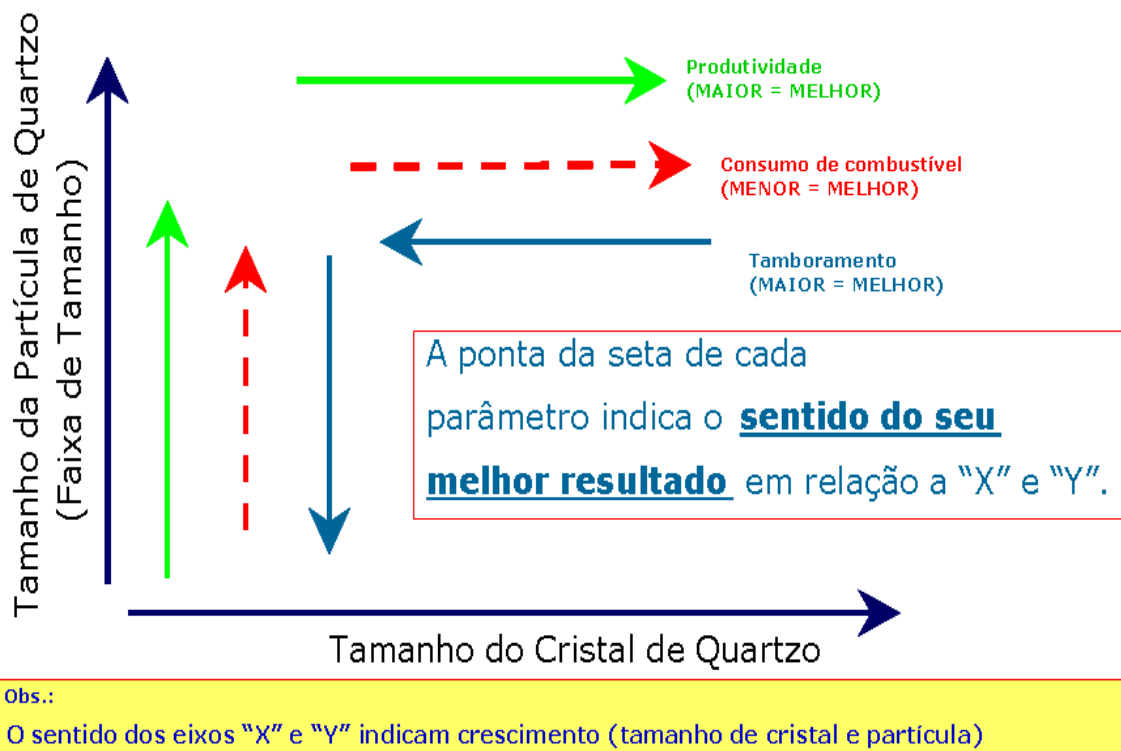


Figura 33: Diagrama esquemático mostrando a influência das características intrínsecas do quartzo, sobre os parâmetros da sinterização (sinterização piloto) e qualidade física do sinter.

---

---

## 6. Conclusões

Enumeram-se a seguir, dentro das condições estudadas, as seguintes conclusões deste trabalho:

1 – O *sinter feed* sul (SFS) apresentou um teor de sílica global de 2,51%, sendo 0,64% de sílica na fração nucleante (55% em massa), 2,26% na fração intermediária (14% em massa) e 5,89% na fração aderente (31% em massa). A fração nucleante apresentou 25% de quartzo e 75% de hematita, sendo 21% de quartzo do tipo monocristalino e 79% policristalino, com grau de liberação de 38% e com um tamanho médio de cristal do quartzo de 0,43mm. Na fração intermediária obteve-se um valor de 56% de quartzo e 44% de hematita, com 63% do quartzo do tipo monocristalino e 37% policristalino, com grau de liberação de 70% e tamanho médio de cristal do quartzo igual a 0,30mm. Na fração aderente obteve-se um valor de 80% de quartzo e 20% de hematita, com praticamente 100% do quartzo do tipo monocristalino, grau de liberação de 91% e com tamanho médio de cristal de quartzo de 0,07mm. Este *sinter feed* foi utilizado como minério base e classificado como *sinter feed* hematítico anidro.

2 – As três fontes de sílica adicionadas apresentaram grandes diferenças nos seus teores de SiO<sub>2</sub>, variando de 17,03% no caso do itabirito compacto na fração nucleante, até 96,13% de sílica para o quartzito na três frações (aderente, intermediária e nucleante). O rejeito de jigge foi o que apresentou os maiores níveis de alumina, acima de 2,0% independentemente da faixa granulométrica.

3 – A sílica na mistura de minérios (*sinter feed* base + fonte adicionada) foi de 3,76% em média, sendo que as adições de sílica nas frações nucleantes, intermediárias e aderentes representaram 35% da sílica total desta mistura.

4 – A sílica nas três fontes apresentou-se na forma de quartzo. Em cada uma destas fontes apresentou diferentes características mineralógicas e microestruturais. Foi possível

---

---

definir uma classificação para os tipos de sílica de cada fonte, baseada no grau de liberação e no tipo de partícula (liberada monocristalina, liberada policristalina e mista):

- Itabirito compacto: A fração nucleante desta fonte possui 31% de quartzo e 69% de hematita, sendo que, 89% do quartzo é do tipo policristalino e 11% do tipo monocristalino. O grau de liberação das partículas é de 25% e tamanho médio de cristal do quartzo é de 0,29 mm. A sua fração intermediária apresentou 30% de quartzo e 70% de hematita, sendo 62% do quartzo do tipo monocristalino e 38% policristalino, com 89% de grau de liberação das partículas. O tamanho médio de cristal do quartzo é de 0,34 mm. Na fração aderente o quartzo chegou a 46% e a hematita a 54%, com mais de 96% do tipo monocristalino e 4% do quartzo do tipo policristalino, com um grau de liberação de 80% e tamanho médio de cristal de quartzo de 0,10 mm. A sílica desta fonte somente pôde ser classificada como do tipo sílica mista (SM) na fração nucleante. Nas frações aderentes e intermediárias o resultado do grau de liberação sugere uma sílica do tipo liberada monocristalina (SLM), podendo esta mudança de característica ser explicada pelo processo de degradação/cominuição.
- Rejeito de jigüe: Para as três frações granulométricas (nucleante, intermediária e aderente) o grau de liberação ficou acima de 86%, chegando a 100% nas frações aderentes e intermediárias. A fração nucleante possui 74% de quartzo e 26% de hematita, sendo 78% do quartzo do tipo monocristalino e 22% policristalino, com tamanho médio de cristal de 0,73 mm. A fração intermediária contém 51% de quartzo e 49% de hematita, sendo 92% do quartzo do tipo monocristalino e 8% policristalino, com tamanho médio de cristal de quartzo de 0,45mm. A fração aderente apresentou 39% de quartzo e 61% de hematita, sendo 100% do quartzo do tipo monocristalino com tamanho médio de cristal de 0,10 mm. A sílica desta fonte foi classificada como do tipo sílica liberada monocristalina (SLM).



- 
- 
- Quartzito: Nas três frações granulométricas esta fonte possui praticamente 100% de quartzo, com grau de liberação de 100%. Na fração nucleante o quartzo é 96% do tipo policristalino e 4% monocristalino, com tamanho médio de cristal de 0,43 mm. A fração intermediária possui 70% do quartzo do tipo policristalino e 30% monocristalino, com tamanho médio de cristal de 0,28mm. Na fração aderente 56% do quartzo é do tipo policristalino e 44% monocristalino, com tamanho médio de cristal de 0,09mm. A sílica desta fonte foi classificada como do tipo liberada policristalina (SLP).
  - A fração aderente para as três fontes é a que apresenta os menores valores de tamanho médio de cristal do quartzo, aproximadamente 0,10mm.

5 – A variação da sílica no sinter produto ficou entre 4,15% e 4,49% e da basicidade binária entre 1,72 e 1,77. Os resultados de granulometria dos sínteres também foram bastante estáveis, sendo que o tamanho médio de suas partículas variou de 25,99 mm a 22,99 mm.

6 – Existe pouca influência do tipo da sílica e de sua proporção nas frações aderentes, intermediárias e nucleantes do *sinter feed* nas características químicas e granulométricas dos sínteres produzidos em escala piloto.

7 – Os sínteres produzidos apresentaram em média a seguinte composição mineralógica (% em área, avaliação em microscopia ótica): 40% de hematita, 32% de magnetita, 20% de ferritos, 6% de silicatos, 1,5% de calcário residual e 0,5% de quartzo residual.

8 – Para uma mesma fração granulométrica a fonte de sílica itabirito compacto foi a que sempre proporcionou um maior percentual de silicatos nos sínteres e por outro lado a fonte rejeito de jigge contribuiu para os menores níveis de silicato numa mesma fração.

9 – Os resultados de qualidade física e metalúrgica dos sínteres se mostraram bastante influenciáveis pelas diferentes características intrínsecas da sílica e/ou pela sua distribuição nas diferentes frações granulométricas do *sinter feed*:

- 
- A sílica na fração aderente contribuiu para uma melhor resistência ao tamboramento do sinter. No caso do ensaio de queda, observou-se uma tendência de redução nos resultados nas frações aderentes, excetuando-se a sílica liberada policristalina (SLP).
  - A fonte de sílica itabirito compacto foi a que menos contribuiu para uma melhor resistência ao tamboramento do sinter. A fração intermediária para esta fonte de sílica foi a que apresentou o menor patamar de resistência ao tamboramento e o segundo menor resultado no ensaio de queda, sendo que o menor resultado apresentado foi na fração aderente da mesma. Esta menor resistência do sinter com adição da fonte de sílica itabirito compacto pode ser explicada em função do maior percentual de hematita (64% em média) em relação ao quartzo (36% em média) em praticamente todas as frações granulométricas, sugerindo uma melhor distribuição da sílica, favorecendo a formação dos silicatos de cálcio o que pode inibir a formação dos ferritos necessários para conferir uma boa resistência física ao sinter produto. O rejeito de jigue foi que propiciou os melhores níveis de resistência ao tamboramento independentemente da sua fração.
  - Os resultados de RDI dos sínteres apresentaram seus mais baixos valores (melhores valores) com o aumento da proporção de sílica na fração aderente.
  - A sílica liberada monocristalina (SLM) propiciou, praticamente para todas as faixas granulométricas, o maior nível de RDI dos sínteres (pior valor). Entretanto, isto pode ter sido influenciado pelo maior teor de alumina da fonte (porcentagem de alumina no rejeito de jigue).
  - Quanto a redutibilidade dos sínteres, os melhores resultados foram os obtidos com a sílica liberada policristalina (SLP), além de serem os mais estáveis entre suas frações granulométricas.
  - Comparando-se os resultados de redutibilidade dos sínteres entre as fontes rejeito de jigue e a fonte itabirito compacto, há uma inversão de tendências,

---

---

a sílica liberada monocristalina propicia melhor redutibilidade na fração aderente (72,3%), e a sílica mista propicia melhor resultado na fração nucleante (71,9%).

10 – As variáveis de processo produtividade e consumo de combustível da sinterização (escala piloto) foram influenciadas pelas diferentes características intrínsecas da sílica e/ou pela sua distribuição nas diferentes frações do *sinter feed*:

- Existe uma forte tendência da sílica na fração nucleante contribuir para melhoria dos níveis de produtividade na sinterização quando comparada com a sílica nas demais frações.
- A fonte de sílica itabirito compacto contribuiu para os melhores níveis de produtividade.
- O consumo de combustível atingiu os seus mais baixos níveis para a sílica na fração nucleante.
- Com relação às fontes de sílica, existe tendência de um menor consumo de combustível para o rejeito de jigue, exceto quando na fração aderente.

Os resultados obtidos neste trabalho permitem concluir que o conhecimento prévio dos atributos intrínsecos da sílica da mistura de minérios a sinterizar, que são definidos a partir do *ROM* e das rotas de processo estabelecidas no beneficiamento do *sinter feed*, contribuem para um melhor aproveitamento dos recursos minerais, otimização dos parâmetros de processo da sinterização e das propriedades físicas e metalúrgicas do sinter produzido.

---

---

## 7. Referências Bibliográficas

ARAÚJO FILHO, G. M., TORRES, B., SESHADRI, V. Caracterização de misturas para sinterização. *Metalurgia – ABM*, v.42, n.338, p. 19-23,1986.

AZEVEDO, M. A. Sinterização a coque. In: ABM (Ed.) *Cursos sobre matérias primas – Aglomeração e operação de altos fornos*. São Paulo: ABM, 1989 p. 59-97.

CAPORALI, L. et alii. Relação microestrutura – propriedades – desempenho de minérios de ferro na sinterização, In: *SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO*, 29, 1998. Belo Horizonte. Anais...São Paulo: ABM, 1998, p. 701 a 717.

COELHO, L. H. *Rendimento na Sinterização em Função da Mineralogia do Sinter feed*. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, 2002. 154p. Dissertação de Mestrado.

GROSS, G. A. *Geology of iron deposits in Canada.: General Geology and Evaluation of Iron Deposits*. Geological Survey of Canada, V.1. Economic Geology Report, 22, 1965. 181p.

HSIEH, L., WHITEMAN, J. A. Effect of raw materials composition on the mineral phases in lime-fluxed iron ore sinter. *ISIJ International*, v. 33, n.4, p. 462-473, 1993.

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

JAMES, H.L. Sedimentary facies of iron formation. *Econ. Geol.*, V.49. p.235 – 293, 1954.

NOGUEIRA, P. R. S. M. Relação entre características das frações grossas do minério e produtividade e qualidade do sinter. Belo Horizonte: CPGEM/EEUFMG, 1987. 190p. (Dissertação de Mestrado).

PADOVEZI, A. D.; FERREIRA, A. D.; QUEIROZ, L. A. *Beneficiamento de Minério de Ferro – A Importância da Análise Química e Mineralogia na Definição e Melhoria de Rotas*

---

---

de Processo. Seminário de Caracterização de Ferrosos na CVRD: Práticas, Aplicações e Relevância. 2003

PENA, E. Q. e FRANCO, P. C. F. Teoria e Prática de Sinterização. Ouro Branco, 1989.

PIMENTA, H., SESHADRI, V. Influence of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and TiO<sub>2</sub> on reduction degradation behaviour of sinter and hematite at low temperatures. Ironmaking and Steelmaking, v. 29, n.3, p. 175-179, 2002.

ROSIÈRE, C. A. et alii. Classificação genética de minérios de ferro – problemas e vícios – Proposta de uma classificação tipológica para indústria. In: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO, 28, 1997. Vitória. Anais...São Paulo: ABM, 1997, p.295 – 302.

ROSIÈRE, C. A. Um modelo para evolução microestrutural de minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero. Parte II – Trama, textura e anisotropia de susceptibilidade magnética. Geonomos, v.4, n.1, p. 61-75, 1996.

ROSIÈRE, C. A. A recristalização do minério de ferro da jazida do Pico do Itabirito no Quadrilátero Ferrífero e suas implicações genéticas. In: II Simpósio de Geologia de Minas Gerais, 1983, Belo Horizonte. Boletim da SBG - Núcleo Minas Gerais. Belo Horizonte: SBG - MG, 1983. v. 3. p. 173-186.

ROSIÈRE, C. A. ; SESHADRI, V.; QUADE, H.; LAGOEIRO, L. ; VIEIRA, C. B. Geological characteristics of iron ores from the Quadrilátero Ferrífero. In: 1st International Meeting on Ironmaking, 2001, Belo Horizonte. Anais. São Paulo : ABM, 2001. p. 273-280.

ROSIÈRE, C. A.; CHEMALE Jr. F.; QUADE, H.; SIEMES, H.; FISCHER, D. P.; SOUZA, E. M. R. Análise microestrutural dos minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero - texturas desenvolvidas e um modelo para sua origem.. In: Workshop Geologia Estrutural dos Minérios de Ferro., 1993, Belo Horizonte. Boletim SBG Núcleo Minas Gerais. Belo Horizonte : SBG, 1993. v. 12. p. 362-366.

SATO, S. et alii. Melting model for iron ore sintering. Transaction ISIJ, v. 26, p. 282-290, 1986.

---

TAKEHARA, L. Caracterização Geometalúrgica dos Principais Minérios de Ferro Brasileiros – Fração *Sinter feed*: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geociências, 2004. 362p. Dissertação de Mestrado.

VIEIRA, C. B. et alii. Geometallurgical approach for quality control of iron ores for agglomeration in iron and steel industry. In: International Symposium On Beneficiation, Agglomeration And Environment – ISBAN,1999, Bhuvaneshwar, Índia. Proceedings...Bhuvaneshwar, p.3-10.1999.

VIEIRA, C. B., ROSIÉRE, C. A., PENA, Q. E., SESHADRI, V., ASSIS, P. A. Avaliação Técnica de Minérios de Ferro para Sinterização nas Siderúrgicas e Minerações Brasileiras: uma análise crítica, In: REM, Revista da Escola de Minas, Metalurgia & Materiais, Ouro Preto, p 97-102. Abril-jun 2003.

VIEIRA, C. B., PENA, E. Q. Fundamentos do Processo Industrial De Sinterização de Minérios de Ferro. DEMET – EM. UFOP. 2008, 36 p.

[www.vale.com/vale/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?sid=266](http://www.vale.com/vale/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?sid=266), Minério de ferro e pelotas, pesquisado em 02/04/2009 11:35hs.



## ANEXO

<b>Responsável Técnico: José Augusto Ferreira GADET- GEDET - DITM</b>	<b>Código de Treinamento: N/A</b>
<b>Público-alvo: Técnicos de Sinterização, Laboratoristas.</b>	<b>Palavras-chave: Matérias-Primas, fundentes, insumos.</b>

**1. OBJETIVO:**

Estabelece procedimentos e orientações para preparação de matérias-primas na planta piloto de sinterização.

**2. APLICAÇÃO:**

Planta piloto de sinterização.

**3. RECURSOS NECESSÁRIOS:**

Pá, vassoura, tambor de 200 litros, recipiente com volume e peso conhecido, baldes de 20 litros, calculadora, balança de precisão, estufa, computador, sacolas plásticas, etiquetas, peneiras, talha, peneirador Denver.

**4. CUIDADOS ESPECIAIS:**

**4.1 CUIDADOS COM SEGURANÇA**

- Utilizar máscara e protetor auricular tipo concha.
- Manter postura correta ao levantar pesos.
- Atenção no transporte de cargas, mantendo-as o mais próximo possível do chão.
- Utilizar luvas de raspa, para evitar queimaduras.

**4.1.1 CUIDADOS COM O MEIO-AMBIENTE**

- Geração de resíduos sólidos não contaminados, minério fino.

Descarte em caçambas de minérios.

- Geração de resíduos sólidos não contaminados (papel, plástico).

Coletores padronizados.



## 5. PREPARAÇÃO DE MATÉRIAS PRIMAS.

5.1. Receber o plano de trabalho que estabelece as condições operacionais.

5.2 Separar e pesar cada matéria-prima, e anotar os valores no banco de dados da sinterização.

### 5.3. HOMOGENEIZAR E RETIRAR UMIDADE DAS AMOSTRAS.

PASSOS	PROCEDIMENTO	DESVIOS	AÇÕES NECESSÁRIAS
5.3.1	Virar o material a ser preparado no chão e homogeneizá-lo dando três tombos na pilha, com auxílio de pá ou mini-pá (BOB-CAT) e em seguida abri-la, formando um canteiro.	Contaminação do material	Virar o material em local previamente limpo
5.3.2	Coletar uma alíquota de 1,2 kg em diferentes pontos do canteiro para determinação de umidade de minérios e fundentes. <b>No caso de combustíveis, retirar uma alíquota de 0,6 kg.</b>		
5.3.3	Pesar alíquotas e anotar o peso inicial (PI). Colocar o material em um recipiente adequado e levar à estufa durante 3 horas em uma temperatura de $100^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$	Pesagem errada	Zerar a balança antes de iniciar a pesagem
5.3.4	Retirar o material da estufa e deixar esfriar. Pesar o material seco (PF).		
5.3.5	Calcular a umidade através da fórmula abaixo: $U = (PI - PF) * 100 / 100$ <i>Sendo: U = Umidade do material ( % )</i>		
5.3.6	Registrar os resultados de umidade de todas as matérias-primas no banco de dados da sinterização	Erro de lançamento	Confirmar os dados antes de executar o balanço

### 6. DETERMINAR DENSIDADE A GRANEL DO SINTER FEED OU PELET FEED.

PASSOS	PROCEDIMENTO	DESVIOS	AÇÕES NECESSÁRIAS
6.1	Tarar o recipiente e nivelar a superfície da amostra com a borda do mesmo. Pesar todo o conjunto e repetir todo o processo três vezes.	Variações brusca de densidade	Repetir o processo a fim de obter o mínimo de variação possível
6.1.1	Calcular a média aritmética das três pesagens, em seguida, calcular a densidade a granel, descontando a umidade e dividindo a massa pelo volume do recipiente.		
6.1.2	Lançar os resultados no banco de dados da sinterização, em g/cm <sup>3</sup> .		

**7. HOMOGENIZAÇÃO E COMPOSIÇÃO DE MATÉRIAS-PRIMAS POR FAIXA GRANULOMÉTRICA.**

PASSOS	PROCEDIMENTO	DESVIOS	AÇÕES NECESSÁRIAS
7.1	Repetir os passos 7.1.		
7.1.1	Receber amostra e confirmar faixas granulométricas	Material fora de faixa granulométrica desejada	Preparar a amostra de acordo com tabela de especificação de faixas granulométrica de insumos, (utilizar britador de rolos)
7.1.2	<b>ESPECIFICAÇÃO DE FAIXAS GRANULOMÉTRICA</b>		
	MATÉRIAS PRIMAS	FAIXAS GRANULOMETRICAS (mm)	LIMITAÇÕES (%)
	COQUE	< 3,360; > 0,500; <0,105.	80% Mínimo e 15% Máximo
	CALCARIO	< 3,360; > 0,149; <0,149.	90% Mínimo e 10% Máximo
	CAL VIRGEM	< 3,360; > 1,00; <0,105.	30% Mínimo e 20% Máximo
DUNITO	<2,00; >0,149; <0,149.	75% Mínimo e 25% Máximo	

<b>8. PREPARAÇÃO DE MATERIAS-PRIMAS PARA QUÍMICA E GRANULOMETRIA.</b>				
<b>PASSOS</b>	<b>PROCEDIMENTO</b>	<b>DESVIOS</b>	<b>AÇÕES NECESSÁRIAS</b>	
8.1	Abrir a pilha de minérios em forma de leito com $\pm 10,0$ cm de altura, amostrar por pontos e quarterar utilizando quarterador de cruzeta ou rifle.			
8.1.1	Levar amostra à estufa por 4 horas em uma temperatura de 105°C.			
8.1.2	Retirar amostra da estufa e deixar esfriar.			
8.1.3	Enviar amostra de matérias-primas para química devidamente identificada		Protocolar toda amostra enviada para química.	
8.1.4	Pesar amostras de matérias-primas para granulometria, de acordo com tabela abaixo.			
<b>TABELA PARA EXECUÇÃO DE GRANULOMETRIA</b>				
<b>AMOSTRA</b>	<b>PESO (Kg)</b>	<b>V/P (g)</b>	<b>GRAN. SECO TEMPO (min)</b>	<b>GRAN. UMIDO TEMPO (min)</b>
MIN.FERRO	2100	7/3	10	20
MANGANÊS	2100	7/3	10	20
NÍQUEL	1200	4/3	10	20
RETORNO	600	3/2	10	20
CALCÁRIO	1200	4/3	10	20
DUNITO	1200	4/3	10	20
ESCÓRIA	600	3/2	10	20
CAL	600	3/2	10	20
CARV.VEGETAL	600	3/2	10	20
COQUE	600	3/2	10	20

## 9. ANÁLISE GRANULOMETRICA

PASSOS	PROCEDIMENTO	DESVIOS	AÇÕES NECESSÁRIAS
9.1.1	Montar as peneiras 9,525mm \ 6,35 \ 4,76 \ 3,36 \ 2,00 \ 1,00 \ 0,707 \ 0,500 \ 0,250 \ 0,210 \ 0,149 \ 0,125 \ 0,105 \ 0,074 \ 0,063mm, e realizar granulometria de acordo com valores e condições citados no item 10.1.2 (tabela)	Falha no peneiramento	Repetir todo o procedimento de peneiramento
9.1.2	Após Peneiramento, pesar o material retido em cada peneira.	Misturar faixas peneiradas	Voltar cada fração separada pela granulometria a seco para sua respectiva peneira, e executar o peneiramento a úmido de acordo com item (tabela)
9.1.3	Calcular a % retida em cada peneira usando a fórmula: $\% \text{RETIDO} = \frac{PRPi}{PT} \cdot 100$ <p><i>SENDO: PRPi = Peso do material retido na peneira</i>  <i>PT = Peso total.</i></p>		
9.1.4	Repetir o cálculo para todas as peneiras.	Erro de cálculo	Ter atenção e repetir todo o cálculo se necessário
9.1.5	Calcular a % acumulada em cada peneira, certificando que o fechamento deu 100%.		
9.1.6	Levar o material descarregado em recipiente adequado a estufa aquecida a 105°C por 4 horas.	queimaduras	Utilizar luvas de raspas.
9.1.7	Retirar o material da estufa e aguardar esfriar		
9.1.8	Lançar os resultados das análises granulométricas a seco e a úmido no banco de dados da sinterização.	Erro de cálculo e lançamento	Confirmar todos os dados antes de lançar
9.1.9	Repetir os passos 11.1.5 a 11.1.10 em todas as amostras geradas.		

**10. COMPOR AMOSTRAS P/ CARACTERIZAÇÃO MICRO ESTRUTURAL E QUÍMICA POR FAIXA GRANULOMETRICA.**

PASSOS	PROCEDIMENTO	DESVIOS	AÇÕES NECESSÁRIAS								
10.1	Para enviar amostras para química preparar material retido nas peneiras >6,35mm \ <6,35mm >1,00mm \ <1,00>0,500mm \ >0,500 >0,149mm \ <0,149mm	Entregar a identificação	Ensacolar, identificar e enviar para análise química.								
<table border="1"> <thead> <tr> <th>ENSAIO</th> <th>FAIXA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Microscopia eletrônica ( M.E.V)</td> <td>&lt;0,250 &gt;0,125mm \ &lt;0,125 &gt;0,063mm.</td> </tr> <tr> <td>Porosidade</td> <td>&lt;3,360 &gt;1,00mm.</td> </tr> <tr> <td>Mineralogia</td> <td>&gt;9,525 &lt;0,063mm.</td> </tr> </tbody> </table>				ENSAIO	FAIXA	Microscopia eletrônica ( M.E.V)	<0,250 >0,125mm \ <0,125 >0,063mm.	Porosidade	<3,360 >1,00mm.	Mineralogia	>9,525 <0,063mm.
ENSAIO	FAIXA										
Microscopia eletrônica ( M.E.V)	<0,250 >0,125mm \ <0,125 >0,063mm.										
Porosidade	<3,360 >1,00mm.										
Mineralogia	>9,525 <0,063mm.										
10.1.1	Identificar amostras e enviar para metalografia	Entrega e identificação	Ensacolar, identificar e enviar para análise química.								
10.1.2	Ensacar, pesar e estocar amostras em tambores de 200 litros.	Falta de identificação	Identificar todo tambor disponibilizado para estocagem de material.								
10.1.3	Cadastrar no banco de dados e enviar para arquivo.	Não cadastro	Todo material a ser arquivado, deve ser prévia mente cadastrado no banco de dados da sinterização.								

## 11. OBSERVAÇÕES.

PASSOS	PROCEDIMENTO	DESVIOS	AÇÕES NECESSÁRIAS
11.1	No caso da preparação de cal virgem deve-se tomar o máximo de cuidado para evitar a hidratação da mesma.	Hidratação da cal virgem.	Após a homogeneização do material, ensacar a mesma para evitar que a mesma absorva umidade.
11.2	As granulometrias são realizadas de acordo com o item 11, sendo realizado primeiro a seco, pesando, lançando resultado no banco de dados sinterização, sem misturar as faixas. Em seguida devolver a amostra para peneira de onde foi descarregada e executar novamente o peneiramento por mais 20 min. a úmido.		
11.3	Para Coque e carvão vegetal a granulometria deve ser executada a seco	Realizar a úmido pode segar a malha da mesma	Seguir a observação do passo 13.2.1.

## 5. EXECUÇÃO DE QUEIMAS DE RETORNO.

5.1. Receber o plano de trabalho que estabelece as condições operacionais.

5.2 Separar e pesar cada matéria-prima.

### 5.3. DETERMINAR UMIDADE.

PASSOS	PROCEDIMENTO	DESVIOS	AÇÕES NECESSÁRIAS
5.3.1	Virar o material a ser preparado no chão.	Contaminação do material	Varrer o local onde irá preparar a amostra.
5.3.2	Homogeneizar o material dando três tombos na pilha e em seguida abri-la, formando um canteiro.	Material mal homogeneizado	Se necessário, dar mais tombos na pilha de minérios.
5.3.3	Coletar uma alíquota de 1,2 kg em diferentes pontos do canteiro.		
5.3.4	Pesar alíquotas e anotar o peso inicial (PI).	Falta de identificação	Anotar os dados dos materiais corretamente
5.3.5	Colocar o material em um recipiente adequado e levar à estufa durante 3 horas em uma temperatura de $100^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$	Tempo insuficiente	Se necessário deixar o material por mais 01 hora na estufa
5.3.6	Retirar o material da estufa e deixar esfriar.		
5.3.7	Pesar o material seco (PF).		
5.3.8	Calcular a umidade através da fórmula abaixo: $U = \frac{PI - PF}{PI} \cdot 100$ Sendo: U = Umidade do material (%)		
5.3.9	Registrar os resultados de umidade de todas as matérias-primas no banco de dados da sinterização.		

### 6. COMPOR A MISTURA DE MINÉRIOS.

PASSOS	PROCEDIMENTO	DESVIOS	AÇÕES NECESSÁRIAS
6.1	Lançar os dados da mistura a ser composto na planilha de composição de misturas (Anexo A) - nome do minério, umidade, porcentagem de cada minério e o peso seco total. Os percentuais de cada minério serão estipulados no programa de trabalho.	Lançar valores errados	Após lançamento, conferir se os pesos estão corretos
6.1.1	Com a planilha de composição de misturas em mãos, iniciar a pesagem dos minérios.	Peso incorreto	Descartar a mistura e pesar novamente

6.1.2	Após pesagem, virar os minérios no chão e misturá-los com pá, virando a mistura de 04 a 05 vezes ou até que ela fique completamente homogênea.		
6.1.3	Retirar uma amostra para checagem da umidade, conforme item 7, ensacar a mistura e estocar em tambores.	Falta de identificação do tambor	Identificar o tambor e lançar no BD da sinterização
<b>7. CRIAR INSTRUÇÃO DE QUEIMA ( IQ ), À PARTIR DO PLANO DE TRABALHO E ORDEM DE SERVIÇO.</b>			
<b>PASSOS</b>	<b>PROCEDIMENTO</b>	<b>DESVIOS</b>	<b>AÇÕES NECESSÁRIAS</b>
7.1	Criar Instrução de Queima (IQ), para cada mistura, conforme solicitado no programa de trabalho a partir do cálculo de carga fornecido pelo pesquisador, no banco de dados do supervisorio Wizcon 9.2.	Entrada de dados errados	Após lançamento, conferir se os dados estão corretos.
7.1.2	Abriu o software sinter DB, entrar com usuário e senha		
<b>7.2. SELECIONAR OU CADASTRAR UMA ORDEM DE SERVIÇO (OS).</b>			
<b>PASSOS</b>	<b>PROCEDIMENTO</b>	<b>DESVIOS</b>	<b>AÇÕES NECESSÁRIAS</b>
7.2.1	Clicar no botão Nova OS ou Copiar e preencher os dados solicitados. O sistema irá gerar um número sequencial que deverá ser conferido.	Entrada de dados errados	Após lançamento, conferir se os dados estão corretos.
7.2.2	Salvar e sair		
<b>7.3. SELECIONAR OU CADASTRAR UMA INSTRUÇÃO DE QUEIMA (IQ).</b>			
<b>PASSOS</b>	<b>PROCEDIMENTO</b>	<b>DESVIOS</b>	<b>AÇÕES NECESSÁRIAS</b>
7.3.1	Selecionar a OS.		
7.3.2	Clicar no botão Nova IQ ou Copiar e preencher os dados solicitados. O sistema irá gerar um número sequencial que deverá ser conferido.	Entrada de dados errados	Após lançamento, conferir se os dados estão corretos
7.3.3	Salvar e sair.		
<b>7.4. SELECIONAR OU CADASTRAR UMA QUEIMA (NQ).</b>			
<b>PASSOS</b>	<b>PROCEDIMENTO</b>	<b>DESVIOS</b>	<b>AÇÕES NECESSÁRIAS</b>
7.4.1	Selecionar a OS e IQ		
7.4.1	Clicar no botão Nova NQ e preencher os dados solicitados. O sistema irá gerar um número sequencial que deverá ser conferido.	Entrada de dados errados	Após lançamento, conferir se os dados estão corretos.
7.4.3	Caso necessite alterar umidade ou combustível dentro da mesma IQ, a opção Nova Ficha deverá estar selecionada antes de salvar.		



7.4.4	Salvar e sair.		
7.4.5	Entrar com as instruções operacionais na tela principal.	Entrada de dados errados	Após lançamento, conferir se os dados estão corretos.
7.4.6	Salvar e imprimir ficha vazia, clicando nos botões Salvar e Relatórios, respectivamente.		

## 8. MISTURAR MATERIAIS.

PASSOS	PROCEDIMENTO	DESVIOS	AÇÕES NECESSÁRIAS
8.1	Determinar umidade da mistura de minérios, fundentes e combustível (Conforme Item 7).		
8.2	Colocar a mistura de minérios necessária no misturador, conforme cálculo de carga.	Peso incorreto	Descartar a mistura e pesar novamente
8.3	Adicionar fundentes, combustível.		
8.4	Ligar o misturador.		
8.5	Adicionar água conforme ficha de execução.		
8.6	O tempo de mistura varia conforme plano de ação.		
8.7	Abrir válvulas de ar e GLP manualmente.	Falta de ar ou gás na linha	Checar se as baterias de GLP estão carregadas ou se os compressores de ar estão funcionando
9	Digitar o número da IQ e da NQ no Menu Principal do sistema Wizcon 9.2 (atalho denominado sinter).		
9.1	Ligar máquina de sinterização clicando no botão Iniciar Processo.	Equipamentos não ligam	Acionar a manutenção
9.1.1	O botão supra citado verifica a validade dos números digitados e dá partida na ventoinha, exaustores, ignição (chama piloto) e PID (chama principal e depressão).		

## 10. CARREGAMENTO DA PAINELA.

PASSOS	PROCEDIMENTO	DESVIOS	AÇÕES NECESSÁRIAS
10.1	Colocar 03 kg de bedding para forramento da grelha (<19,0>10mm), medir a altura e verificar a regulagem do braço do queimador (550 ou 700mm).		
10.2	Descarregar o misturador no silo ou conforme plano de trabalho.		
10.3	Pesar a mistura, e conferir peso conforme ficha de execução (Peso preparado).		
10.4	Com o auxílio da talha levantar o silo e posicioná-lo acima da painela de sinterização que deverá estar em cima da caixa de vento.		
10.5	Abrir o fundo falso do silo.		
10.6	Nivelar a mistura seguindo a borda da painela de sinterização.	Falta de material	Descartar a mistura e aumentar o peso p/ a próxima.
10.7	Colocar os termopares 14, 15, 16 no meio da painela e 12 no topo.		
11	Pesar sobra da mistura no silo, para determinar o peso carregado na painela de sinterização e coletar amostra para determinação de umidade conforme item 7.4 a 7.8.		
12	Na tela de vista geral, aguardar atingir temperatura conforme plano de ação.		
13	Abaixar a escotilha de proteção do cachimbo.		
14	Liberar avanço do braço, através do botão Operação ( opção Liga ), após confirmação da colocação da painela e temperatura mínima alcançada - T4.		
15	O braço do queimador avançará até a painela com a mistura, quando a temp. Atingir o valor desejado (ver plano de trabalho) e permanecerá durante tempo determinado.		
16	O término da queima será quando a temperatura da caixa de vento atingir 80° C desligando automaticamente, e o Wizcon exibir a mensagem <b>Queima Finalizada</b> . Medir a contração do bolo usando uma régua, em cinco pontos diferentes e usar a média. Lançar os dados solicitados na planilha de acompanhamento de queimas ( <b>Anexo B</b> ).		

<b>17. DESCARREGAMENTO DA PAINELA.</b>			
<b>PASSOS</b>	<b>PROCEDIMENTO</b>	<b>DESVIOS</b>	<b>AÇÕES NECESSÁRIAS</b>
17.1	Retirar os termopares.		
17.2	Utilizando a talha p/ descarregar a painela direta no tambor ASTM.	Risco de queda da painela	Atenção durante descarregamento da painela
18	Regular o tambor para 100 voltas para quebra do bolo de sinter.	Regulagem do nº de voltas erradas	Conferir a regulagem antes de iniciar a quebra do bolo
19	Descarregar o tambor em recipiente adequado.		
20	Utilizando a talha, descarregar o sinter no alimentador do peneirador circular.		
21	Ligar o peneirador e o alimentador.		
22	Os equipamentos ficarão funcionando até acabar o material.		
23	Retirar o alimentador.		
24	Retirar a fração >10,00mm		
25	Posicionar outro balde e repassar a fração >5,00mm, para uma maior eficiência do peneiramento.		
26	Pesar as frações >10,00 >5,00 e <5,00mm.	Peso incorreto	Tarar a balde antes da pesagem
27	Registrar os valores na ficha de queima.		
28	<p>Calcular o balanço de massa conforme a fórmula abaixo:</p> $\frac{M.F.}{M.T.B.} \cdot 100 = B.M.R$ <p>Onde: <b>M.F.</b>= Massa do fino (&lt;5,00mm)</p> <p><b>M.T.B.</b> = Massa total do bolo</p> <p><b>B.M.R.</b> = Balanço de massa do retorno</p>		
29	Se necessário, ajustar o combustível para acertar o balanço de retorno para 40 a 47%.		

<b>30. PREPARAÇÃO DO SINTER.</b>				
<b>PASSOS</b>	<b>PROCEDIMENTO</b>	<b>DESVIOS</b>	<b>AÇÕES NECESSÁRIAS</b>	
30.1	Após realizadas todas as queimas, regular a abertura dos rolos em aproximad. 2,7 a 3,0mm e britar todas as frações >10,00mm e >5,00mm, peneirar e incorporar no fino <5,00mm.	Material fora da faixa especificada.	Britar novamente até que todo material passe na malha de 5,0 mm.	
30.2	Homogeneizar o material com pá, dando 4 a 5 tombos.			
30.3	Abrir o material em leito com +/- 10 cm de espessura.			
30.4	Amostrar por pontos em forma de X.			
30.5	Quartear amostra em quarteador tipo cruzeta ou rifles.			
30.6	Quartear novamente a amostra no quateador rifle, para retirada de amostra para química e granulometria. Sendo 1,2kg para granulometria e 2 de 100g para química, deixando uma de reserva.			
<b>31. DETERMINAR GRANULOMETRIA A SECO.</b>				
<b>PASSOS</b>	<b>PROCEDIMENTO</b>	<b>DESVIOS</b>	<b>AÇÕES NECESSÁRIAS</b>	
31.1	Montar as peneiras 5,00 \ 3,36 \ 1,00 e 0,500 mm.	Peneiras fora da sequência.	Conferir a sequência correta das peneiras.	
31.2	Pesar alíquota de 600g (base seca).			
31.3	Peneirar o material durante 10 minutos.			
31.4	Pesar o material retido em cada peneira, lançar em planilha própria, certificando-se que o material fique o mais próximo possível da distribuição a seguir:	Distribuição fora da especificação.	Comunicar ao responsável pela área.	
	<b><i>Faixa ( mm )</i></b>			<b><i>Distribuição ( % )</i></b>
	<b><i>&lt;5,00&gt;3,36</i></b>			<b><i>10 a 15</i></b>
	<b><i>&lt;3,36&gt;1,00</i></b>			<b><i>40 a 50</i></b>
	<b><i>&lt;1,00&gt;0,50</i></b>			<b><i>10 a 15</i></b>
	<b><i>&lt;0,50</i></b>	<b><i>20 a 40</i></b>		
31.5	Ensacar o restante do material e arquivar em Recipiente adequado, devidamente identificado.			

**32. EXECUÇÃO DE QUEIMAS UMIDADE ÓTIMA.**

PASSOS	PROCEDIMENTO	DESVIOS	AÇÕES NECESSÁRIAS
32.1	Seguir os itens 5.1 a 8.4	Idem	Idem
32.2	Realizar as queimas conforme os itens 7 a 27. A umidade da 1ª queima deve ser ajustada visualmente, pela experiência do operador.		
32.3	Calcular o balanço de massa conforme a fórmula abaixo: <b><math>BMR = M.umidaC / M.umida.P \times R.F.S \text{ carregado} = Y</math></b> <b><math>BMR = Y / R.F.S \text{ gerado} \times 100 \leq 2,0\%</math></b> <b>Onde... M.C= Mistura carregada</b> <b>M.P= Mistura preparada</b> <b>R.F.S= Retorno fino de sinterização</b>		
32.4	Após acertar o balanço de retorno, variar o percentual de umidade de 0,5 em 0,5% para cima e ou para baixo, verificando a produtividade (t/m <sup>2</sup> /24 h) e o consumo de combustível (kg/t sinter). (Obs: Uma vez acertado o balanço de retorno não variar novamente o combustível)		
32.5	Quando se observar a queda da produtividade, parar as queimas e realizar o tamboramento de acordo com o item 37 a 37.4, p/ verificar a resistência dos sinteres gerados.		
32.6	Os dados de produtividade, consumo específico de combustível e resistência mecânica, deverão ser analisados junto ao pesquisador responsável p/ determinação da umidade ótima. A umidade escolhida será utilizada na realização das queimas normais.		

**3. EXECUÇÃO DE QUEIMAS NORMAIS.**

PASSOS	PROCEDIMENTO	DESVIOS	AÇÕES NECESSÁRIAS
33.1	Seguir os passos 5.1 ao 17.2, utilizando a umidade ótima determinada nos itens 32 a 32.6.		
	Quebrar o bolo de sinter dando 50 voltas no tambor ASTM.		
	Seguir os passos 19 a 27		

35.9	Após composição da química e queda, britar o material retido nas peneiras de 40.0 mm.		
36	Repeneirar o produto britado nas peneiras de 5.0-6.3-10.0-12.5-16.0-20.0-25.0 e 35.5 mm.	Idem item 32.1	Idem item 32.1
36.1	Incorporar o material retido em cada peneira nas suas respectivas frações.	Idem item 32.6	Idem item 32.6
36.2	Promover nova pesagem e lançar os pesos encontrados na planilha de COMPOSIÇÃO DE SINTER.	Idem item 32.3	Idem item 32.3
36.3	Promover a composição de duas amostras de 15kg para teste de abrasão (duplicata), RDI ISO 4696-2, IR ISO 7215 e amolecimento e fusão quando solicitado no PT.	Degradação da amostra	Compor a amostra p/ tamboram. Com cuidado p/ evitar degradação da mesma.

### 37. REALIZAR TESTES AO ABRASÃO ISO 4701.

PASSOS	PROCEDIMENTO	DESVIOS	AÇÕES NECESSÁRIAS
37.1	Pesar duas amostras do material preparado conforme o item 29.3 e colocar uma das amostras no tambor de abrasão, fechar e programar o conta giros para 200 voltas e ligar.	Regulagem do nº de voltas erradas	Conferir a regulagem antes de iniciar a quebra do bolo
37.2	Após as 200 voltas abrir o tambor e retirar o material repetindo a operação para a segunda amostra.		
37.3	Montar as peneiras de 0.5-1.0-2.0-5.0-6.3-10.0-12.5-16.0-20.0-25.0 e 31.0mm, e fazer o peneiramento por 10 min.	Idem item 32.1	Idem item 32.1
37.4	Pesar o material retido em cada peneira e lançar os resultados na planilha ENSAIOS DE TAMBORAMENTO, repetindo o mesmo processo para a segunda amostra.	Degradação da amostra	Evitar movimentos bruscos com as peneiras.

### 38. REALIZAR TESTE DE QUEDA (NORMA JIS).

PASSOS	PROCEDIMENTO	DESVIOS	AÇÕES NECESSÁRIAS
38.1	Colocar a amostra de 20 kg na caçamba de carregamento do equipamento de SHATTER TEST e realizar a queda do mesmo.		
38.2	Repetir a operação por 03 vezes, totalizando 04 quedas.		
38.3	Montar as peneiras de 5.0-10.0-12.5-16.0-20.0-25.0-31.5 e 40.0mm, e fazer o peneiramento por 10min.	Idem item 32.1	Idem item 32.1
38.4	Pesar o material retido em cada peneira e lançar os resultados na planilha ENSAIOS DE QUEDA.	Idem item 32.3	Idem item 32.3
38.5	Gerar Relatório Resumo.	Entrada de dados errados	Após lançamento, conferir se os dados estão corretos