

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Dissertação de Mestrado

**“Avaliação em escala piloto do comportamento dos
produtos *pellet feed*, *pellet screenings* e *micro pellet*
em substituição ao *sinter feed*
em uma mistura de sinterização “**

Autor: Helio Cardoso Pereira

Orientador: Prof. Antônio Eduardo Clark Peres

Junho/2004

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Helio Cardoso Pereira

AVALIAÇÃO EM ESCALA PILOTO DO COMPORTAMENTO DOS PRODUTOS
PELLET FEED, *PELLET SCREENINGS* E *MICRO PELLET* EM SUBSTITUIÇÃO AO
SINTER FEED EM UMA MISTURA DE SINTERIZAÇÃO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia
Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais

Área de concentração: Tecnologia Mineral

Orientador: Prof. Antônio Eduardo Clark Peres

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG

2004

DEDICATÓRIA

A minha amada esposa Daniela

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer às seguintes instituições e pessoas:

À SAMARCO MINERAÇÃO S/A, pela oportunidade e pelo apoio irrestrito para a execução desse trabalho.

Ao meu gerente anterior Ricardo Vescovi pela indicação e incentivo para realizar esse trabalho.

Ao meu atual gerente Luiz Ricardo Melo pelo apoio para finalizar esse trabalho.

Ao Professor Antônio Eduardo Clark Peres pela orientação e pela amizade construída ao longo desse trabalho.

Aos colegas do Departamento de Engenharia de Processo, Meschiatti, Philippe, Elton, Gabriel e Sandra, pela preparação e análise das amostras.

A Herta Corradi pela grande ajuda na pesquisa bibliográfica.

Aos Professores Luiz Fernando e Roberto Parreiras pelas sugestões e por aceitarem o convite para participar da banca de defesa da dissertação.

Aos meus pais pelo incentivo e apoio.

A minha esposa Daniela pelo amor, paciência e compreensão pelos finais de semana, feriados e noites que dediquei para realizar esse trabalho.

SUMÁRIO

	DEDICATÓRIA.....	iii
	AGRADECIMENTOS	iv
	SUMÁRIO.....	v
	LISTA DE FIGURAS	vii
	LISTA DE TABELAS.....	xii
	RESUMO	XIV
1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVO.....	4
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1	HISTÓRICO DA SINTERIZAÇÃO	5
3.1.1	PRIMEIROS PASSOS	5
3.1.2	DIFUSÃO DO PROCESSO DE SINTERIZAÇÃO.....	6
3.1.3	DESENVOLVIMENTOS NO PROJETO DO EQUIPAMENTO	7
3.1.4	RESFRIAMENTO DO SÍNTER.....	8
3.1.5	OUTROS EQUIPAMENTOS	9
3.1.6	DESENVOLVIMENTOS NA ENGENHARIA DO PROCESSO	9
3.1.7	QUALIDADE DO SÍNTER.....	14
3.2	UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS NO PROCESSO DE SINTERIZAÇÃO	18
3.3	UTILIZAÇÃO DE FINOS NO PROCESSO DE SINTERIZAÇÃO	21
3.3.1	PROCESSO HPS (HYBRID PELLETIZED SÍNTER)	35
3.4	PRODUÇÃO MUNDIAL DE SÍNTER.....	38
3.5	SUPRIMENTO DE MINÉRIO DE FERRO	43
3.6	MERCADO TRANSOCEÂNICO.....	46
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	49
4.1	PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS	50
4.2	PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS DE SINTERABILIDADE	56
4.2.1	ENSAIOS DE SINTERIZAÇÃO – 1º ETAPA.....	56
4.2.2	ENSAIOS DE SINTERIZAÇÃO – 2ª ETAPA	60
4.3	ENSAIO DE SINTERABILIDADE - PADRÃO USIMINAS.....	63
4.4	TRATAMENTO MECÂNICO E PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS PARA CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E METALÚRGICA DO SÍNTER PILOTO	66
4.5	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E METALÚRGICA DO SÍNTER	69
4.6	ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE GRANULAÇÃO (GI).....	69
4.6.1	CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES	69
4.6.2	DEFINIÇÕES E ABREVIATURAS.....	70
4.6.3	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	70

4.6.4	AMOSTRAGEM E PREPARAÇÃO DA MISTURA	71
4.6.5	ACERTO DA UMIDADE DA AMOSTRA DE 500G	72
4.6.6	ETAPA DE PENEIRAMENTO A	72
4.6.6.1	ETAPA DE PENEIRAMENTO B	73
4.6.7	CÁLCULO DO ÍNDICE DE GRANULAÇÃO MÉTODO USIMINAS (GI ₁).....	74
4.6.8	CÁLCULO DO ÍNDICE DE GRANULAÇÃO MÉTODO NIPPON STEEL CORPORATION (NSC) - (GI ₂).....	74
4.7	ESTUDO DA MICROESTRUTURA	75
5	RESULTADOS	76
5.1	PRIMEIRA ETAPA	76
5.1.1	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DA PRIMEIRA ETAPA.....	85
5.1.1.1	ENSAIOS DE SINTERABILIDADE	85
5.1.1.2	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E METALÚRGICA DO SINTER	86
5.2	SEGUNDA ETAPA	88
5.2.1	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DA SEGUNDA ETAPA.....	94
5.2.1.1	ENSAIOS DE SINTERABILIDADE	94
5.2.1.2	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E METALÚRGICA DO SÍNTER	94
5.3	RESULTADOS DOS ÍNDICES MÉDIOS DE GRANULAÇÃO (GI) E TAMANHOS MÉDIOS DE PARTÍCULAS DE MISTURAS.....	95
5.4	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DOS ÍNDICES DE GRANULAÇÃO DAS MISTURAS (GI), TAMANHOS MÉDIOS DE PARTÍCULAS PRIMÁRIAS E QUASI- PARTÍCULAS	96
6	ESTUDO DA MICROESTRUTURA	98
6.1	INTRODUÇÃO.....	98
6.2	METODOLOGIA.....	99
6.3	ANÁLISE.....	99
6.3.1	HEMATITA	100
6.3.2	MAGNETITA	106
6.3.3	FERRITA DE CÁLCIO, CONTENDO SILÍCIO E ALUMÍNIO (FCSA)	107
6.3.4	FASE SILICÁTICA	112
6.3.5	POROS, FRATURAS E TRINCAS	113
6.3.6	ASPECTOS MICROESTRUTURAIIS E MINERALÓGICOS MARCANTES	116
6.4	CONCLUSÕES.....	119
7	CONCLUSÕES.....	121
7.1	<i>PELLET FEED</i>	121
7.2	<i>PELLET SCREENINGS</i>	121
7.3	<i>MICRO PELLETS</i>	122
8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	123
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	124

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1	DIAGRAMA TEMPO – TEMPERATURA DE UM PROCESSO DE SINTERIZAÇÃO UTILIZANDO (A) UMA MISTURA ÁCIDA E (B) UMA MISTURA BÁSICA.	11
FIGURA 3.2	DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DOS DISPOSITIVOS DE SEGREGAÇÃO DE MISTURAS.....	14
FIGURA 4.1	VISÃO GERAL DAS MATÉRIAS PRIMAS	50
FIGURA 4.2	DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS MISTURAS PARCIAIS NAS DIFERENTES CONDIÇÕES DE TESTE.	59
FIGURA 4.3	DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS MISTURAS PARCIAIS NAS DIFERENTES CONDIÇÕES DE TESTE.	59
FIGURA 4.4	DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS MISTURAS PARCIAIS NAS DIFERENTES CONDIÇÕES DE TESTE.	62
FIGURA 4.5	MISTURADOR.....	62
FIGURA 4.6	MÁQUINA DE SÍNTER	65
FIGURA 4.7	MÁQUINA DE SÍNTER DURANTE A QUEIMA.....	65
FIGURA 4.8	PANELA	66
FIGURA 4.9	ENSAIO <i>SHATTER</i>	67
FIGURA 4.10	FLUXOGRAMA DO TRATAMENTO DO BOLO DE SÍNTER E PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS PARA CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E METALÚRGICA.	68
FIGURA 5.1	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE SINTERABILIDADE NAS DIFERENTES CONDIÇÕES DE TESTE.	79
FIGURA 5.2	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS SÍNTERES NAS DIFERENTES CONDIÇÕES DE TESTE.	80
FIGURA 5.5	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE SINTERABILIDADE NAS DIFERENTES CONDIÇÕES DE TESTE.	90
FIGURA 5.6	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS SÍNTERES NAS DIFERENTES CONDIÇÕES DE TESTE.	91
FIGURA 5.7	TAMANHO MÉDIO DAS QUASI-PARTICULAS (OU MICRO PELOTAS) E PARTÍCULAS PRIMÁRIAS.....	96
FIGURA 5.8	ÍNDICES DE GRANULAÇÃO DAS MISTURAS (GI).	96
FIGURA 6.1	A – GRÃO POLICRISTALINO DE HEMATITA(H) FINA, COM MENOR COALESCIMENTO NAS BORDAS, ONDE SE OBSERVAM HEMATITA NEOFORMADA(HN) E MAGNETITA(MG), ENVOLVENDO PARCIALMENTE O GRÃO; POROS ORIGINADOS DURANTE O PROCESSO DE SINTERIZAÇÃO(P); AMOSTRA A1. MOLR – MICROSCÓPIO ÓPTICO DE LUZ REFLETIDA; APENAS POLARIZADOR (AP). B – GRÃO	

	POLICRISTALINO DE HEMATITA(H) PRESERVADO, ONDE PREDOMINAM CRISTAIS LAMELARES, EM CONTACTO COM SFCA(F) TABULAR; AMOSTRA A10. MOLR; NICÓIS PARCIALMENTE CRUZADOS (NPC).	101
FIGURA 6.2	A – GRÃO DE HEMATITA(H) LAMELAR, MOSTRANDO UMA DIFERENCIAÇÃO INTRACRISTALINA ORIENTADA; AMOSTRA A2. B – CRISTAL DE HEMATITA(H) MACLADA, EM BORDA DE GRÃO RELIQUIAR DE HEMATITA LAMELAR; AMOSTRA A8. MOLR, NPC.....	102
FIGURA 6.3	A – CONTACTO ENTRE UM GRÃO DE HEMATITA(H) PRESERVADO E UMA REGIÃO DE MAGNETITA(MG) PREDOMINANTE; NA INTERFACE DESTAS DUAS REGIÕES, A MAGNETITA MOSTRA-SE PARCIALMENTE COALESCIDA, E OBSERVAM-SE CRISTAIS EUÉDRICOS DE HEMATITA NEOFORMADA(HN); NA PORÇÃO DIREITA SUPERIOR, HÁ MAGNETITA FINA FORMANDO INTERCRESCIMENTO COM SFCA(MG+F); AMOSTRA A1. B – CRISTAIS EUÉDRICOS DE HEMATITA(HN), PARCIALMENTE ESQUELETAIS, CONTENDO INTERSTICIALMENTE MAGNETITA(MG), SFCA(F) E SILICATO(SI); AMOSTRA A4. MOLR, AP.....	102
FIGURA 6.4	BORDA DE GRÃO RESIDUAL DE HEMATITA LAMELAR MOSTRANDO COALESCIMENTO DOS CRISTAIS. A MAGNETITA OCORRE ASSOCIADA A SFCA MACIÇA, TABULAR E ACICULAR. A FASE SILICÁTICA APARECE PREENCHENDO ESPAÇOS ENTRE OS CRISTAIS DAS OUTRAS FASES. MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA(MEV), IMAGEM DE ELÉTRONS RETROESPALHADOS(IER); AMOSTRA A1.	103
FIGURA 6.5	GRÃO DE HEMATITA PRIMÁRIA MOSTRANDO COALESCIMENTO NAS BORDAS, COM HEMATITA EUÉDRICA NEOFORMADA, EM CONTACTO COM A SFCA ACICULAR A TABULAR E AINDA COM INTERCRESCIMENTO DE SFCA COLUNAR E SILICATO INTERSTICIAL. MAGNETITA FINA, PRÓXIMA AOS POROS RESULTANTES DO PROCESSO, É OBSERVADA; AMOSTRA A1. A FOTOMICROGRAFIA B CORRESPONDE A AMPLIAÇÃO DA ÁREA MARCADA EM A . MEV, IER.....	104
FIGURA 6.6	A – CRISTAIS EUÉDRICOS DE HEMATITA NEOFORMADA(HN) ASSOCIADOS A MAGNETITA(MG) COALESCIDA MOSTRANDO INÍCIO DE REOXIDAÇÃO COM FORMAÇÃO DE HEMATITA(HM), PRINCIPALMENTE NAS BORDAS DOS CRISTAIS, E AINDA COM SFCA(F) COLUNAR; AMOSTRA A11. B – HEMATITA NEOFORMADA, EM CRISTAIS EUÉDRICOS SEMI-ESQUELETAIS, EM CONTACTO COM A SFCA ACICULAR A TABULAR QUE OCORRE ASSOCIADA COM MAGNETITA(MG+F), MOSTRANDO AINDA SFCA COLUNAR ASSOCIADA COM A FASE SILICÁTICA(F+SI); AMOSTRA A6. MOLR, AP.	105

- FIGURA 6.7 CRISTAIS EUÉDRICOS DE HEMATITA ENVOLTOS PELA FASE SILICÁTICA E SFCA (ACICULAR). A FOTOMICROGRAFIA B É UMA AMPLIAÇÃO DE PARTE DE A; AMOSTRA A7. MEV, IER.....105
- FIGURA 6.8 **A** – CRISTAIS DE HEMATITA (OU MAGNETITA) COALESCIDOS, COM ALGUMA FASE SILICÁTICA INTERSTICIAL. **B** – CRISTAIS DE HEMATITA NEOFORMADA, EUÉDRICA E PARCIALMENTE ESQUELETAL, COM POUCA COALESCÊNCIA, LIGADOS POR UMA MATRIZ DE SFCA E SILICATO INTERCRESCIDOS (FASE ESCÓRIA); HÁ ALGUMA INCLUSÃO DESTA MATRIZ NA HEMATITA. AMOSTRA A4. MEV, IER.....108
- FIGURA 6.9 **A** – REGIÃO COMPOSTA POR SFCA E MAGNETITA ANÉDRICA(F+MG) ENVOLVENDO HEMATITA NEOFORMADA (HN) EM PROCESSO DE COALESCÊNCIA; AMOSTRA A6. **B** – HEMATITA NEOFORMADA EM PROCESSO DE COALESCÊNCIA, EM MEIO A UM AGREGADO DE CRISTAIS DE MAGNETITA(MG), PARCIALMENTE COALESCIDOS; AMOSTRA A8. MOLR, AP.....108
- FIGURA 6.10 CRISTAIS EUÉDRICOS A SUBÉDRICOS DE MAGNETITA ASSOCIADOS A SFCA (TABULAR, MACIÇA E ACICULAR) QUE CONSOME SUAS BORDAS, TORNANDO A MAGNETITA LOCALMENTE ANÉDRICA. A FASE SILICÁTICA OCORRE INTERSTICIALMENTE. A FOTOMICROGRAFIA **B** É UMA AMPLIAÇÃO DE PARTE DE **A**; AMOSTRA A4. MEV, IER.....109
- FIGURA 6.11 **A** – CRISTAIS EUÉDRICOS DE HEMATITA NEOFORMADA(HN) EM CONTACTO COM MAGNETITA COALESCIDA, GERALMENTE COM BORDAS ARREDONDADAS, COM E SEM PELÍCULAS DE SILICATO INTERSTICIAIS. **B** – HEMATITA NEOFORMADA EUÉDRICA SEMI-ESQUELETAL E MAGNETITA SUBÉDRICA, COM A FASE SILICÁTICA INTERSTICIAL. SFCA(F) MACIÇA TAMBÉM OCORRE ASSOCIADA À MAGNETITA. AMOSTRA A1. MOLR, AP.....110
- FIGURA 6.12 **A** – PORO(P) ORIGINADO DURANTE O PROCESSO CIRCUNDADO POR UM AGREGADO DE CRISTAIS DE MAGNETITA(MG) MUITO FINA COALESCIDA. CRISTAIS EUÉDRICOS DE HEMATITA(H) E SFCA(F) DENDRÍTICA E INTERCRESCIDA COM SILICATOS SÃO OBSERVADOS; AMOSTRA A1. MEV, IER. **B** – MAGNETITA GRANULAR FINA PARCIALMENTE COALESCIDA, MOSTRANDO SFCA INTERGRANULAR E INÍCIO DE OXIDAÇÃO PARA HEMATITA; AMOSTRA A8. MOLR, AP.....110
- FIGURA 6.13 **A** – CRISTAIS EUÉDRICOS DE MAGNETITA(MG) COM INÍCIO DE OXIDAÇÃO NAS BORDAS(H), ASSOCIADOS A SFCA(F) ACICULAR QUE CRESCE A PARTIR DE SUAS BORDAS; SFCA E SILICATO

- INTERCRESCIDOS; AMOSTRA A3. MOLR, AP. **B** – CRISTAIS DE MAGNETITA LIGADOS A SFCA TABULAR, MACIÇA E ACICULAR; HEMATITA NEOFORMADA TAMBÉM OCORRE; AMOSTRA A1. MEV, IER.111
- FIGURA 6.14 **A** – CRISTAIS DE MAGNETITA(MG) EM INÍCIO DE OXIDAÇÃO(HM), PRINCIPALMENTE NAS BORDAS DOS GRÃOS, ASSOCIADA COM SFCA(F) ACICULAR E MACIÇA, HEMATITA NEOFORMADA(HN) E SILICATO. **B** – CRISTAIS DE MAGNETITA(MG) COALESCIDOS, MOSTRANDO INÍCIO DE OXIDAÇÃO; SFCA COLUNAR INTERCRESCIDA COM SILICATO E HEMATITA NEOFORMADA EUÉDRICA SÃO OBSERVADAS. AMOSTRA A8. MOLR, AP.....111
- FIGURA 6.15 **A** – BOLSA DE SFCA FINA E SILICATO INTERCRESCIDOS(F+SI), RODEADA POR GRÃOS DE HEMATITA RESIDUAL(H) CUJA BORDA MOSTRA CRISTAIS TRANSFORMADOS; CRISTAIS EUÉDRICOS DE HEMATITA(HN) SÃO OBSERVADOS NO CONTATO DA BOLSA COM A HEMATITA RESIDUAL. **B** – CRISTAIS TABULARES E MACIÇOS DE SFCA ASSOCIADOS À MAGNETITA(MG), INTERCRESCIMENTOS DA SFCA E SILICATO INTERSTICIAL. AMOSTRA A1. MOLR, AP.112
- FIGURA 6.16 **A** – SFCA ACICULAR A TABULAR E MACIÇA ASSOCIADA À MAGNETITA, CONSUMINDO SUAS BORDAS, DANDO ORIGEM A CRISTAIS ANÉDRICOS; AMOSTRA A5. **B** – SFCA COLUNAR INTERCRESCIDA COM SILICATO (FASE ESCÓRIA) OCUPANDO ESPAÇOS ENTRE CRISTAIS DE HEMATITA E MAGNETITA; AMOSTRA A3. MEV, IER.....114
- FIGURA 6.17 **A** – FASE SILICÁTICA(SI) PRESERVADA, CIRCUNDADA POR MAGNETITA(MG) FINA COALESCIDA E SFCA(F). AGREGADO DE HEMATITA PRESERVADO, COM BORDA TRANSFORMADA, ONDE OBSERVAM-SE CRISTAIS DE HEMATITA EM CONTACTO COM A SFCA; AMOSTRA A1. **B** – NÚCLEO DA FASE SILICÁTICA(SI) POUCO TRANSFORMADA, CONTENDO ALGUMA MAGNETITA (PONTOS CLAROS), CIRCUNDADO POR MAGNETITA FINA COALESCIDA; SFCA ACICULAR A TABULAR, HEMATITA NEOFORMADA(HN) E POROS REDONDOS(P) TAMBÉM OCORREM; AMOSTRA A10. MOLR, AP.....115
- FIGURA 6.18 NÚCLEOS DA FASE SILICÁTICA POUCO TRANSFORMADA, CIRCUNDADOS POR MAGNETITA FINA COALESCIDA. EM **A** (AMOSTRA A9), OBSERVA-SE UMA PORÇÃO FORMADA POR SFCA E MAGNETITA ASSOCIADAS(MG+F); EM **B** (AMOSTRA A10), HEMATITA REESTRUTURADA MOSTRANDO TANTO GRÃOS COALESCIDOS

	(BORDAS ARREDONDADAS) COMO GRÃOS EUÉDRICOS, COM SFCA E SILICATO INTERCRESCIDOS INTERSTICIAIS. MOLR, AP.....	115
FIGURA 6.19	A – MAGNETITA(MG) ANÉDRICA ASSOCIADA A SFCA(F) ACICULAR E TABULAR, CIRCUNDANDO PORO(P) REDONDO; HEMATITA NEOFORMADA(HN) E SFCA INTERCRESCIDA COM A FASE SILICÁTICA SÃO TAMBÉM OBSERVADAS; AMOSTRA A9. B – PORO REDONDO, CIRCUNDADO POR SFCA DENDRÍTICA INTERCRESCIDA COM SILICATO; AMOSTRA A1. MOLR, AP.....	116
FIGURA 6.20	TRINCA IRREGULAR CORTANDO DUAS REGIÕES DISTINTAS: PORÇÃO COMPOSTA POR SFCA E MAGNETITA (F+MG) E GRÃO DE HEMATITA RESIDUAL; POROS(P), HEMATITA NEOFORMADA(HN) E FASE ESCÓRIA TAMBÉM SÃO OBSERVADOS; AMOSTRA A5. MOLR, AP.	116

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1	QUALIDADE DO SÍNTER REQUERIDA PELAS SIDERÚRGICAS DA ALEMANHA	16
TABELA 3.2	DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA MISTURA ANTES E DEPOIS DA MODIFICAÇÕES.	32
TABELA 3.3	CAPACIDADE NOMINAL DAS PRINCIPAIS PLANTAS DE SÍNTER DO MUNDO EM 2003.	39
TABELA 3.4	CONSUMO MUNDIAL DE SÍNTER FEED, 1998-2012 (MILHÕES DE TONELADAS).....	42
TABELA 3.5	CONSUMO MUNDIAL DE SÍNTER FEED IMPORTADO, 1998-2012 (MILHÕES DE TONELADAS).	43
TABELA 3.6	PRODUÇÃO MUNDIAL DE SÍNTER FEED, 1998-2012 (MILHÕES DE TONELADAS).....	45
TABELA 3.7	EXPORTAÇÃO MUNDIAL DE SÍNTER FEED, 1998-2012 (MILHÕES DE TONELADAS).....	46
TABELA 3.8	EXPORTAÇÕES MUNDIAIS DE SÍNTER FEED PARA O MERCADO TRANSOCEÂNICO, 1998-2012 (MILHÕES DE TONELADAS).....	47
TABELA 3.9	MERCADO DAS EMPRESAS EXPORTADORAS DE SÍNTER FEED, 2002 (MILHÕES DE TONELADAS).	47
TABELA 4.1	QUALIDADE QUÍMICA DAS MATÉRIAS-PRIMAS UTILIZADAS NA PRIMEIRA ETAPA DO ESTUDO.....	52
TABELA 4.2	DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS MATÉRIAS-PRIMAS UTILIZADAS NA PRIMEIRA ETAPA DE ESTUDO (% PESO ACUMULADA)	53
TABELA 4.3	QUALIDADE QUÍMICA DAS MATÉRIAS-PRIMAS UTILIZADAS NA SEGUNDA ETAPA DO ESTUDO.....	54
TABELA 4.4	DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS MATÉRIAS-PRIMAS UTILIZADAS NA SEGUNDA ETAPA DO ESTUDO (% PESO ACUMULADA).....	55
TABELA 4.5	COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS PARCIAIS NAS DIFERENTES CONDIÇÕES DE TESTE (%).	57
TABELA 4.6	DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS MISTURAS PARCIAIS NAS DIFERENTES CONDIÇÕES DE TESTE (EM % ACUMULADA).	58
TABELA 4.7	COMPOSIÇÕES DAS MISTURAS PARCIAIS NAS DIFERENTES CONDIÇÕES DE TESTE (%).	61
TABELA 4.8	DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS MISTURAS NAS DIFERENTES CONDIÇÕES DE TESTE.	61
TABELA 5.1	RESULTADOS DAS ANÁLISES QUÍMICAS DOS SÍNTERES (% EM PESO).	77

TABELA 5.2	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE SINTERABILIDADE COM AS DIFERENTES MISTURAS.....	78
TABELA 5.3	RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E METALÚRGICA DOS SÍNTERES.	78
TABELA 5.4	RESULTADOS INDIVIDUAIS DA MISTURA BASE DE REFERÊNCIA.	81
TABELA 5.5	RESULTADOS INDIVIDUAIS DO <i>PELLET FEED</i> SUBSTITUINDO 50% DO MINÉRIO D.	81
TABELA 5.6	RESULTADOS INDIVIDUAIS DO <i>PELLET FEED</i> SUBSTITUINDO 100% DO MINÉRIO D.	82
TABELA 5.7	RESULTADOS INDIVIDUAIS DO <i>PELLET SCREENINGS</i> SUBSTITUINDO 50% DO MINÉRIO D.	82
TABELA 5.8	RESULTADOS INDIVIDUAIS DO <i>PELLET SCREENINGS</i> SUBSTITUINDO 100% DO MINÉRIO D.	83
TABELA 5.9	RESULTADOS INDIVIDUAIS DO <i>MICRO PELLET</i> SUBSTITUINDO 50% DO MINÉRIO D.	83
TABELA 5.10	RESULTADOS INDIVIDUAIS DO <i>MICRO PELLET</i> SUBSTITUINDO 100% DO MINÉRIO D.	84
TABELA 5.11	RESULTADOS DAS ANÁLISES QUÍMICAS DOS SÍNTERES (% EM PESO).	89
TABELA 5.12	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE SINTERABILIDADE COM DIFERENTES MISTURAS.....	89
TABELA 5.13	RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E METALÚRGICA DOS SÍNTERES.	90
TABELA 5.14	RESULTADOS INDIVIDUAIS DAS MISTURAS BASE DE REFERÊNCIA.	92
TABELA 5.15	RESULTADOS INDIVIDUAIS DO <i>PELLET FEED</i> SUBSTITUINDO 25% DO MINÉRIO (D).	92
TABELA 5.16	RESULTADOS INDIVIDUAIS DO <i>PELLET FEED</i> SUBSTITUINDO 50% DO MINÉRIO (D).	93
TABELA 5.17	RESULTADOS DOS ÍNDICES MÉDIOS DE GRANULAÇÃO DAS MISTURAS (GI_1 E GI_2), TAMANHOS MÉDIOS DAS PARTÍCULAS DAS MISTURAS TESTADAS E TAMANHOS MÉDIOS DAS QUASI PARTICULAS. GI_1 - MÉTODO USIMINAS. GI_2 - MÉTODO NSC.	95

RESUMO

Foram efetuados experimentos em sinterização piloto, com o objetivo de comparar a qualidade do sínter produzido com uma mistura de sinterização de referência, com a de sínteres resultantes de outras misturas, nas quais um *sinter feed* que participa em 25% da mistura de referência foi substituído por 50% e 100% de *pellet screenings* e *micro pellets* e por 25%, 50% e 100% de *pellet feed*.

Foram analisados os seguintes parâmetros dos sínteres produzidos:

- a) produção: índice de granulação, tempo de sinterização, retorno < 5mm, retorno total, *coke rate* e produtividade;
- b) qualidade: *shatter index*, *tumble index*, RDI e redutibilidade;
- c) estrutura do sínter: análise da microestrutura.

Os resultados mostraram que o *pellet feed* pode participar em até 6,25% em uma mistura a ser sinterizada (25% de substituição). A produtividade nos ensaios de sinterabilidade foi tecnicamente igual à de referência. Os índices de qualidade e a estrutura também não apresentaram diferenças significativas.

O *pellet screenings* e o *micro pellets* podem participar em até 12,5% em uma mistura de minérios a ser sinterizada (50% de substituição). A produtividade nos ensaios de sinterabilidade foi tecnicamente igual à de referência. Os parâmetro de qualidade *shatter index*, *tumble index*, RDI e redutibilidade foram levemente inferiores no caso de *pellets screenings*. Para o *micro pellets* apenas os parâmetros *shatter index* e RDI ficaram um pouco abaixo dos obtidos com a mistura de referência.

Todos esses parâmetros de qualidade poderão ser elevados com uma maior adição de carvão, tendo em vista que o consumo de combustível foi inferior ao da mistura de referência.

ABSTRACT

Pilot scale sintering experiments were performed, aiming at comparing the quality of the sinter produced from a reference sintering blend with that of sinters resulting from other blends, in which the sinter feed in the reference blend was replaced by 50% and 100% pellet screenings and micro pellets and also by 25%, 50%, and 100% pellet feed.

The following parameters of the sinters were assessed:

- a) production: granulation index, sintering time, < 5mm return, total return, coke rate and productivity;
- b) quality: shatter index, tumble index, RDI and reducibility;
- c) sinter structure: microstructural analysis.

The results showed that pellet feed may reach 6.25% in a sintering blend (25% substitution). The productivity in the sintering experiments was technically equal to that achieved with the reference blend. The quality indexes and the structure also did not show significant differences.

Pellet screenings and micro pellets may participate up to 12.5% in the sintering blend (50% substitution). The productivity in the sintering experiments was technically equal to that achieved with the reference blend. The quality parameters shatter index, tumble index, RDI and reducibility reached levels slightly inferior to those achieved with the reference blend. In the case of micro pellets only the parameters shatter index and RDI stayed slightly below the levels for the reference blend.

All the quality parameters may be improved with a higher addition level of coke, for the fuel consumption was lower than that for the reference blend.

1. INTRODUÇÃO

A Samarco Mineração S/A, cujo controle acionário é de 50% da CVRD e 50% da BHP-Billiton, produz pelotas, *pellet feed* (concentrado de minério de ferro) e *pellet screenings* para o mercado siderúrgico internacional, no qual ocupa a posição de segunda maior exportadora transoceânica de pelotas de minério de ferro para a produção de aço, com uma participação de 17% nesse mercado. Seus produtos são comercializados para a China (37%), outros países da Ásia (15%), Oriente Médio e África (23%), Europa (16%) e Américas (9%).

Além das pelotas de minério de ferro, *pellet feed* e *pellet screenings*, a Samarco Mineração está desenvolvendo um novo produto denominado *micro pellet*.

O *pellet feed* na Samarco Mineração é o produto resultante do processo de filtragem, após o minério de ferro ser lavrado, britado, moído, concentrado, transportado por mineroduto e espessado. O *pellet feed* excedente do processo de pelletização é comercializado para produtores de pelotas de minério de ferro e sinter.

O *pellet screenings* é o produto resultante do rejeito de peneiramento das usinas de pelletização, tendo passado por todo seu processo. Comparado ao *sinter feed* natural, o *pellet screenings* apresenta a vantagem de ser um material praticamente sem perda ao fogo, além de ter elementos fluxantes em sua composição química. Tratando-se de um material que não pode ser reutilizado no processo de pelletização, o *pellet screenings* é vendido para fabricantes de sinter. A Samarco Mineração S/A empenha-se para diminuir a quantidade de *pellet screenings* gerada no processo de pelletização por razão de custo e busca aplicações para seu uso.

O *micro pellet* é um produto que está sendo desenvolvido pela Samarco Mineração para ser utilizado na produção de sinter. Trata-se de um produto aglomerado a frio e com granulometria e composição química adequadas ao processo de sinterização. A idéia básica é aumentar o valor agregado do *pellet feed* e oferecer ao mercado um produto que tenha vantagens sobre o *sinter feed*.

Com o objetivo de aprimorar a assistência técnica aos seus clientes, a Samarco Mineração S/A decidiu conhecer de forma mais detalhada os fenômenos que ocorrem durante o processo de sinterização, utilizando seus produtos em uma mistura a sinterizar, em que a influência da qualidade dos minérios de ferro é extremamente crítica, pois estes constituem a maior parte da mistura.

De longa data fornecedora de *pellet feed* e *pellet screenings* para siderúrgicas que utilizam esses produtos em suas sinterizações, a Samarco também busca o desenvolvimento de novos produtos, como o *micro pellet*.

A Samarco Mineração, que tem uma posição consolidada no mercado mundial de pelotas de minério de ferro, acredita que pode contribuir com seus clientes na obtenção de soluções para suas cargas metálicas, indo ao encontro dos desejos das siderúrgicas de todo o mundo na busca de elevados níveis de produtividade para seus alto-fornos e altas taxas de injeção de carvão pelas ventaneiras. Tal desempenho somente será possível com a utilização de matérias-primas de alta qualidade. Vale ressaltar que, na maioria dos altos-fornos de usinas siderúrgicas integradas, a matéria-prima de maior participação na carga metálica é o *sínter*.

As usinas siderúrgicas buscam sempre aprimorar a qualidade do *sínter*, pois ela tem impacto direto na produtividade dos altos-fornos e conseqüentemente no custo do ferro-gusa e este influencia diretamente o custo do aço.

A produção de um *sínter* com adequada qualidade física, química e metalúrgica e com elevados níveis de produtividade está diretamente relacionada à qualidade dos minérios de ferro utilizados na mistura a sinterizar, avaliados em sua composição química e distribuição granulométrica. Ante à dificuldade de se obter um único minério com uma qualidade adequada, quantidade suficiente e custo competitivo, o caminho adotado é a mistura de minérios, assim, a um ou mais minérios considerados base são adicionados minérios corretivos com alguma característica de qualidade.

Dessa maneira, características ótimas de um determinado minério não existem de uma forma absoluta. Por exemplo, um determinado minério, que possua um elevado percentual de superfinos que pode ser considerado prejudicial numa primeira análise, pode ser útil em outra situação.

Além da preocupação com as matérias-primas as siderúrgicas estão buscando modificações no processo com o objetivo de permitir a utilização de uma gama maior de materiais e superando a capacidade de suas máquinas de *sínter*. Como exemplo citamos a segregação granulométrica de misturas e o processo HPS.

Os estágios de evolução atuais das sinterizações e altos-fornos no mundo evidenciam a necessidade da utilização de matérias-primas capazes de atender a requisitos cada vez mais rígidos de qualidade, custo, suprimento e ambientais. Acredita-se que o presente trabalho contribuirá no sentido de aprimorar o conhecimento no campo da sinterização de minérios de ferro.

Dentro dessa visão, esta dissertação tem como objetivo estudar o comportamento de três materiais substituindo um *sínter feed* padrão em uma mistura de sinterização.

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho foi comparar as características de um síter de uma mistura de referência, com outros sínteres resultantes da substituição de um *síter feed* participante da mistura de referência por 50% e 100% de *pellet screenings* e *micro pellets* e por 25%, 50% e 100% de *pellet feed*.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na siderurgia moderna o sinter tem um papel fundamental na obtenção de uma carga metálica com características físicas, químicas e metalúrgicas conhecidas e projetadas para o melhor desempenho do alto-forno, como também para recuperação de finos, poeiras e lamas gerados na fabricação do aço. Portanto, o sinter é objeto de estudos para elevar suas características de qualidade e como meio para diminuir o impacto ambiental do processo de fabricação do aço através da utilização dos resíduos do processo.

3.1. Histórico da Sinterização

De acordo com Cappel e Lungen (1999) o histórico da sinterização pode ser resumido nos tópicos que se seguem.

3.1.1 Primeiros Passos

Sinterização de minérios é conhecida há mais de 100 anos. Em 1897 T. Huntington e F. Heberlein patentaram um processo de ustulação de minérios de chumbo sulfetados o qual contém a primeira descrição de sinterização. Huntington e Heberlein realizaram a sinterização por um processo de sopro descontínuo. A unidade de sinterização era um vaso descrito como panela de sinterização ou conversor que tinha uma grelha no fundo. Antes de iniciar a operação, a grelha era carregada com carvão vegetal. Quando o carvão vegetal era aceso, a mistura a ser sinterizada era misturada manualmente através de pás e o processo de combustão era mantido através do sopro de ar ascendente até que o material fosse sinterizado. O sinter era descarregado por basculamento da panela ou conversor. O trabalho nessas panelas ou conversores era extremamente penoso.

Carl Richard Wolfgang Job desenvolveu um método para aglomerar finos de minério de ferro e pirita calcinada usando carvão como combustível em 1902, dando a ele o mérito de inventor da sinterização de minério de ferro. A primeira planta entrou em operação em 1904 na Cockrill, em Liège, para processar pó de alto-forno.

A.S. Dwight e R.L. Lloyd propuseram o processo de sinterização com sucção de ar descendente. Eles também foram responsáveis pelo desenvolvimento da máquina de esteira contínua, que ficou conhecida como máquina de sinterização contínua Dwight-Lloyd.

Em 1905, E. J. Savelberg foi o primeiro a usar as panelas de sinterização de Huntington-Heberlein para sinterizar minério de ferro.

Em 1909, o Barão von Schlippenbach solicitou patente para uma máquina circular de sinterização contínua para minério de chumbo.

Em 1911 foi registrada uma patente, pelo diretor geral da Illinois Steel Corporation, propondo a utilização da máquina de sinterizar Dwight-Lloyd em conjunto com o processo de sinterização de Carl Richard Wolfgang Job.

A primeira máquina de sinter Dwight-Lloyd a operar com minério de ferro foi montada em 1911 na Brook Iron Co., em Birdboro, Pensylvania.

As máquinas do processo Dwight-Lloyd eram comercializadas por duas companhias: Dwight-Lloyd e Ore Reclamation. Huntington, Heberlein, Job e von Schlippenbach trabalhavam para a Metallurgische Gesellschaft em Frankfurt/Main, antecessora da Lurgi AG. Visto que a Metallurgische Gesellschaft tinha nos Estados Unidos os direitos de comercializar o processo de sinterização de minério de ferro, a Ore Reclamation adquiriu a licença da Metallurgische Gesellschaft em 1911. Em um acordo recíproco, a Metallurgische Gesellschaft adquiriu o direito do uso e comercialização da Dwight-Lloyd. A primeira planta entrou em operação na Alemanha em 1914, na Bochumer Verein.

3.1.2. Difusão do Processo de Sinterização

No início dos anos 30 a preparação de carga metálica foi introduzida na Stahlwerke GmbH Völklinger na região de Röchiling'sche Eisen, na Alemanha.

Na França, em 1938, a Société de Hauts Fourneaux de la Chiers passou a britar de seu minério e a sinterizar os finos junto com o pó de alto-forno.

Na Inglaterra a preparação de carga metálica foi introduzida na Appleby-Frodingham em 1934.

Na Suécia, em 1934 a Domnarvert já usava 100% de sínter na carga metálica.

Na Rússia, em 1940 já se produzia aproximadamente 6 milhões de toneladas de sínter.

Depois da Segunda Guerra Mundial, a produção de sínter cresceu rapidamente.

3.1.3. Desenvolvimentos no Projeto do Equipamento

A área de reação da primeira máquina de sinterização com uma largura de 1 metro era de 6m^2 . Em 1919 máquinas com 1,5 metro de largura eram oferecidas ao mercado. As máquinas com largura de 2 metros construídas em 1927 tinham uma área de reação de 60m^2 . Em 1936 a largura de algumas máquinas foi aumentada para 2,5 metros, o que representava uma área de 75m^2 . Essa geração de máquinas de sinterização foi usada em todo o mundo por um tempo considerável. A área de sucção foi aumentada para 90m^2 em 1952 e 120m^2 em 1957. A primeira máquina de sínter com 3 metros de largura e 180m^2 de área foi desenvolvida em 1958. As primeiras máquinas de sínter com 4 metros de largura foram construídas para a BHP na Austrália e para a Jones & Laughlin nos Estados Unidos, também no ano de 1958. A primeira máquina de sínter com 5 metros de largura foi pedida em 1969. A maior máquina com 5 metros de largura tem 930m^2 de área. Esta é a maior máquina de sínter hoje existente. Entretanto, uma máquina de sínter com 1.000m^2 foi projetada mas não construída.

De acordo com o Iron and Steel Works of the World (2002) as maiores máquinas de sínter por região são as seguintes:

Oriente Médio e África – África do Sul – Iscor – 250m^2

Oceania – Austrália – BHP – 420m^2

Américas – Brasil – CST – 484m²

China – China – Shanghai Bao Steel – 450m²

Europa – França – Usinor – 572m²

Outros Ásia – Japão – NKK – 930m²

3.1.4. Resfriamento do Sínter

Originalmente, o sínter continuava quente quando era descarregado da máquina de sínter e transportado para o alto-forno através de vagões. Correias transportadoras de bandejas metálicas também eram utilizadas. Contudo, logo ficou claro que a utilização de correias transportadoras de borracha era a única opção econômica. Portanto foi necessário realizar testes de resfriamento utilizando fluxo de ar passando através do sínter. Esses testes foram realizados no Centro de Pesquisas e Desenvolvimento da Lurgi entre 1949 e 1950 e resultaram na construção de um resfriador piloto em Watenstedt-Salgitter na Alemanha, com uma capacidade de 300t por dia, em 1951.

O primeiro resfriador em escala industrial foi instalado na Steel Co. of Wales. Era um resfriador de linha reta para baixa altura de leito de sínter com ventiladores de sucção. Em 1952 um resfriador anular foi desenvolvido e foi primeiramente usado na Appleby-Frodingham. Esse tipo foi sucedido por uma variedade de resfriadores anulares com alturas de leito maiores que operavam com fluxo de gás ascendente. A Sumitomo construiu um resfriador de linha reta com altura do leito maior, usado pela primeira vez na China Steel em Taiwan. Resfriamentos em linha, alongando a máquina de sínter, também foram propostos. Várias plantas com esse sistema foram construídas. Algumas delas foram equipadas mais tarde com o resfriador separado para aumentar a produção, usando a zona de resfriamento da máquina de sínter para sinterizar. Hoje se discute a aplicação de resfriadores em linha para pequenas plantas, porque resfriadores separados demandam altos investimentos para esse caso. Para grandes plantas o resfriamento em linha não oferece vantagem no custo de investimento. Grandes plantas portanto são equipadas com resfriamento em separado.

3.1.5. Outros Equipamentos

Nas plantas de sinter o desenvolvimento não se ateve somente à máquina de sinter para se obter altos níveis de performance. Por essa razão foram introduzidos tambores combinados para mistura e granulação com diâmetros acima de 4,4 metros e comprimento acima de 30 metros em vez de misturadores de parafuso. Discos de pelotização também foram introduzidos.

Estações de alimentação agora são tipicamente equipadas com rolos. O forno de ignição também experimentou consideráveis melhorias. Os fornos de ignição em uso antes de 1960 eram baixos e pequenos. Mais tarde fornos maiores foram instalados, alguns deles combinando a função de ignição e tratamento térmico. O consumo de calor desses fornos aumentou para mais de 143.308 kcal/t de sinter. Nos dias de hoje, uma pequena quantidade de calor é usada para a ignição, particularmente no Japão, pelo uso de queimadores em linha. O consumo de calor caiu para 955 a 1.911 kcal/t de sinter nessas plantas, mas é comum um consumo de 23.885 kcal/t de sinter.

Um grande esforço foi desenvolver os ventiladores de processo, quebradores de sinter e peneiras com altos níveis de eficiência e durabilidade.

As modernas plantas de sinterização contam com pátios de homogeneização que mantêm a composição química do sinter por longos períodos de tempo.

Houve a transição da operação manual para o controle automático das operações e processos de otimização e controle tomaram seu lugar.

3.1.6. Desenvolvimentos na Engenharia do Processo

Nos primeiros anos os engenheiros de processo estavam principalmente interessados em melhorar a eficiência do processo de sinterização. Contudo, uma vez entendido que o sinter era uma excelente carga para o alto-forno, a atenção foi direcionada para as

propriedades do sinter. Redução do consumo de energia se tornou objeto de igual importância.

A produção de sinter auto-fundente foi proposta pela primeira vez em 1938. A basicidade do sinter tem aumentando desde então, tendência a qual tem provado ser a mais importante na história da sinterização.

Se de um lado o calcário é calcinado sem necessidade de mais combustível sólido e as propriedades do sinter são melhoradas, por outro lado, a alta basicidade permite o uso de altas camadas uma vez que a reação endotérmica da remoção do dióxido de carbono previne o acúmulo de calor nas camadas inferiores da carga.

Isso pode ser visto quando se comparam os perfis de temperatura de uma carga ácida com uma carga básica. Para um sinter ácido, nas diferentes camadas há um aumento no tempo em que o sinter fica na temperatura de sinterização à medida em que o processo prossegue. Com o sinter básico, a zona de calor na carga se mantém pequena do topo ao fundo.

A figura 3.1 mostra um diagrama tempo – temperatura de um processo de sinterização utilizando uma mistura ácida e uma mistura básica.

Maiores alturas de leito significam menor quantidade de calor consumido e melhorias na qualidade do sinter.

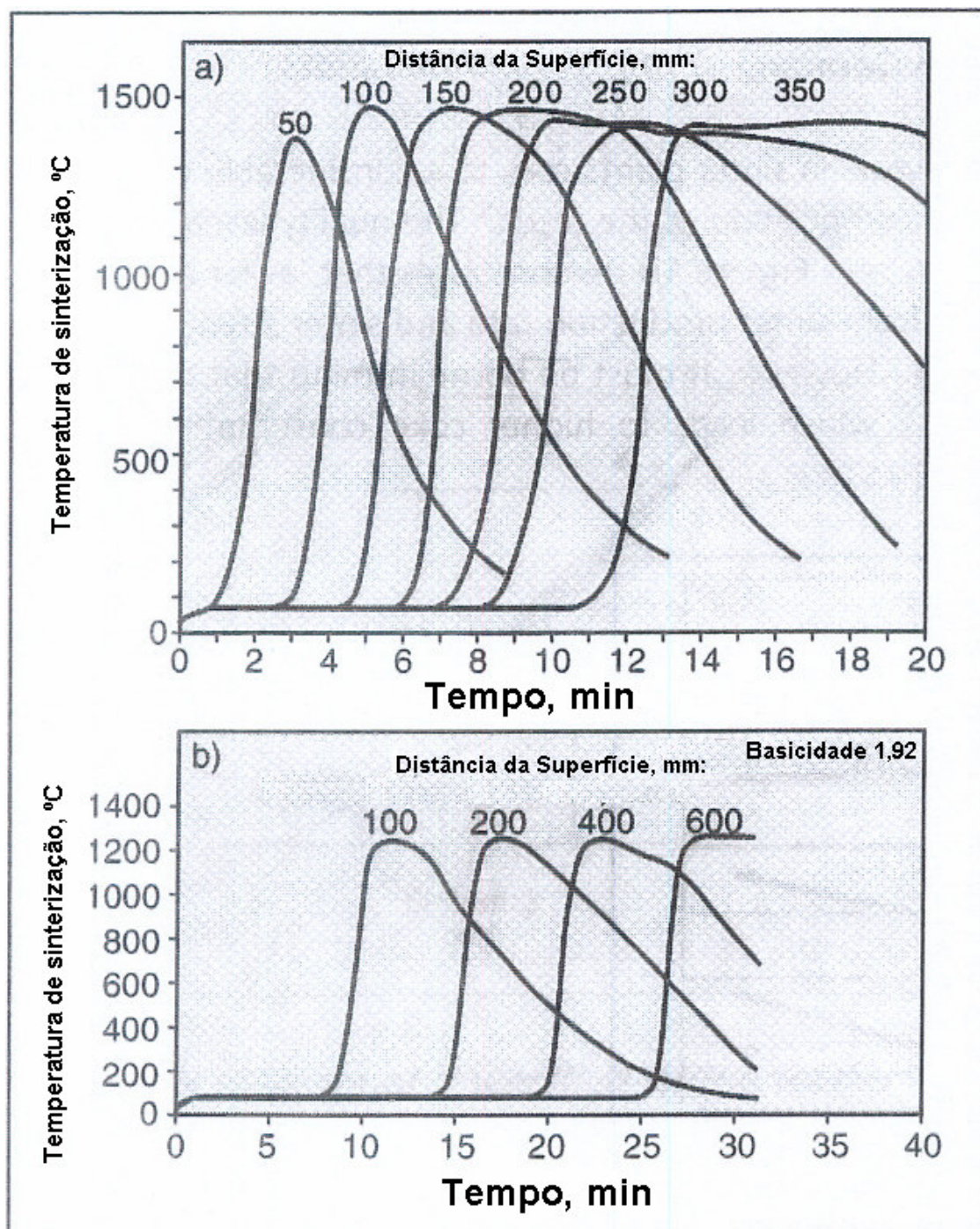


Figura 3.1 – Diagrama tempo – temperatura de um processo de sinterização utilizando (a) uma mistura ácida e (b) uma mistura básica. Cappel e Lungen (1999).

A excelência da operação tem se desenvolvido através do tempo. Em 1957 eram necessários 789.191 kcal/t de síter para minérios de ferro de baixa qualidade. Em 1982 eram necessários 597.115 kcal/t de síter para minérios de ferro de alta qualidade. Em 1998 o número caiu para 358.269 kcal/t de síter na Alemanha.

Das melhorias alcançadas ao longo dos anos nas plantas de síter, uma grande parte pode ser atribuída às mudanças das composições químicas e físicas da alimentação. O nível de qualidade hoje esperado só pode ser obtido processando minérios de alta qualidade.

Mais recentemente outros desenvolvimentos têm atraído considerável atenção: a produção de síter com o mínimo consumo de calor e o processo *hybrid pellet sinter* (HPS) que requer os seguintes pré-requisitos: adequada granulação e proporção de vários componentes na mistura de sinterização. O processo *hybrid pellet sinter* (HPS) foi desenvolvido pela NKK. O processo permite utilizar grandes quantidades de *pellet feed*, através da pelletização da mistura de sinterização e revestindo as pelotas com uma camada de carvão fino, esse processo será tratado com mais detalhes no capítulo 3.3.1.

A recuperação da energia térmica do ar de resfriamento e dos gases de combustão, implementados depois da crise do petróleo de 1973, constitui um outro importante desenvolvimento. O conceito de reintroduzir o ar quente do resfriamento nos fornos de ignição e no tratamento térmico foi primeiro realizado na planta de sinterização da usina de Wakamatsu da Nippon Steel Corporation, em 1976. Os gases quentes do resfriador foram utilizados para gerar vapor na planta de Ogishima da NKK, em 1978. A Sumitomo foi a primeira a utilizar gases da combustão para gerar vapor na planta número 5 de Wakayama e na planta número 3 de Kokura. Em Wakayama, cerca de 100kg de vapor por tonelada de síter são gerados, correspondendo aproximadamente à quantidade de 66.877kcal/t de síter ou um quinto da energia consumida pela planta.

Um dos recentes desenvolvimentos da Nippon Steel Corporation é conhecido como *intensified sifting feeder* (ISF), que consiste em um determinado número de barras, separadas uma das outras, equidistantes da origem. Essas barras divergem no plano vertical, a abertura entre as barras aumenta na medida que se afasta da origem. Cada barra

tem o movimento de rotação para evitar o acúmulo de material sobre ela. Quando a mistura cai sobre as barras que possuem uma inclinação decrescente em direção ao início da máquina de sinter, ocorre uma segregação onde os grânulos maiores são depositados primeiro nas barras de grelha e depois recobertos pelos grânulos mais finos, ocorrendo então uma segregação da mistura.

Para garantir o sucesso do HPS, a NKK desenvolveu o *segregation slit wire* ou SSW, que tem como objetivo segregar por tamanho a mistura que foi pelletizada e recoberta com fino de coque, no leito da máquina de sinter, onde as partículas maiores ficam na parte inferior da camada e as partículas menores na parte superior da camada, concentrar mais combustível na parte superior da camada e evitar ou minimizar o carregamento tipo avalanche na máquina de sinter, que é muito comum no sistema de chapa defletora. O SSW basicamente é composto por um conjunto, em curvatura, de 22 fios metálicos, revestidos com plástico (uretano), emparelhados e com certa abertura entre eles. Similar ao ISF, o SSF faz uma curvatura com inclinação decrescente em direção à grelha e o espaçamento entre os cabos diminui em direção à grelha, o que vai proporcionar que as partículas maiores ocupem a parte mais baixa da camada de material a ser sinterizado. Para autolimpeza, os cabos se movimentam a cada 10 minutos. Fujimori (1998) comenta o sistema de carregamento desenvolvido pela Kawasaki Steel, o *Magnetic Braking Feeder* ou MBF, que foi instalado em todas as máquinas de sinter da usina de Mizushima. O equipamento consiste em um magneto permanente instalado no lado posterior da parede inclinada do chute de alimentação da máquina de sinter, que aplica uma força magnética na mistura a ser sinterizada no momento de sua queda para o carro de grelha, o que reduz a velocidade de queda do material. Ao mesmo tempo, esse método promove a segregação das partículas por tamanho, usando o fato de que os materiais finos têm um grande coeficiente de fricção, e são mais fortemente afetados pelo campo magnético que os materiais mais grossos. Esse dispositivo também contribui para aumentar o rendimento por tornar possível a segregação da carepa de laminação, que é facilmente fundida e é atraída pela força magnética, para a superfície da camada do leito de sinterização, onde o minério sinterizado é quebradiço. Esse dispositivo tem dado grande contribuição para redução do consumo de aglomerantes caros e aumentado o rendimento do processo. A figura 3.2 mostra os três dispositivos de segregação de misturas.

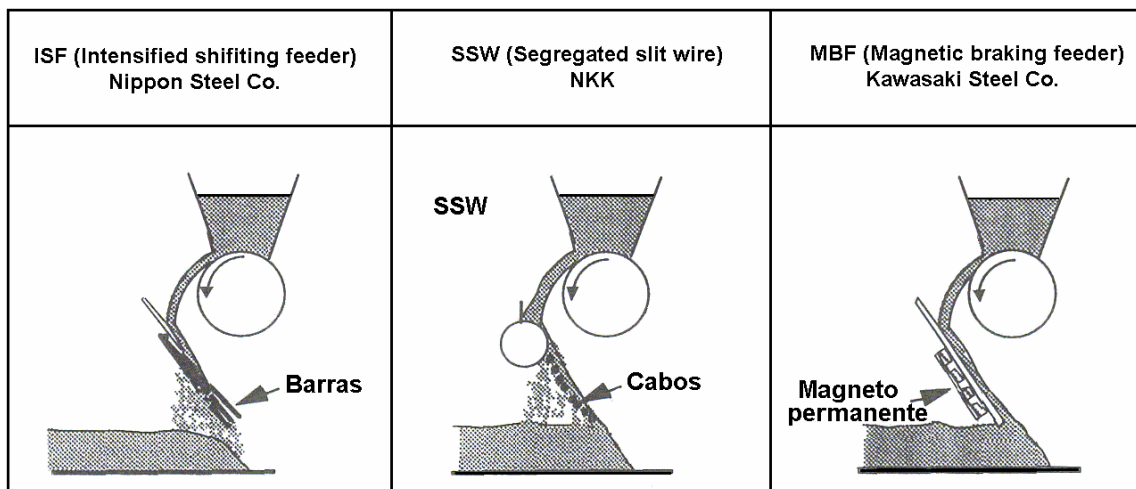


Figura 3.2 – Diagrama esquemático dos dispositivos de segregação de misturas. Fujimori (1998).

3.1.7 Qualidade do Sínter

Com o passar do tempo as demandas da qualidade do sinter têm mudado de várias formas. No início era suficiente gerar um produto altamente fundido contendo grandes pedaços e com muitos silicatos de ferro em sua composição, muitas vezes sem se preocupar muito com uma acurada separação e reciclagem dos finos. Conseqüentemente o sinter era de difícil redução no alto-forno e dificultava o fluxo de gás. Decorreu muito tempo até que desenvolvimentos permitiram um aumento da qualidade do sinter, que passou de um material rejeitado nos alto-fornos para depois ser considerado uma excelente carga.

Não há muito tempo, o teor de FeO no sinter era mantido acima de 10% para garantir alta resistência na redução a baixas temperaturas. Nos últimos anos houve uma fundamental reorientação. A basicidade foi elevada para níveis onde a relação CaO/SiO_2 ficou maior que 1,5, nível onde grandes proporções de cálcio ferritas são formadas, e menor significância é hoje dada ao teste de degradação. As mudanças na composição química do sinter na Alemanha, entre 1972 e hoje, são: aumento do Fe total e basicidade e redução do FeO, SiO_2 , Al_2O_3 e MgO.

O sinter padrão como um guia para a qualidade das siderúrgicas alemãs é apresentado na tabela 3.1. Contudo, é importante enfatizar que, em contraste com a situação para pelotas, não há regulamentos universais sobre a qualidade do sinter, pela simples razão que as propriedades do sinter são ajustadas de acordo com a composição da carga do alto-forno e o sinter não é um material comercial. Existe apenas um produtor nas Filipinas, que é a Philippine Sinter Corp, produzindo na usina de Makati 5.000.000t/ano disponibilizadas para o mercado. O teor de Al_2O_3 do sinter demandado na Alemanha é menor que o do Japão uma vez que mais minérios australianos e indianos com alto teor de Al_2O_3 são processados lá.

TABELA 3.1 – Qualidade do sinter requerida pelas siderúrgicas da Alemanha. Cappel e Lungen (1999).

Composição química		
FeO		5,0 – 6,0%
Mn		< 0,2%
P		< 0,04%
SiO₂		5,0 – 5,5%
Al₂O₃		1,0 – 1,3%
TiO₂		menor possível
Na₂O+K₂O		< 0,08%
CaO		8 - 10%
MgO		1,4 – 2,0%
CaO/SiO₂		1,8
Propriedades Físicas		
Tamboramento (ISO 3271)	> 6,3mm	70 - 80%
Granulometria	< 5,0mm	5% máx
	< 10mm	25% máx
	> 50mm	10% máx
Propriedades metalúrgicas		
LTD estático (ISO 4696-1)	< 3,15mm	30% máx
Reducibilidade (ISO 4695)	% O ₂ /min	1,4 min

O teor de ferro total do sinter é usualmente acima de 57%. Mas é preciso mencionar que esforços estão sendo feitos para aumentar o teor de Fe pela redução do teor de sílica para atingir maior redução da quantidade de escória nos alto-fornos. Na Finlândia, por exemplo, o teor de ferro no sinter foi elevado para aproximadamente 61%.

Cada vez maior importância está sendo dirigida para o teor de alcális no *sinter feed*. De um lado o teor de alcális deve ser o mais baixo possível para melhorar as condições de operação do alto-forno, por outro lado, cloretos de alcális são extremamente difíceis de serem separados do gás de combustão por um sistema de limpeza de gases a seco.

É bom notar que as plantas de sinterização têm uma importante tarefa na produção de ferro e aço no que diz respeito ao processamento de resíduos de materiais gerados nesses processos. Maneiras estão sendo encontradas para incorporar os finos gerados na indústria siderúrgica na sinterização. Zinco, chumbo, álcalis e orgânicos representam os materiais residuais que são processados. Isso significa que não há alternativa para eliminar essas impurezas antes da sinterização. Alguns passos já estão sendo dados nessa direção, por exemplo o tratamento dos finos contendo zinco e chumbo no processo Waelz. Esforços estão sendo realizados para manter esses materiais fora do processo de sinterização, através da aglomeração dos finos com cimento formando pelotas ou tijolos e utilizando forno de cubilô para o tratamento.

Kasai, Rankin e Gannon (1989) comentam que o sinter para atender a performance dos altos-fornos atuais com alta produtividade, baixo consumo de combustível e qualidade constante do gusa necessita de: composição química estável (principalmente teor de FeO e basicidade), ausência de elementos químicos nocivos ao alto-forno (álcalis e zinco), elevado teor de ferro, baixo volume de escória, elevada resistência mecânica, granulometria estável, baixa percentagem de finos, baixa degradação sob redução, alta redutibilidade e temperaturas de amolecimento e fusão compatíveis com a carga metálica.

Para atender essas exigências o sinter e o processo de sinterização vêm experimentando mudanças ao longo do tempo. Santiago (2000) descreve a evolução da tecnologia de sinterização:

- i. início – aproveitamento de rejeitos de minério de ferro, com granulometria inadequada para o uso direto nos altos-fornos;
- ii. sinter auto fundente – transferência dos fundentes carregados diretamente nos altos-fornos para o sinter; aumento da redutibilidade e resistência do sinter;
- iii. instalações de sinterizações de alta produção – aumento da proporção de sinter na carga metálica dos altos-fornos;
- iv. sinter heterogêneo – redução do teor de FeO e elevação da redutibilidade; sinterização com elevada altura de camada – intensificação da economia de energia e elevação da redutibilidade;

- v. sinter de baixo teor de SiO_2 – diminuição da formação de silicatos, para aumentar o ferro total e a redutibilidade;
- vi. sinter de alta redutibilidade – controle da parte não fundida do sinter.

O processo de sinterização tem se desenvolvido na busca de um melhor conhecimento dos minérios, insumos e desenvolvimento de novos equipamentos. Estudos recentes mostram essa preocupação da indústria.

3.2 Utilização de Resíduos no Processo de Sinterização

Huguet et al (1991) comentam que na Sollac For Sur Mer os dois altos-fornos são alimentados por uma só máquina de sinterização com 400m^2 de área. Melhorias foram realizadas para aumentar a produção de modo a manter a proporção de sinter na carga metálica de aproximadamente 84%. Entre as melhorias, foi adotada a preparação de subprodutos, que no caso da Sollac são: lama do sistema de despoejamento da aciaria, finos da planta de aços magnéticos, pó da limpeza de gases dos alto-fornos, finos metálicos do sistema de dessulfuração do gusa e pó da ventilação das instalações industriais. Esses produtos usualmente causam problemas quando são reciclados. Após análise da situação foi decidido fazer a pelletização do material antes da sinterização. Granulometria do material é composta por 48% abaixo de $250\mu\text{m}$ e 22% abaixo de $50\mu\text{m}$. A quantidade obtida é aproximadamente de 17.000t/mês. A instalação de pelletização é composta de silos de armazenagem de resíduos e cal hidratada, misturador, desagregador, silo de armazenagem de mistura e dois discos de pelletização.

Com a utilização das micropelotas na mistura de sinterização houve um aumento na produtividade de $0,8\text{t}/\text{m}^2/\text{dia}$ e peneirando as micropelotas na malha de 1mm houve um aumento de $1,3\text{t}/\text{m}^2/\text{dia}$.

Pisilä (1995) comenta que a Rautaruukki Co Raahe Steel, da Finlândia, utiliza 95% dos resíduos gerados na sinterização e que apenas 5% são destinados aos aterros.

Yoimans e Rorick (1995) comentam que na Bethlehem Steel Corporation 20% da mistura a ser sinterizada é composta de resíduos recicláveis da usina, e que a utilização desses materiais é essencial para a viabilidade econômica do processo de sinterização.

Cho, Moon e Jung (1996) afirmam que 250.000t de pó, correspondendo a 25% do total de pó anualmente gerado na Pohang Steel Works, é reutilizado nas plantas de sinterização. Os pós coletados nas máquinas de síter, convertedores LD, silos de minério dos alto-fornos e incinerador são transportados para um pátio ao ar livre para secagem. Eles são utilizados de acordo com sua taxa de produção e misturados com a matéria-prima para a sinterização.

A mistura de pós é composta de: 35% de pó de aciaria LD, 31% de pó coletado nas máquinas de síter, 28% de pó das matérias-primas dos alto-fornos e 6% de pó do incinerador. A fração granulometria dos pós é 100% abaixo de 1mm.

Foram realizados experimentos em escala de laboratório em que a mistura de pós participou de 0 a 10% em intervalos de 2% da mistura a ser sinterizada. O estudo concluiu que, para até 4% de participação na mistura a ser sinterizada, os parâmetros de processo e qualidade não sofrem alterações.

Fonseca e Peres (1998) sugerem a utilização dos seguintes resíduos sólidos gerados na mineração e siderurgia no processo de sinterização: finos de minério de ferro, lama de aciaria, lama de alto-forno e pó de despoeiramento de aciaria. Os resíduos podem ser aproveitados no processo de sinterização, seja através de uma simples mistura e/ou pelos processos de aglomeração, seja por pelotização ou briquetagem.

Song (1998) comenta que, na China, praticamente toda usina integrada tem uma planta de sinterização. Desse modo o resíduo sólido produzido nos processos de fabricação do aço podem ser utilizados efetivamente no processo de sinterização.

Ametrano et al (1999) descrevem o processo de desenvolvimento da utilização de resíduos na sinterização da SIDERAR. A máquina de síter da SIDERAR tem 72,5m² de

área e capacidade de produção de 3.000t/dia. A geração anual de resíduos é de aproximadamente 280.000t. Os resíduos são: finos de pelotas, finos de minério, finos de sínter, escória de aciaria, lama de aciaria, sucata, pó do gás de alto-forno, lama de alto-forno e carepa de laminação. Os resíduos são classificados segundo sua origem e utilizados de acordo com as limitações do processo. O objetivo do trabalho foi maximizar a utilização dos resíduos mantendo a produtividade da máquina de sinterização e produzindo um sínter de qualidade com adição limitada de elementos nocivos à operação do alto-forno, como ZnO, álcalis e fósforo. Os limites do alto-forno são os seguintes: ZnO máximo de 0,12kg/t de gusa líquido, Na₂O + K₂O menor que 2,0kg/t de gusa líquido e o valor máximo de fósforo no gusa de 0,080%. Foram realizados testes em planta piloto onde foi evidenciada a necessidade de uma pré-mistura dos resíduos antes de sua dosagem na mistura a ser sinterizada. Um sistema de pré-homogeneização foi construído em 1995 e em 1997 se atingiu o máximo de participação de 26,21% de resíduos na mistura a ser sinterizada. A composição dessa pré-mistura de resíduos é a seguinte: finos de pelotas 13,71%, finos de sínter 21,34%, pó e lama de alto-forno 20,23%, carepa de laminação 10,12%, escória de aciaria 9,31%, sucata 4,40% e miscelânea 20,89%.

A produtividade da máquina de sínter aumentou de 37,1 para 38,4t/m².24h. A qualidade também apresentou melhoria, houve redução da variabilidade da basicidade binária, ocorreu um pequeno aumento do tamanho médio do sínter de 18 para 18,2mm, no *shatter test* observou-se uma grande melhoria de 86,8 para 88,1%, e o *RDI* melhorou de 25 para 20%. O consumo de coque foi reduzido de 49 para 32kg/t, devido ao carbono contido em alguns resíduos como o pó e a lama do alto-forno. Foi observada uma redução de 7% no custo do sínter produzido.

Cheng et al (2000) comentam que nos Estados Unidos da América a maioria das sinterizações utiliza resíduos do processo de obtenção do aço como parte das misturas a serem sinterizadas, para evitar o alto custo da disposição adequada de resíduos.

Moore et al (2000) descrevem a DK Recycling und Roheisen GmbH, que atua no negócio de reciclagem de resíduos siderúrgicos. Essa empresa processa cerca de 400.000t/ano de resíduos utilizando uma planta de sinterização e dois alto-fornos. A planta de sinterização

tem uma capacidade nominal para produzir 1.100t/dia de sinter; no processo é utilizado um tambor para pelotizar a mistura antes de ser carregada na máquina de sinter. Depois o sinter é carregado em dois alto-fornos que somam uma capacidade nominal para produzir 1.200t/dia de ferro gusa, que é comercializado na Europa para fundições.

Hartig (2002) comenta sobre o aumento da produtividade das máquinas de sinter da Rogesa Dillinger e destaca, como uma das ações, a escolha de minérios que promovem o aumento da permeabilidade do sinter e o uso de materiais reciclados da aciaria e altos-fornos.

3.3 Utilização de Finos no Processo de Sinterização

Errigo et al (1981) comentam que o tratamento da granulação é básico para a sinterização de minérios de ferro, pois, uma boa permeabilidade da camada de sinterização determina fortemente a taxa na qual o processo se desenvolve e conseqüentemente a produtividade da planta.

O objetivo do tratamento da granulação é aumentar o tamanho médio dos materiais que possuem alta quantidade de finos. O objetivo é atingido fazendo com que as partículas finas fiquem aderidas umas às outras e nas partículas grandes. O material granulado tem, desse modo, uma distribuição de tamanho de partículas mais estreita e contém menos finos que o material original. Como resultado, o material oferece menos resistência à passagem dos gases, por essa razão as propriedades fluido-dinâmicas da mistura a ser sinterizada são melhoradas.

Tambores rotativos são utilizados para a granulação das misturas de minério de ferro para sinterização. As variáveis principais para o controle do processo de sinterização são: as características geométricas do tambor (diâmetro e comprimento), inclinação dos eixos de rotação e velocidade de rotação.

Um método para avaliar a granulação das misturas de sinterização foi desenvolvido, onde uma amostra da mistura a ser analisada é colocada numa câmara fria a uma temperatura

de -20°C . Esse tratamento solidifica a água de umectação da mistura, dando aos grânulos resistência suficiente para que sejam submetidos ao ensaio de análise granulométrica. O tempo mínimo de peneiramento é de 10 minutos. Para evitar o descongelamento prematuro da mistura congelada durante o peneiramento, o conjunto de peneiras é colocado em um container de metal de parede dupla, que é mantido a baixa temperatura com gelo que é colocado entre as paredes.

Em resumo, o procedimento do teste é o seguinte:

Um quilograma de amostra da mistura é colocado em uma bandeja de metal que é colocada na câmara fria a -20°C por 30 minutos a 60 minutos. Depois a amostra é transferida para o conjunto de peneiras que também estava na câmara fria. A operação de peneiramento é realizada com uma frequência de 3.000 vibrações por minuto, por 10 minutos; durante esse período o conjunto de peneiras deverá ser mantido a baixa temperatura através da utilização de gelo no container. A determinação da distribuição granulométrica é feita pela pesagem das frações individuais retidas nas peneiras e no fundo. Repetidos ensaios foram realizados e mostraram a boa reprodutibilidade do teste.

Roller (1982) comenta que a distribuição granulométrica dos *sinter feeds* está atraindo considerável interesse devido à sua importância no processo de granulação. Três fatores têm uma forte influência na natureza e no grau de aderência das partículas: a quantidade de material super fino na mistura a ser sinterizada, a microestrutura do núcleo das partículas e a umidade da mistura a ser granulada.

Fujii et al (1990) comentam que para utilizar uma maior quantidade de *pellet feed*, que possui menor quantidade de ganga, foi desenvolvido na Kawasaki Steel Corporation um equipamento chamado de vibrador granulador. Ele foi instalado na planta de sinterização N°4 na usina de Mizushima. O sistema é composto por um misturador e dois granuladores, a capacidade de produção é de 120t/h, que equivale a 20% do consumo de material da máquina de sinter. O misturador é um tambor com 1m de diâmetro e 2,8m de comprimento e é equipado internamente com 20 barras. A velocidade de 1.200rpm fornece uma capacidade de processamento de 120t/h. Os dois granuladores são tambores com 1m de diâmetro e 3,6m de comprimento. A velocidade pode ser controlada entre 650

a 1.350rpm usando um inversor de frequência, a capacidade de processamento é de 60t/h por granulador. O ângulo de inclinação do misturador e dos granuladores pode ser ajustado entre 0 a 5° com a horizontal, permitindo o controle do tempo de residência do material, que tem efeito sobre a distribuição granulométrica e a resistência das pelotas verdes. O material granulado com um diâmetro de 5mm é misturado com os 80% restantes da mistura em um tambor misturador e daí o material é carregado na máquina de sínter. Com a utilização desse equipamento foi possível elevar a participação de *pellet feed* na mistura a ser sinterizada de 5 para 20%, mantendo-se a mesma produtividade, consumos e qualidade do sínter.

Kawaguchi (1990) comenta sobre o processo de granulação separada com CaO que foi aplicado em uma nova linha de granulação com um novo tipo de misturador na planta de sinterização N° 2 na usina de Kashima da Sumitomo Metal Industries Ltd. Esse método é efetivo para melhorar o *RDI* e a permeabilidade do leito de sínter, diminuir o consumo de coque e melhorar o *tumble index* e o *RI* com o aumento da altura do leito. Esse processo é efetivo para tratar minérios de ferro com baixo teor de SiO₂ ou minérios finos como *pellet feed*.

O processo de granulação separada requer duas linhas de granulação nas plantas de sinterização. Entretanto, esse processo permite o uso de uma variada gama de materiais sem mudanças na quantidade de CaO do sínter.

Dutta et al (1992) enfocam a utilização de *clinker* ou uma mistura de escória de alto-forno e *clinker*, substituindo de 40 a 50% de cimento portland comum, na produção de pelotas de cura a frio, possibilitando a utilização de finos e minério de ferro.

Loo (1992) comenta que a estrutura de um grânulo de minério de ferro é basicamente formada por um núcleo com uma partícula grande, revestida de partículas finas aderentes. Devido ao fato de uma típica mistura de sinterização consistir de partículas grandes de minério, fluxante e combustível, grânulos com diferentes tipos de núcleos são formados durante a granulação. Uma estimativa baseada na distribuição granulométrica típica de uma mistura de sinterização da BHP sugere que ela consista de 50% de grânulos de

minério, 35% de grânulos de retorno de finos de sinter, 11% de grânulos de fluxantes e 4% de grânulos de coque.

Bentes et al (1993) comentam sobre a elevação da proporção de superfinos ($\% < 0,1\text{mm}$) de 12 para até 23%, contribuindo para a elevação da produtividade das sinterizações, considerando que tal elevação de superfinos do *sinter feed* foi obtida com a participação de minério com melhores propriedades de aglomeração a frio e a quente.

Dawson (1993) afirma que o estágio de granulação é o mais importante em todo o processo de sinterização, pois a distribuição do tamanho dos grãos é diretamente relacionada com a permeabilidade do leito e a produtividade. É possível “projetar” o tipo de grão desejado, através da mistura de matérias-primas, e produzir uma microestrutura mineral específica. Partículas de forma irregular como finos de retorno, finos de coque e minério de ferro goetítico são melhores nucleantes que superfícies regulares e polidas como calcário e hematita compacta.

As matérias-primas constituem mais que 80% do custo do sinter, logo muitos produtores têm procurado aumentar a utilização de minérios de baixo custo como concentrados, *pellet feed*, minérios limoníticos, pós e lamas. Materiais finos criam problemas no processo de sinterização por causarem um decréscimo da permeabilidade e da produtividade. Conseqüentemente técnicas de granulação estão sendo desenvolvidas para esses materiais.

Além disso, para melhorar a aglomeração pela otimização da adição de água e do tempo de residência em tambores e discos, muita atenção está sendo focada na utilização de aglomerantes como cal e bentonita. Tradicionalmente cal tem sido utilizada para elevar taxas de sinterização, facilitando a utilização de camadas mais altas e permitindo a utilização de minérios mais finos.

Com o objetivo de melhorar a permeabilidade das misturas a sinterizar contendo grandes proporções de minérios finos, diversas empresas japonesas estão investigando processos de granulação seletiva ou pré-aglomeração. Na maioria dos casos, está envolvido o

tratamento dos minérios finos e concentrados, finos de retorno e cal separadamente, usando uma linha de processo adicional. Esses materiais são misturados com água e micropelotizados em tambores ou em discos. O produto dessa etapa é introduzido no circuito de granulação principal antes do tambor principal de granulação.

Loo et al (1994) comentam que a permeabilidade da camada a ser sinterizada é o principal fator determinante da taxa na qual a frente de ignição avança no sentido da parte inferior da camada nos primeiros estágios da sinterização. A permeabilidade da camada a ser sinterizada é predominantemente controlada pelo processo de granulação. Os fatores que influenciam o comportamento da granulação de um material são: porosidade, distribuição granulométrica, formato da partícula e rugosidade da superfície do minério.

Penny, Witchard e Loo (1996) discutem o aumento da performance de sinterização com misturas contendo minérios porosos sem o aumento de umidade na mistura, com a utilização de açúcar no processo de granulação. A adição de uma solução com 10% em peso de açúcar proporcionou um grande aumento da produtividade, sugerindo que a solução de açúcar sela os poros do minério e aumenta a disponibilidade de água para a adesão inter-partículas.

Loo (1998) afirma que o comportamento da granulação de uma mistura para sinterização vai determinar a estrutura e a composição dos grânulos formados e esses vão influenciar as reações de sinterização. Yang e Jelenich (2002) comentam que a granulação é muito importante porque determina a produtividade e a performance do processo de sinterização.

Litster e Waters (1988) afirmam que a granulação da mistura a ser sinterizada é um passo chave para a totalidade do processo de sinterização. A distribuição granulométrica do produto da granulação afeta fortemente a permeabilidade e, por consequência, a produtividade e a qualidade do sinter.

Matsumoto et al (1988) comentam o aumento na altura da camada a sinterizar na máquina de sinter N°4 na usina de Mizushima, da Kawasaki Steel Corporation. A camada

foi elevada de 530 para 730mm, com o aumento da qualidade do sinter e redução do consumo de energia. Foi usada cal como aglomerante que resultou em uma melhor granulação das partículas finas. A velocidade do misturador foi reduzida de 5,2 para 2,6rpm, que resultou em um aumento de 5% no tamanho das quasi-partículas. A inclinação do chute de alimentação foi modificada de 45 para 57° aumentando a segregação da mistura a ser sinterizada. Com a nova operação o consumo de coque foi reduzido em 5,1kg/t, o consumo de gás combustível foi reduzido em 2.600kcal/t, o consumo de energia elétrica foi reduzido em 1,1kWh/t e o consumo total de energia foi reduzido em 36.100kcal/t. Em termos da qualidade do sinter, o *shatter index* aumentou de 90,8 para 92,4%, o RDI aumentou de 33,9 para 34,2% e o FeO reduziu de 7,9 para 7,1%.

Oboso et al (1998) comentam sobre o processo de granulação seletiva adotado na planta de sinterização N°4, na usina de Wakayama da Sumitomo Metal Industries, Ltd. Convencionalmente, a matéria prima fina e a grossa são granuladas em um tambor misturador. Entretanto, o material fino tem pouca afinidade pela água, logo no processo convencional é difícil de se obter uma distribuição de água uniforme, que é importante no fenômeno da granulação. Material muito fino diminui a produtividade por diminuir a permeabilidade.

Dentro dessas circunstâncias, foi feito um estudo básico do processo de granulação de material fino e foi obtido o conhecimento do Equipamento de Granulação Separada, onde um misturador agitador de alta velocidade é mais adequado para a granulação de material fino. Baseado nisso, o Equipamento de Granulação Separada com um misturador agitador de alta velocidade foi introduzido na planta de sinterização N°4. Como consequência da melhor granulação houve um aumento da velocidade da frente de chama de 10 a 12%, resultando em um aumento da produtividade de 8 a 10%.

No novo processo o material fino, que participa em 20% da mistura a ser sinterizada, passa primeiro por um misturador agitador de alta velocidade, depois em um misturador de tambor para depois ir para o misturador de tambor secundário onde vai se encontrar com o material mais grosso que participa com 80% na mistura a ser sinterizada que

passou anteriormente por um misturador de tambor. Após passar pelo misturador de tambor secundário o material é carregado na máquina de sinterização.

Yang e Witchard (1998) afirmam que a granulação é um importante processo na sinterização, porque a distribuição dos grânulos está diretamente relacionada com a permeabilidade do leito e conseqüentemente com a produtividade. A granulação é normalmente executada em um tambor rotativo com adição controlada de água. Na mistura a sinterizar, as frações de tamanho mais fino são classificadas como finos aderentes enquanto as frações de tamanho maior são classificadas como partículas nucleantes. As frações de partículas com tamanho intermediário são de difícil granulação e não possuem um papel definido. Dependendo do nível de umidade, elas podem atuar como finos aderentes ou como partículas nucleantes. Normalmente é aceito que a quantidade de partículas intermediárias deve ser mínima e seu efeito na permeabilidade da mistura acontece de duas maneiras: como nucleante, essas partículas decrescem o tamanho médio dos grânulos e como finos aderentes elas estão fracamente ligadas e são facilmente desagregadas da superfície na secagem dos grânulos. Quando água é adicionada, as partículas finas aderem imediatamente nas intermediárias e nas partículas nucleantes grandes. Em quedas posteriores, algumas das partículas intermediárias mudam de papel de nucleantes para partículas aderentes e aderem em partículas nucleantes maiores. O segundo estágio é um lento processo o qual envolve numerosas colisões. Eventualmente, um estado estável é alcançado entre as colisões no qual as partículas deslocadas da camada aderente se aderem nas partículas nucleantes. Nesse ponto, a máxima distribuição estável de tamanho é estabelecida. Portanto, partículas de forma irregular, como finos de retorno, finos de coque e minério de ferro goetítico, são bons nucleantes, enquanto as superfícies lisas e uniformes do calcário, hematita especular etc., não são.

Zhang et al (1998) comentam que, em 1959 (Shinong e Yunjiang, 1960), da Anshan Steel, realizaram testes de sinterização com micro pelotas. Utilizaram 100% de concentrado da Anshan Steel como matéria prima. Empregaram tambor e disco para a granulação e realizaram um teste de sinterização em uma máquina piloto. O efeito de cada fator da sinterização foi investigado. Esses fatores incluíram parâmetros de

granulação, tamanho das micro pelotas, altura da camada, sucção, adição de combustível etc. Os resultados dos testes mostraram que a sinterização de micro pelotas podia aumentar a produtividade em 15%. De acordo com esses resultados, experimentos industriais foram realizados nas plantas de sinterização N° 1 e N° 2 da Anshan Steel e na planta de sinterização da Donganshan, em 1960. Disco extra ou aumento do comprimento do tambor foram empregados nos experimentos para intensificar a granulação. Como resultado, a parte menor que 1,5mm na mistura decresceu de 8 a 12%, a produtividade aumentou de 5 a 10%, e a resistência ao tamboramento aumentou em 2 pontos percentuais.

Em 1979, foram realizados no Maanshan Iron & Steel Design Institute, testes (Jingming, 1980) piloto com 100% de concentrado com cal hidratada ou calcário fino e finos de coque. Os resultados mostraram um aumento da produtividade de 35%, comparado com um processo de sinterização comum, a pressão de sucção decresceu em 23%, a taxa do ar de sucção decresceu em 17% e o consumo de energia do sistema de sucção em 22%.

Em 1990, baseada no sucesso dos testes de laboratório, a Anshan Steel realizou testes industriais na máquina de sinterização de 16m² e no alto-forno de 55m³. Nos testes o concentrado foi granulado em dois tipos de micro pelotas, uma de alta basicidade e outra ácida. Antes da sinterização elas foram misturadas com combustível e finos de retorno. Os resultados foram excelentes: a produtividade foi de 1,286t/m²/h, correspondendo a um aumento de 27,96%, o consumo de combustível sólido foi reduzido de 88,46kg/t para 53,03kg/t, o que representa um decréscimo de 34,92%, no alto-forno o *coke rate* foi reduzido em 6,4% e a produção de ferro gusa foi aumentada em 14,6%.

Bastos et al (1999) comentam sobre o ISF (*Intensified Sifting Feeder*), equipamento que tem a função de intensificar a segregação granulométrica e química da mistura ao longo do leito de sinterização, promovendo elevações na permeabilidade da mistura, na resistência e no rendimento do sinter.

Pimenta et al (1999) mostram a experiência da USIMINAS na caracterização e avaliação de minérios de ferro para sinterização, utilizando-se de recursos laboratoriais com ênfase

na simulação piloto do processo. Os resultados dos testes piloto de sinterização são bastante confiáveis uma vez que a simulação ocorre sem redução de escala e, assim sendo, as tendências são facilmente reproduzidas.

Song (1999) descreve os progressos da tecnologia de sinterização na China, onde nos recentes anos o principal progresso tecnológico tem se focado na prática da sinterização a baixa temperatura. Há dez anos a TianJin Iron Works e a MeiShan Metallurgical Co. praticam a sinterização a baixa temperatura, pela elevação da camada e a redução do consumo de combustível sólido. Essa mudança no método de sinterização trouxe melhoria da qualidade, economia de energia e aumento da produtividade. Atualmente mais plantas de sinterização, onde mais finos são utilizados, estão praticando a sinterização a baixa temperatura.

Onde o processo de sinterização usa alta percentagem de finos de minério em vez de concentrados, a sinterização a baixa temperatura pode ser praticada facilmente. Mas na China a maior parte das plantas de sinterização usam alta percentagem de concentrados na mistura. O baixo nível de finos de minério no processo de sinterização leva a uma baixa permeabilidade, baixa produtividade, elevado consumo de combustível, elevado teor de FeO e baixa redutibilidade. Portanto, tem que se focar em como melhorar a sinterização de concentrados. Baseado no sucesso de testes de laboratório, algumas técnicas têm sido desenvolvidas. Por exemplo, a Anshan Steel conduziu testes industriais de sinterização com a pelota dupla, em uma máquina de síter de 16m^2 , onde os concentrados foram granulados em dois tipos de pequenas pelotas, uma com super alta basicidade, outra pelota ácida, as quais depois são misturadas com combustível e finos de retorno antes da sinterização. Esse teste mostrou que a técnica da granulação intensificada promete solucionar o problema dos concentrados na sinterização.

Depois que várias técnicas para intensificar a granulação foram testadas e praticadas, a sinterização de pequenas pelotas está sendo desenvolvida para solucionar o problema da sinterização de concentrados. Esse processo tem as seguintes características principais: (1) granulação intensificada: a fração $> 3\text{mm}$ de pelotas na mistura após a fase de misturamento é maior que 80%; (2) adição de combustível separada: a proporção de

combustível adicionada na superfície das pelotas é de 70-80%; (3) alta camada; (4) distribuição da mistura segregada. O novo processo de sinterização de pequenas pelotas para concentrados melhora todo o processo de sinterização para concentrados significativamente. AnShan Steel, ShouGang e Jinan Steel já adotaram estas técnicas. O aumento do teor de água durante a granulação torna as pequenas pelotas mais plásticas com tendência a se deformarem, e isso leva ao decréscimo dos vazios do leito e grandes influências na permeabilidade. Portanto, esse problema foi solucionado com o pré-aquecimento das pequenas pelotas.

Na JiuQuan Iron and Steel Co., o concentrado local não pode ser utilizado como matéria-prima para pelotas. Nessa área é difícil de se obter *lump* e pelotas devido a longas distâncias de transporte. Então, há longo tempo, JiuQuan Iron and Steel Co. usa sínter auto-fundente no alto-forno. Com o objetivo de melhorar a constituição da carga metálica, parte do sínter é feito como sínter ácido. Mas geralmente os sínteres ácidos têm baixa qualidade. O *Central Iron and Steel Research Institute* e a JiuQuan Iron and Steel Co. desenvolveram a técnica de produzir sínter ácido ($B_2 = 0,35-0,45$) em uma máquina de sínter convencional de 130m². Essa técnica transforma a mistura a ser sinterizada em pelotas e coloca as pelotas na esteira de sinterização. Os resultados da operação são satisfatórios.

Saito (1999) comenta que a Nippon Steel desenvolveu a tecnologia “*Selective Granulation*” que processa separadamente minérios finos e minérios grossos. O minério fino é peneirado e a fração superior a 3mm é enviada diretamente para os silos de dosagem. A fração inferior a 3mm é direcionada para um misturador de alta velocidade onde recebe aglomerante e água. Depois a mistura é encaminhada para um disco pelletizador onde ela é transformada em micro pelotas com granulometria entre 2 a 5mm. As pelotas são estocadas em silos para posteriormente serem misturadas com as frações mais grossas de minério em dois misturadores de tambor. Depois a mistura é encaminhada para a máquina de sínter.

Essa tecnologia aumentou a capacidade de sinterização pelo aumento da capacidade de granulação, possibilitando a utilização de minérios finos que possuem preço inferior ao

sinter feed comum. A Nippon Steel instalou essa tecnologia nas siderúrgicas localizadas em Oita e Yawata. Além de reduzir o consumo de energia, houve uma redução de 10% nas emissões de NO_x , SO_x e CO_2 , resultantes da combustão dos combustíveis do processo de sinterização.

De acordo com Yang e Davis (1999), a incorporação de finos de sinterização é um importante aspecto no processo de sinterização. A incorporação depende do tipo de minério, nível de ganga no minério, porosidade do minério, temperatura de sinterização e composição da mistura.

Haga et al (2000) descrevem o método de granulação seletiva instalado na máquina de sinter N^o2 na usina de Oita da Nippon Steel Corporation. Primeiro o minério fino é classificado em uma peneira. O minério de tamanho superior a 3mm é retornado para linha convencional de sinterização, a porção inferior a 3mm levada para um misturador onde recebe água, essa mistura é então direcionada para um disco de pelotização, o minério pelotizado é direcionado para a linha convencional. O minério de tamanho superior a 3mm e o minério pelotizado são alimentados em um misturador de tambor junto com os outros minérios, fluxantes e finos de coque. Com a adoção do método de granulação seletiva houve uma redução do consumo de finos de coque de 3,8kg por tonelada de sinter, redução de 3,8kWh/t de sinter no sistema de sopro e um aumento de produtividade de 0,5t/dia/m². Na qualidade do sinter houve uma redução de cerca de 1,1% no teor de FeO, que é um indicador da redutibilidade do sinter. A melhoria da redutibilidade resultou em uma redução do consumo de coque no alto-forno. Esse método é importante não só para a economia de energia mas também para permitir a utilização de outras fontes de minério de ferro.

Nandy e Gupta (2000) relatam um processo desenvolvido na Tata Steel para propiciar a utilização de finos com baixos teores de alumina. Com o objetivo de reduzir o teor de Al_2O_3 no sinter, melhorando suas características, utilizando finos com baixo teor de Al_2O_3 , é proposta a técnica de granulação em dois estágios. No primeiro estágio, parte do material fino recebe 8% de cal e 10% de água e é pelotizado, produzindo *micropellets*. No segundo estágio, as *micropellets* são misturadas com o *sinter feed* normal. A

sinterização desse material granulado resulta em uma alta produtividade da sinterização, melhoria da redutibilidade do sinter e redução da degradação. Essa técnica possibilitou a utilização de 20% de finos com baixa alumina, correspondendo a uma redução de alumina no sinter de 2,62% para 2,47%.

Pimenta et al (2000) comentam que, com a implantação do sistema ISF de segregação de misturas nas máquinas de sinterização da Usiminas, elevações substanciais de permeabilidade do leito foram obtidas, com o conseqüente aumento na vazão e redução da depressão das máquinas de sinter. Isso permitiu, de imediato, a elevação da altura de camada da mistura em mais de 15%, com ganhos de rendimento e redução de combustível.

Kong et al (2002) descrevem a experiência do uso de concentrados de magnetita na Shougang Mining Company onde, para intensificar a granulação do sinter, no segundo misturador, o ângulo de inclinação foi reduzido de 1,5 para 0,98° e a velocidade de rotação foi aumentada de 7,5 para 10,8rpm. Com essas modificações houve uma melhoria da distribuição granulométrica da mistura, ilustrada na tabela 3.2.

TABELA 3.2 – Distribuição granulométrica da mistura antes e depois da modificações.

(Kong et al, 2002)

Tamanho	> 10mm	<10 >7mm	< 7 > 5mm	< 5 > 3mm	< 3mm
Antes (%)	3,6	12,1	21,7	24,6	38,0
Depois(%)	2,3	19,7	27,6	28,7	21,7

Pammer et al (2002) afirmam que a produção de um sinter de alta qualidade depende em alto grau da composição química das matérias-primas, especialmente com respeito ao teor de ganga, da água intersticial e da relação CaO/SiO₂ da mistura para sinterização. O tamanho de grão da partícula é um parâmetro importante. Investigações mostram que o consumo de combustível da máquina de sinter e o teor de FeO do sinter aumentam quando há o aumento da proporção de partículas com tamanho de grão < 0,1mm e > 8mm. O tamanho de grão máximo para os aditivos deve ser limitado a aproximadamente 2mm, quando os alvos são a resistência do sinter, a redutibilidade e a porosidade. Uma

alta e uniforme permeabilidade permite um aumento da altura do leito da máquina de sinter com redução do consumo de combustível.

Sakamoto (2002) comenta que cada vez mais no Japão serão utilizados finos de minério nas misturas de sinterização, devido à diminuição das reservas de *sinter feed*. Mas afirma que, para manter a permeabilidade do leito de sinterização utilizando finos de minério, é necessário melhorar a granulação da mistura antes do processo de sinterização. Anteriormente a produtividade máxima de uma operação de sinterização dependia principalmente da eficiência da combustão. Atualmente, a permeabilidade do leito limita a produtividade.

Formoso et al (2003) comentam que granulação é um estágio muito importante no processo de sinterização, uma vez que a eficiência da granulação vai influenciar na permeabilidade do leito e na taxa de fluxo de ar através do leito, na taxa da frente de queima e no perfil térmico do leito.

O comportamento da granulação de uma mistura particular de minérios vai determinar a estrutura e a composição dos grânulos formados, e esses por sua vez vão influenciar as reações de sinterização. O comportamento da granulação é um importante fator em cada estágio da sinterização.

Os primeiros estudos sobre a estrutura da granulação de misturas de minérios de ferro foram conduzidos por pesquisadores da Nippon Steel Corporation, que criaram o termo quasi-partícula. Partículas $>0,7\text{mm}$ atuam como nucleantes enquanto partículas $<0,2\text{mm}$ atuam como finos aderentes. Partículas intermediárias são difíceis de granular e não possuem um papel definido no processo de granulação.

Os autores estudaram a boa formação da granulação de minérios de ferro ou de suas misturas, para isso determinaram o índice de granulação, metodologia que está sendo aplicada pela ACERALIA, recentemente. Foram testados os 30 tipos de minério de ferro utilizados na sinterização da ACERALIA, que foram classificados em quatro gupos de acordo com o seu índice de granulação. Depois misturas foram estudadas com esses

grupos de minérios de forma a otimizar a produtividade, diminuir o consumo de combustível e elevar a qualidade do sinter. A produtividade foi elevada de 30 para 38t/m²/24h, o consumo de coque foi reduzido de 50 para 34kg/t de sinter, o RDI(<3mm) de 32%, *tumble index* (>6,3mm) entre 74 e 77% e a redutibilidade entre 69 e 80%.

Schwalm e Gerlach (2003) comentam que finos de minério podem ser utilizados no processo de sinterização, para elevar o teor de ferro na mistura de sinterização e diminuir o teor de ganga, o que resulta em um baixo consumo de energia no alto-forno. O uso direto de elevadas quantidades de finos na mistura de sinterização, sem nenhum pré-tratamento, poderá causar uma queda drástica na produtividade, devido à redução da permeabilidade do leito de sinter. Portanto o material fino deverá ser granulado (micro-pelotizado, com diâmetro entre 2 a 10mm) em uma etapa separada do processo e depois adicionado ao restante dos constituintes da mistura a ser sinterizada.

Os autores fazem uma descrição geral do processo onde o fino granulado (micro-pelotizado) em uma etapa separada do processo é combinado com o restante dos constituintes da mistura a ser sinterizada.

A mistura final tem lugar no tambor nodulizador anterior à alimentação da mistura a sinterizar na máquina de sinter. Para evitar a desintegração da mistura granulada no tambor de nodulização o material é alimentado na última seção do tambor.

O carregamento de somente pós das sinterizações e de outras etapas da fabricação do aço, sob a forma de granulados na mistura de sinterização, permitiu economia de energia e aumento da produtividade devido à melhoria da permeabilidade do leito de sinter em duas máquinas de sinter da China Steel.

Processo de granulação com tambores de pelotização: de silos individuais de finos de minério, aditivos, coque e de pós, cada material é extraído nas respectivas quantidades e transportado para a área de mistura onde é intensivamente misturado e umidificado com aproximadamente 90% da umidade requerida. Do misturador o material é descarregado em transportadores para atingir a área de granulação onde são distribuídos nos

alimentadores da instalação de granulação. A maior parte dos grânulos produzidos nos tambores de pelotização têm entre 2 a 6mm de diâmetro. Os grânulos produzidos são transportados até os tambores de mistura/nodulização, onde são combinados com a parte grossa da mistura de sinterização.

Granulação com discos de pelotização: como uma alternativa aos tambores de pelotização, discos de pelotização podem ser instalados. Os procedimentos de mistura e transporte dos finos de minério são idênticos ao descrito acima. Cada disco de pelotização é equipado com sistema de *spray* de água e raspadores para produzir micro pelotas adequadas ao processo de sinterização.

A Lurgi adquiriu experiência em carregar *pellet feed* e concentrados nas misturas de sinterização em vários projetos. O uso de 15 a 20% de grânulos de *pellet feed* em uma mistura de sinterização não é problemático quando esse material é carregado em uma máquina de sínter. Com grandes quantidades de grânulos de *pellet feed* não é possível utilizar o sistema usual de silos de alimentação, porque os grânulos vão se desintegrar nos silos. Para quantidades acima de 15 a 20%, um sistema de correias transportadoras largas deve ser considerado.

3.3.1 Processo HPS (*Hybrid Pelletized Sinter*)

Kurosawa et al (1989) comentam que, na NKK, o custo de minério de ferro, calcário e cal compreendem aproximadamente 80% do custo do sínter. Conseqüentemente, reduzir o custo do sínter será possível com a utilização de super-finos de minério de ferro de baixo custo. Entretanto, uma utilização excessiva de super-finos diminui a permeabilidade do leito durante o processo de sinterização, e resulta no decréscimo da produtividade. Para superar esse problema a NKK adotou o processo de micropelotização – HPS (*Hybrid Pelletized Sínter*), na sua sinterização número 5 de Fukuyama, em 1988, com pré-granulados de super-finos de minério de ferro como *pellet feed* através de uma linha de processo adicional. Nesse processo os finos de retorno são utilizados como partículas nucleantes. Em comparação com o processo convencional, esse novo processo apresenta os seguintes aspectos: uma grande quantidade de minérios super-finos pode ser

utilizada, a pré-granulação é feita em discos de pelotização e subseqüentemente o material granulado recebe um *coating* de fino de coque em um misturador de tambor. Nesse processo a pressão de sucção é muito baixa, o perfil de temperatura é relativamente uniforme através do leito e a combustibilidade do coque fino é melhor, em comparação com o processo convencional. O novo processo permite uma utilização de 40 a 50% de *pellet feed* no blend de *sinter feeds*. O índice de redutibilidade baseado na norma JIS está consistentemente acima de 65%. O retorno de finos anterior de 300kg/t foi reduzido para 150 a 200kg/t. O consumo de energia foi reduzido para 300.000kcal/t sinter.

Niwa et al (1990) comparam o processo HPS (*Hybrid Pelletized Sinter*) com o processo convencional, na NKK. A produtividade aumentou 0,05t/m².h, o minério fino abaixo de 125µm na matéria-prima aumentou em 40%. O consumo de coque foi reduzido em 5kg/t, devido à melhoria no coque de combustão que passou a ser adicionado no *coating* das pelotas. Aumento da eficiência de combustão é comprovado pelo decréscimo da quantidade de CO no gás de exaustão. Houve uma redução do teor de SiO₂ do sinter de 5,15% para 4,61%, o índice de tamboramento passou de 67,4% para 68%, o índice de redutibilidade de 65,2% para 71,6% e o índice de degradação após redução reduziu de 44,5% para 43,5%.

Com a comprovação da superioridade do HPS, a carga dos alto-fornos N°4 e N°5 de Fukuyama alcançaram 70% de HPS e 30% de sinter comum, do total de 80% de carga aglomerada utilizada. O alto-forno N°5 aumentou sua produção diária de 9.700t para 10.300t, a produtividade passou de 2,08t/m³/dia para 2,21t/m³/dia, o *fuel rate* foi reduzido de 517,5kg/t para 505,0kg/t e a quantidade de escória foi reduzida de 327kg/t para 309kg/t.

Niwa et al (1993) comentam o sucesso da planta de HPS, da NKK, em Fukuyama, que tem a capacidade de produção anual de 6.000.000t, área de 550m² e produtividade de 1,38t/m².h.

Comparado com o processo de sinterização tradicional, o processo HPS tem como principal diferença: o fato de pelotas cruas serem mais esféricas que as quasi-partículas.

Desde que a superfície das pelotas é coberta por finos de carvão, as pelotas não grudam umas nas outras. Não existe silo pulmão no carregamento, o que reduz a quantidade de pelotas quebradas.

A operação dos alto-fornos utilizando maior quantidade de HPS na carga demonstra que a redução do volume de escória e do consumo de combustível, e a alta produtividade de gusa, são atingidas devido ao baixo teor de ganga dos materiais e à alta redutibilidade do HPS.

Sakamoto et al (1997) descrevem uma experiência realizada na planta de sinterização número 4 da NKK, em Fukuyama, onde uma mistura de sinterização contendo finos de minério, *sinter feed*, calcário e coque foi granulada em um misturador com adição de água, formando quasi-partículas. Depois as quasi-partículas passaram por um segundo misturador onde foi realizado um *coating* utilizando uma mistura de *pellet feed* e coque. A composição da mistura é a seguinte: finos de minério 50%, *sinter feed* 40%, calcário 15,7%, coque 1,7%, *pellet feed* 10% (adicionado ao *coating*) e coque 2,1% (adicionado ao *coating*). Ocorreu uma melhoria das seguintes características de qualidade do sinter: índice de tamboramento, índice de redução e índice de degradação após redução.

Okochi et al (2000) comentam que atingiram uma taxa de injeção de carvão de 266kg/t no alto-forno N°3 da usina de Fukuyama, devido à utilização de 100% de sinter HPS na carga. A carga anterior era de 77% de sinter (30% de sinter HPS e 70% de sinter convencional), 13% de pelotas e 10% de minério granulado e a nova carga 75% de sinter (100% de sinter HPS), 15% de pelotas e 10% de minério granulado. O sinter HPS possui baixo teor de SiO₂, melhores redutibilidade e propriedades de amolecimento e fusão. O volume de escória foi reduzido de 310 para 260kg/t.

Sakai et al (2001) apresentam o processo HPS (*Hybrid Pelletized Sinter*), desenvolvido pela NKK, do Japão, para produzir sinter de alta qualidade com baixo teor de escória utilizando *pellet feed* contendo alto teor de ferro e baixo teor de ganga. O processo é um misto de sinterização e pelotização, que permite a utilização de *pellet feed* em máquinas

de sinter com ganhos de produtividade e qualidade. A usina da Belgo Mineira de Monlevade instalou em 2002 esse processo, que só existia em operação na usina de Fukuyama, da NKK.

O Iron Ore Manual (2003) mostra a tecnologia *Hybrid Pelletized Sinter* (HPS), desenvolvida pela NKK, que tem um custo menor que o sinter ou pelotas. O processo permite o uso de uma ampla faixa de tamanho de partículas de minérios de ferro, incluindo minério fino, no processo de sinterização. Com o uso de discos de pelotização o minério fino é transformado em pelotas cruas com diâmetro entre 5 a 10mm. Posteriormente, em um tambor, as pelotas cruas são recobertas com uma camada de carvão com uma espessura de 1mm. Depois as pelotas são carregadas na máquina de sinter do mesmo modo que em uma máquina de pelotização. A ignição, sinterização e o tratamento do sinter são conduzidos quase da mesma maneira que era adotada no passado. Os principais efeitos são: com a transformação das matérias primas em pelotas com diâmetro entre 5 a 10mm, a permeabilidade do leito é bem superior em comparação com a sinterização convencional e a taxa de carvão pode ser reduzida. Por isso, o rendimento do sinter é melhorado. A forma do sinter do HPS não exerce fatores adversos na carga de matérias primas do alto-forno. O processo HPS fornece ao sinter uma excelente qualidade micro-estrutural, o que contribui para bons índices de RI e RDI. Como resultado, as condições do alto-forno são melhoradas com o uso do *hybrid pelletized sinter*.

3.4. Produção Mundial de Sinter

The Annual Outlook for Iron Ore (2003) comenta que em termos globais o consumo de sinter continua a se expandir. Entretanto essa expansão não ocorre em todo o mundo, está mais confinada na Ásia. Nas regiões economicamente desenvolvidas o consumo está estável. Isso reflete a estabilidade na capacidade de produção de sinter, pois somente duas plantas fecharam (AK Steel e Nakayama Steel) nos Estados Unidos e Japão nos últimos 12 meses. As plantas de sinter tendem a ser operadas próximas da capacidade máxima. As plantas de sinter operadas na Europa, Japão e Estados Unidos têm experimentado um

aumento da produtividade. Segundo análises a produtividade das plantas de sinter da Europa nos anos 90 aumentou em cerca de 1,45% ao ano.

Na Ásia, excluindo o Japão, continua ocorrendo um aumento do consumo de sinter. A China experimenta um forte crescimento no consumo de sinter, onde a carga dos altos-fornos já recebe cerca de dois terços de sinter. Na Índia também há um crescimento da produção. No fim de 2004 a Tata Iron and Steel vai colocar em operação uma planta com a capacidade de produção de 2.300.000t/ano. A tabela 3.3 mostra a capacidade nominal das principais plantas de sinter do mundo.

TABELA 3.3 – Capacidade nominal das principais plantas de sinter do mundo em 2003.

The Annual Outlook for Iron Ore (2003).

País	Empresa	Localização	Capacidade (x1.000tpa)
África do Sul	Iscor	Newcastle	2.300
África do Sul	Iscor	Vanderbijlpark	2.052
Alemanha	Dillinger Huttenwerke	Dillingen	5.000
Alemanha	Arcelor	Eisenhüttenstadt	2.600
Alemanha	HKM	Huckingen	5.000
Alemanha	Salzgitter AG	Salzgitter	2.500
Alemanha	Arcelor	Bremen	2.100
Alemanha	Thyssen Krupp Stahl	Schwelgem	11.500
Argentina	Siderar	San Nicolas	1.200
Austrália	BHP	Port Kembla	5.400
Austria	Voest Alpine Stahl	Donawitz	1.500
Austria	Voest Alpine Stahl	Linz	2.300
Bélgica	Arcelor	Chertal	5.900
Bélgica	Arcelor	Marcinelle	2.350
Bélgica	Sidmar	Gent	6.100
Brasil	Açominas	Ouro Branco	4.340
Brasil	Belgo-Mineira	Monlevade	1.100
Brasil	Cosipa	Cubatão	5.000
Brasil	CSN	Volta Redonda	6.350

País	Empresa	Localização	Capacidade (x1.000tpa)
Brasil	CST	Vitória	6.500
Brasil	Usiminas	Ipatinga	5.950
Bulgária	Kremikovtzi	Sofia	3.000
Canadá	Stelco	Hilton	497
Colômbia	Acerias Paz del Rio	Belencito	400
Coreia do Sul	Posco	Kwangyang	19.500
Coreia do Sul	Posco	Pohang	13.835
Egito	Hadisolb	Helwan	3.000
Eslováquia	US Steel Kosice	Kosice	4.500
Espanha	Arcelor	Aviles	5.000
Estados Unidos	AK Steel	Middletown	907
Estados Unidos	ISG Burns Harbor	Burns Harbor	2.700
Estados Unidos	ISG Sparrows Point	Sparrows Point	3.600
Estados Unidos	ISG Indiana Harbor	Indiana Harbor	1.090
Estados Unidos	Ispat Inland	Indiana Harbor	1.000
Estados Unidos	US Steel Kosice	Gary	2.010
Filipinas	Philippine Sinter Corp.	Makati	5.000
Finlândia	Rautaruukki OY	Raahe	2.850
França	Arcelor	Dunkirk	9.000
França	Arcelor	Florange	5.490
França	Arcelor	Fos sur Mer	7.400
Holanda	Corus	IJmuiden	4.310
Hungria	Dunaferr	Dunaujvaros	900
Índia	SAIL	Bokaro	6.200
Índia	RINL (Visag)	Visakhapatnam	5.256
Índia	SAIL	Bhilai	5.180
Índia	SAIL	Durgapur	3.010
Índia	SAIL	Rourkela	2.770
Índia	Tata Iron & Steel Co.	Jamshedpur	4.500
Iugoslávia	Sartid	Smederevo	2.600
Iran	Nisco	Esfahan	2.520
Itália	Riva	Taranto	11.000

País	Empresa	Localização	Capacidade (x1.000tpa)
Itália	Lucchini	Servola	550
Japão	JFE Steel	Chiba	2.560
Japão	JFE Steel	Mizushima	10.695
Japão	Kobe Steel	Kakogawa	6.000
Japão	Nippon Steel	Kimitsu	13.000
Japão	Nippon Steel	Nagoya	9.130
Japão	Nippon Steel	Oita	11.498
Japão	Nippon Steel	Yawata	4.950
Japão	Nisshin Steel	Kure	5.100
Japão	JFE Steel	Fukuyama	13.850
Japão	JFE Steel	Keihin	5.300
Japão	Sumitomo Metal Ind.	Kashima	12.447
Japão	Sumitomo Metal Ind.	Wakayama	5.439
México	Ahmsa	Monclova	1.450
Paquistão	Pakistan Steel Mills	Bin Qasim	1.800
Polônia	Huta Katowice	Katowice	7.735
Polônia	Sendzimir I&S	Huta Sendzimir	2.700
Reino Unido	Corus	Port Talbot	3.620
Reino Unido	Corus	Redcar	4.200
Reino Unido	Corus	Scunthorpe	4.900
República Tcheca	Ispat Nova Hut	Ostrava	2.360
República Tcheca	Trinecke Zelezamy	Trinec	2.500
República Tcheca	Vitkovice Steel	Ostrava	ND
Romênia	Sidex	Galati	5.120
Taiwan	China Steel	Kaohsiung	12.682
Turquia	Erdemir	Uzunkum	1.750
Turquia	Isdemir	Iskenderun	3.200
Turquia	Kardemir	Karabuk	1.340
Zimbábue	Ziscosteel	Redcliff	2.044

As futuras tendências do consumo de sinter no mundo variam significativamente de acordo com a região. Numa visão até o ano de 2012 temos a seguinte perspectiva por

TABELA 3.5 – Consumo mundial de sinter feed importado, 1998-2012 (milhões de toneladas). The Annual Outlook for Iron Ore (2003).

	Consolidado						Previsão					Crescimento Médio Anual
	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2012	1998-2012
Total	268.9	257.2	279.9	293.6	304.5	329.4	355.7	377.7	395.9	417.2	500.5	4,5%
China	30.1	30.0	39.0	59.0	69.0	91.6	115.9	137.3	154.1	175.4	267.3	16,9%
Europa Ocidental	76.4	73.2	75.2	72.7	73.9	74.5	74.9	74.5	74.8	73.9	66.4	-1,0%
Europa Oriental e antiga União Soviética	18.7	15.6	15.7	15.8	15.9	16.1	16.8	17.2	17.4	17.6	18.1	-0,2%
América do Norte	5.4	5.4	5.3	4.2	4.1	4.2	4.5	4.4	4.6	4.5	4.6	-1,1%
América do Sul	1.2	1.2	1.2	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.4	1.4	0,9%
África	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0,0%
Ásia	157.5	155.8	173.4	191.1	204.0	225.6	250.6	272.6	290.1	312.1	402.4	6,9%
Oceania	1.0	1.0	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	-1,7%

3.5. Suprimento de Minério de Ferro

Na Europa Ocidental a produção minério de ferro para sinterização está confinada em apenas três países. Na Áustria a Voest-Alpine Erzberg opera uma mina no leste do país e fornece *sinter feed* para siderúrgicas do grupo em Donawitz e Linz. O minério tem baixo teor de ferro, de apenas 31%. A mina somente tem operado com significantes ajudas financeiras. Atualmente deve se manter em operação mas para o futuro ela é duvidosa.

Na Noruega, a Rana Gruber opera uma pequena mina que produz em torno de 500.000t/ano. Mais da metade é vendida para a EKO Stahl (Arcelor) na Alemanha como *sinter feed* e uma pequena quantidade é vendida para a Corus na Holanda como *pellet feed*.

A LKAB na Suécia detém a maior produção de finos na Europa Ocidental. Ela supre o mercado europeu com 5 a 6.000.000t/ano e o mercado transoceânico com 6.000.000t/ano. Estas quantidades devem ser mantidas no futuro, mas uma redução é possível se a LKAB expandir sua pelotização.

Nos países da antiga União Soviética e do Leste da Europa a produção de finos de minério de ferro vem se recuperando depois do colapso da demanda nos anos 90. A produção gerada é quase totalmente destinada para o mercado regional. A produção continua a crescer mas ainda está distante dos níveis alcançados na era do comunismo. É esperada uma expansão da produção de ferro gusa na região por volta de 2007. Entretanto, um aumento das exportações não é esperado, ficando nos atuais níveis.

Na América do Norte a produção de finos é dominada pelo Canadá que da região é o único que exporta a sua produção. As produções do México e EUA são só para o mercado interno. O Canadá atualmente produz de 10 a 11.000.000t, mas essa quantidade poderá ser reduzida devido ao atraso dos planos de expansão da IOC.

O Brasil conta com mais de 90% da produção da América do Sul. Projetos de expansão de médio prazo da MBR e CVRD serão realizados para atender a crescente demanda do mercado doméstico e principalmente atender o aumento da demanda do mercado externo.

No restante da América do Sul a produção de finos vai sofrer poucas mudanças. Na Venezuela é esperado um aumento do consumo doméstico de finos para redução direta e se espera uma modesta expansão da produção de finos. No Chile, restrições de capacidade vão limitar a produção nos atuais níveis. No Peru, a produção de *sinter feed* não mudará significativamente.

Na África a produção de finos é de domínio da Mauritânia e da África do Sul. Na Mauritânia existem planos modestos para aumentar a produção em médio prazo, adicionando de 1 a 2.000.000t ao atual volume de produção. Na África do Sul, Kumba Resources e Assmang Ltd. têm planos de expandir a produção, mas eles são muito dependentes de investimentos em ferrovias e estrutura portuária. Isso vai dificultar significativamente os planos de expansão antes de 2006 – 2007.

Na Ásia, em termos de volume de produção a China domina, mas o teor de ferro do minério é muito baixo (33%). Na Índia existe um significativo potencial para elevar a produção de finos, mas a logística de distribuição e entraves burocráticos têm dificultado

a expansão. Apesar disso a produção se expandiu em 25% entre 1998 e 2002. A médio prazo um crescimento nessa escala poderá ocorrer. Mas há pouca perspectiva de um maior programa de investimentos, no qual a Índia poderia se tornar um rival da Austrália e do Brasil em termos de produção e exportação. Na Turquia e Iran, há previsão de uma expansão modesta da produção.

Na Austrália a produção de finos tem sido dificultada por limitações de logística, o que tem significado a perda de *market share* no mercado de exportação para a China, principalmente para o Brasil e a Índia. Entretanto, essa situação começou a ser modificada em 2003 com o início de produção da mina West Angelas da Robe River e do crescimento de outras operações. Esse crescimento irá continuar com significantes planos de investimento. A tabela 3.6 mostra a produção mundial de sinter feed. A tabela 3.7 mostra a exportação mundial de sinter feed.

TABELA 3.6 – Produção mundial de sinter feed, 1998-2012 (milhões de toneladas).

The Annual Outlook for Iron Ore (2003).

	Consolidado						Previsão					Crescimento Médio Anual
	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2012	1998-2012
Total	586.8	593.6	617.6	623.7	676.7	741.0	789.1	820.2	850.9	885.3	970.8	3,7%
China	200.5	210.6	199.1	188.0	227.3	259.1	276.5	285.2	293.9	302.9	296.8	2,8%
Europa Ocidental	8.5	8.2	8.4	8.3	8.4	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	-0,4%
Europa Oriental e antiga União Soviética	78.0	85.3	95.3	102.1	99.7	102.8	106.2	103.9	107.2	111.0	117.4	3,0%
América do Norte	13.0	11.2	11.4	7.5	8.6	9.2	10.2	10.7	11.1	11.3	11.6	-0,8%
América do Sul	116.5	109.1	117.2	121.7	128.7	140.2	151.0	161.6	165.7	173.5	197.7	3,8%
África	23.7	24.2	23.8	24.7	25.4	27.0	28.2	29.0	29.6	30.7	41.8	4,1%
Ásia	239.8	248.7	241.1	233.3	276.0	311.5	329.6	342.8	356.2	370.6	378.8	3,3%
Oceania	107.3	106.9	120.4	126.2	130.1	142.2	155.9	164.0	173.0	180.1	215.4	5,1%

TABELA 3.7 – Exportação mundial de *sínter feed*, 1998-2012 (milhões de toneladas).
The Annual Outlook for Iron Ore (2003).

	Consolidado						Previsão					Crescimento Médio Anual
	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2012	1998-2012
Total	268.9	257.2	279.9	293.6	304.5	329.4	355.7	377.7	395.9	417.2	500.5	4,5%
China	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0,0%
Europa Ocidental	6.7	6.4	6.5	6.5	6.6	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	-0,5%
Europa Oriental e antiga União Soviética	15.4	13.0	15.0	19.8	15.2	12.4	12.9	13.2	13.4	13.5	13.9	-0,7%
América do Norte	12.0	10.4	10.1	6.2	7.2	7.8	8.9	9.4	9.8	10.0	9.8	-1,5%
América do Sul	93.9	88.4	94.1	98.4	104.6	115.8	125.8	135.9	139.7	147.1	170.7	4,4%
África	18.5	18.0	17.4	18.6	19.4	21.1	22.1	22.7	23.2	24.3	35.2	4,7%
Ásia	20.1	18.8	20.6	23.5	26.4	29.5	30.0	32.5	37.0	42.4	56.1	7,6%
Oceania	102.3	102.2	116.2	120.7	125.2	136.5	149.8	157.8	166.6	173.7	208.6	5,2%

3.6 Mercado Transoceânico

O mercado global de finos de minério de ferro continua se expandindo com o crescimento ocorrido na Ásia nos recentes anos. De fato, Ásia agora demanda mais que 67% do mercado global e com perspectiva de crescimento para 80% em 2012. As exportações são dominadas pela Austrália (41%) e Brasil (36%). A tabela 3.8 mostra as exportações mundiais de *sínter feed* para o mercado transoceânico. A tabela 3.9 mostra o mercado das empresas exportadoras de *sínter feed*.

TABELA 3.8 – Exportações mundiais de sinter feed para o mercado transoceânico, 1998-2012 (milhões de toneladas). The Annual Outlook for Iron Ore (2003).

	Consolidado						Previsão					Crescimento Médio Anual
	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2012	1998-2012
Total	243.4	238.0	255.4	265.2	283.8	309.2	335.0	356.6	374.7	395.8	478.8	4,9%
China	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0,0%
Europa Ocidental	76.4	73.2	75.2	72.7	73.9	74.5	74.9	74.5	74.8	73.9	66.4	-1,0%
Europa Oriental e antiga União Soviética	3.3	2.5	0.7	-4.0	0.7	3.7	3.9	4.0	4.0	4.1	4.2	1,7%
América do Norte	4.1	4.3	4.2	3.3	3.2	3.3	3.5	3.5	3.6	3.6	3.6	-0,8%
América do Sul	1.2	1.2	1.2	1.3	1.3	1.3	1.0	1.3	1.3	1.4	1.4	0,9%
África	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0,0%
Ásia	157.5	155.8	173.4	191.1	204.0	225.6	250.6	272.6	290.1	312.1	402.4	6,9%
Oceania	1.0	1.0	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	-1,7%

TABELA 3.9 – Mercado das empresas exportadoras de sinter feed, 2002 (milhões de toneladas). The Annual Outlook for Iron Ore (2003).

Empresa	Europa Ocidental	Ásia	América do Norte	Outros	Total
BHPBilliton	1.75	47.61	0.00	0.40	49.76
Hamersley	2.88	43.31	0.00	0.36	46.56
Portman	0.00	2.25	0.00	0.00	2.25
Robe River	7.33	18.50	0.62	0.13	26.59
Savage River	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total Austrália	11.97	111.67	0.62	0.89	125.15
Samarco	0.35	0.24	0.00	0.00	0.58
CVRD	29.41	40.28	0.87	5.77	76.34
Ferteco	5.60	1.80	0.00	0.00	7.40
MBR	4.40	9.94	1.39	0.06	15.78
Others	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total Brasil	39.76	52.25	2.26	5.83	100.10
IOC	1.50	1.37	0.26	0.02	3.15
QCM	3.72	0.15	0.08	0.00	3.95

Empresa	Europa Ocidental	Ásia	América do Norte	Outros	Total
Total Canadá	5.22	1.53	0.34	0.02	7.10
Kudremukh	0.00	2.87	0.00	0.00	2.87
Goa	0.74	14.34	0.00	0.00	15.08
NMDC	0.00	8.35	0.00	0.00	8.35
Total Índia	0.74	25.57	0.00	0.00	26.30
LKAB	5.78	0.00	0.04	0.44	6.26
SNIM	8.32	0.26	0.00	0.17	8.76
CVG	2.24	0.85	0.00	0.41	3.51
Hierro Peru	0.03	0.57	0.05	0.00	0.65
CMP	0.00	0.32	0.03	0.00	0.35
Kumba	3.18	5.44	0.00	0.47	9.09
Assmang	0.00	1.30	0.00	0.28	1.58
África do Sul	3.18	6.74	0.00	0.75	10.67
Antiga União Soviética	0.00	0.00	0.00	15.18	15.18
Outras	0.29	0.09	0.10	0.00	0.49
Total	77.51	199.86	3.44	23.70	304.51

O processo de sinterização continua sendo estudado por técnicos e cientistas de todo o mundo no afã de manter o processo sempre capaz de responder às demandas da indústria siderúrgica.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios de sinterabilidade e de caracterização de sinter, para a avaliação do desempenho em sinterização dos três produtos: *pellet feed*, *pellet screenings* e *micro pellet* foram realizados no Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas, a partir do seguinte planejamento básico:

- i. o fornecimento das matérias-primas para o estudo seria de responsabilidade da Usiminas, excetuando-se os três produtos da Samarco;
- ii. a definição da mistura base de sinterização seria de responsabilidade da Usiminas, tendo como critério básico a semelhança de desempenho com a mistura industrial praticada na empresa;
- iii. os produtos da Samarco seriam avaliados individualmente, em substituição parcial e total a um dos minérios de baixa sílica constituinte da mistura;
- iv. os parâmetros visados de qualidade do sinter seriam equivalentes aos praticados na planta industrial da Usiminas;
- v. as condições experimentais seguiriam o padrão do Laboratório de Sinterização Piloto da Usiminas;
- vi. os parâmetros de qualidade de sinter a serem avaliados: *shatter* e *tumbler index*, RDI e redutibilidade;
- vii. a utilização da caracterização química fornecida pela Samarco, para efeito de cálculo de misturas;
- viii. a caracterização química dos sinteres produto ficaria a cargo da Samarco.

4.1. Preparação e caracterização das matérias-primas

Os produtos da Samarco foram fornecidos em tambores de 200 litros e, no ato do recebimento, analisados quanto à umidade. Em função dos elevados teores apresentados, respectivamente 10% e 8%, os produtos *pellet feed* e *pellet screenings* foram secados em estufa, visando uma condição adequada de manuseio e misturamento. A umidade apresentada pelo *micro pellet* (1%) estava adequada para utilização. No caso do *pellet feed*, aglomerados (torrões) que estavam presentes no material úmido permaneceram, após a secagem, tornando-se necessária sua destruição, antes da preparação das misturas.

Todas as matérias-primas utilizadas nas duas etapas desse estudo foram previamente homogeneizadas e, posteriormente, amostradas para a realização das caracterizações química e granulométrica, respectivamente, nos Laboratórios de Química Analítica e de Sinterização Piloto do Centro de P&D da Usiminas. A figura 4.1 mostra uma visão geral das matérias primas. Os resultados dessas caracterizações são apresentados nas tabelas 4.1; 4.2; 4.3 e 4.4.



Figura 4.1 – Visão geral das matérias primas

A avaliação de desempenho dos produtos quanto à sinterabilidade foi realizada utilizando-se, como referência, uma mistura de sinterização constituída por quatro diferentes minérios de ferro. A escolha dessa mistura se baseou em ensaios comparativos preliminares, realizados em planta de sinterização piloto, onde a produtividade e qualidade de sinter resultantes foram equivalentes aos da mistura padrão de minérios da Usiminas.

TABELA 4.1 – Qualidade química das matérias-primas utilizadas na primeira etapa do estudo.

Matérias-Primas	Composição química (% peso)													
	Fe(t)	FeO	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	PPC	P ₂ O ₅	K ₂ O	Na ₂ O	ZnO	TiO ₂	S
<i>Pellet feed</i>	66,70	1,23	0,07	1,55	0,27	0,03	0,067	2,64	0,096	0,005	0,007	0,0049	0,018	0,003
<i>Pellet screenings</i>	66,30	0,52	1,52	2,13	0,46	0,21	0,077	0,64	0,105	0,012	0,027	0,0099	0,027	0,044
<i>Micro pellet</i>	59,60	0,78	6,15	2,90	0,66	0,07	0,047	4,68	0,133	0,018	0,016	0,0099	0,040	0,142
Minério A	65,40	0,27	0,03	3,95	1,50	0,02	0,28	1,12	0,076	0,009	0,005	0,0040	0,064	0,008
Minério B	65,90	0,24	0,02	4,55	0,59	0,02	0,18	0,58	0,050	0,005	0,005	0,0050	0,060	0,007
Minério C	67,54	0,41	0,02	0,69	0,84	0,02	0,26	1,94	0,085	0,020	0,020	0,0050	0,049	0,012
Minério D	67,45	-	0,02	1,32	0,57	0,06	0,90	0,83	0,062	0,008	0,004	0,020	0,030	0,007
Calcário	0,30	0,18	54,55	0,92	0,34	0,49	0,02	42,90	0,114	0,047	0,085	0,0050	0,009	0,039
Quartzo	0,46	-	0,03	99,08	0,07	0,02	-	0,09	-	-	-	-	-	-
Dunito	4,95	2,80	2,17	38,50	3,83	34,20	0,10	14,00	0,014	0,020	0,170	0,0050	0,074	-
Manganês	34,4	0,31	0,14	6,51	1,42	0,34	28,9	11,80	0,240	0,380	0,040	0,0030	0,045	0,009
Cal hidratada	0,08	0,14	75,40	1,22	0,35	0,42	0,02	24,00	0,200	0,020	0,020	0,0050	0,017	0,054
Coque	0,66	0,22	0,37	6,35	3,08	0,10	0,01	0,00	0,110	0,180	0,048	0,0010	0,160	0,610

TABELA 4.2 – Distribuição granulométrica das matérias-primas utilizadas na primeira etapa de estudo (% peso acumulada)

Matérias-Primas	Malhas Granulométricas											
	9,52 mm	6,35 mm	3,36 mm	1,00 mm	24#	32#	48#	65#	100#	150#	200#	<200#
<i>Pellet Feed</i>	0,00	0,00	0,00	0,03	0,05	0,07	0,11	0,22	0,51	1,42	6,44	93,56
<i>Pellet screenings</i>	0,00	2,20	31,41	57,85	61,94	65,22	68,27	70,65	72,14	74,29	79,20	20,80
<i>Micro pellet</i>	0,00	33,56	91,74	94,72	94,84	94,92	94,97	95,03	95,07	95,15	95,35	4,65
Minério A	0,19	4,92	23,33	49,32	53,32	55,81	59,10	62,44	69,51	75,15	80,52	19,48
Minério B	0,00	4,31	26,56	53,22	57,80	61,78	66,33	69,80	75,31	80,14	87,16	22,84
Minério C	0,00	1,38	19,08	49,37	54,00	58,62	63,33	69,99	73,21	76,47	82,18	17,82
Minério D	0,98	7,79	21,79	41,83	46,48	50,38	55,33	59,75	68,88	72,89	79,43	20,57
Calcário	0,00	0,04	25,62	73,90	78,21	81,64	84,24	85,43	86,05	88,08	91,75	8,25
Quartzo	0,00	0,00	0,00	0,00	15,52	32,33	49,55	63,56	71,85	80,62	87,30	12,70
Cal hidratada	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,05	0,17	0,43	0,80	1,73	2,97	97,83
Dunito	0,00	0,00	6,86	47,33	58,06	67,32	80,14	84,53	90,87	94,22	96,27	3,73
Manganês	2,65	8,80	27,52	66,77	73,98	78,83	83,30	85,55	91,98	93,23	95,07	4,93
Coque	0,00	0,84	11,91	39,71	48,94	59,64	71,16	79,08	83,70	88,64	93,17	6,83

TABELA 4.3 – Qualidade química das matérias-primas utilizadas na segunda etapa do estudo.

Matérias Primas	Composição química (% peso)													
	Fe(t)	FeO	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	PPC	P ₂ O ₅	K ₂ O	Na ₂ O	ZnO	TiO ₂	S
<i>Pellet feed</i>	66,70	1,23	0,07	1,55	0,27	0,03	0,067	2,64	0,096	0,005	0,007	0,0049	0,018	0,003
<i>Pellet screenings</i>	66,30	0,52	1,52	2,13	0,46	0,21	0,077	0,64	0,105	0,012	0,027	0,0099	0,027	0,044
<i>Micro pellet</i>	59,60	0,78	6,15	2,90	0,66	0,07	0,047	4,68	0,133	0,018	0,016	0,0099	0,040	0,142
Minério A anterior	65,40	0,27	0,03	3,95	1,50	0,02	0,28	1,12	0,076	0,009	0,005	0,004	0,064	0,008
Minério A atual *	65,30	0,16	0,03	3,94	0,79	0,005	0,37	0,78	0,054	0,02	0,02	0,006	0,046	0,004
Minério B anterior	65,90	0,24	0,02	4,55	0,59	0,02	0,18	0,58	0,05	0,005	0,005	0,005	0,06	0,007
Minério B atual *	66,47	-	0,02	4,23	0,40	0,01	0,13	0,25	0,03	0,009	0,008	0,001	0,05	-
Minério C	67,54	0,41	0,02	0,69	0,84	0,02	0,26	1,94	0,085	0,020	0,020	0,0050	0,049	0,012
Minério D	67,45	-	0,02	1,32	0,57	0,06	0,90	0,83	0,062	0,008	0,004	0,020	0,030	0,007
Calcário	0,30	0,18	54,55	0,92	0,34	0,49	0,02	42,90	0,114	0,047	0,085	0,0050	0,009	0,039
Quartzo	0,46	-	0,03	99,08	0,07	0,02	-	0,09	-	-	-	-	-	-
Dunito	4,95	2,80	2,17	38,50	3,83	34,20	0,10	14,00	0,014	0,020	0,170	0,0050	0,074	-
Manganês	34,40	0,31	0,14	6,51	1,42	0,34	28,9	11,80	0,240	0,380	0,040	0,0030	0,045	0,009
Cal hidratada	0,08	0,14	75,40	1,22	0,35	0,42	0,02	24,00	0,200	0,020	0,020	0,0050	0,017	0,054
Coque	0,66	0,22	0,37	6,35	3,08	0,10	0,01	0,00	0,110	0,180	0,048	0,0010	0,160	0,610

*Minérios utilizados neste estudo, em substituição aos esgotados na Usiminas. As demais matérias-primas foram as mesmas, nos estudos anterior e atual.

TABELA 4.4 – Distribuição granulométrica das matérias-primas utilizadas na segunda etapa do estudo (% peso acumulada).

Matérias Primas	Malhas Granulométricas											
	9,52 mm	6,35 mm	3,36 mm	1,00 mm	24#	32#	48#	65#	100#	150#	200#	<200#
<i>Pellet feed</i>	0,00	0,00	0,00	0,03	0,05	0,07	0,11	0,22	0,51	1,42	6,44	93,56
<i>Pellet screenings</i>	0,00	2,20	31,41	57,85	61,94	65,22	68,27	70,65	72,14	74,29	79,20	20,80
<i>Micro pellet</i>	0,00	33,56	91,74	94,72	94,84	94,92	94,97	95,03	95,07	95,15	95,35	4,65
Minério A anterior	0,19	4,92	23,33	49,32	53,32	55,81	59,10	62,44	69,51	75,15	80,52	19,48
Minério A atual *	0,10	5,80	32,56	64,79	69,06	71,60	74,31	76,01	79,24	81,60	89,62	10,38
Minério B anterior	0,00	4,31	26,56	53,22	57,80	61,78	66,33	69,80	75,31	80,14	87,16	12,84
Minério B atual *	0,00	3,91	25,48	53,91	59,37	63,11	68,16	71,43	74,44	79,21	86,52	13,48
Minério C	0,00	1,38	19,08	49,37	54,00	58,62	63,33	69,99	73,21	76,47	82,18	17,82
Minério D	0,98	7,79	21,79	41,83	46,48	50,38	55,33	59,75	68,88	72,89	79,43	20,57
Calcário	0,00	0,04	25,62	73,90	78,21	81,64	84,24	85,43	86,05	88,08	91,75	8,25
Quartzo	0,00	0,00	0,00	0,00	15,52	32,33	49,55	63,56	71,85	80,62	87,30	12,70
Cal hidratada	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,05	0,17	0,43	0,80	1,73	2,97	97,83
Dunito	0,00	0,00	6,86	47,33	58,06	67,32	80,14	84,53	90,87	94,22	96,27	3,73
Manganês	2,65	8,80	27,52	66,77	73,98	78,83	83,30	85,55	91,98	93,23	95,07	4,93
Coque	0,00	0,84	11,91	39,71	48,94	59,64	71,16	79,08	83,70	88,64	93,17	6,83

*Minérios utilizados neste estudo, em substituição aos esgotados na Usiminas. As demais matérias-primas foram as mesmas, nos estudos anterior e atual.

4.2. Planejamento dos ensaios de sinterabilidade

Os ensaios foram realizados em duas etapas.

4.2.1 . Ensaios de sinterização – 1° etapa

Os produtos foram testados individualmente em substituição parcial (50%) e total (100%) a um dos minérios de ferro da mistura, que apresenta teor de SiO₂ similar. Essa opção foi adotada pelo fato dos produtos também apresentarem, de uma maneira geral, baixos teores de SiO₂ e, assim, representarem a situação mais provável numa possível utilização industrial destes produtos.

A descrição das condições de teste é apresentada a seguir:

- condição 1 – mistura base de minérios de ferro (referência);
- condição 2 – *pellet feed* substituindo 50% do minério D;
- condição 3 – *pellet feed* substituindo 100% do minério D;
- condição 4 – *pellet screenings* substituindo 50% do minério D;
- condição 5 – *pellet screenings* substituindo 100% do minério D;
- condição 6 – *micro pellet* substituindo 50% do minério D;
- condição 7 – *micro pellet* substituindo 100% do minério D.

A qualidade química visada nos sínteres foi a praticada nas plantas de sinterização da Usiminas, onde busca-se baixo volume de escória para atender às necessidades dos altos-fornos.

Qualidade química visada no sínter:

SiO₂ = 4,70%

MgO = 1,40%

Al₂O₃ = 1,00%

Basicidade binária (CaO/SiO₂) = 1,65

As tabelas 4.5 e 4.6 mostram, respectivamente, as composições das misturas parciais e as distribuições granulométricas das mesmas nas diferentes condições de teste.

As figuras 4.2 e 4.3 mostram, as distribuições granulométricas das misturas nas diferentes condições de teste.

TABELA 4.5 – Composição das misturas parciais nas diferentes condições de teste (%).

Componentes das misturas	Condição de teste	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
		Mistura Base Referência	<i>Pellet feed</i> substituindo 50% do minério D	<i>Pellet feed</i> substituindo 100% do minério D	<i>Pellet screenings</i> substituindo 50% do minério D	<i>Pellet screenings</i> substituindo 100% do minério D	<i>Micro pellet</i> substituindo 50% do minério D	<i>Micro pellet</i> substituindo 100% do minério D
<i>Pellet Feed</i>		-	12,07	24,08	-	-	-	-
<i>Pellet screenings</i>		-	-	-	12,12	24,28	-	-
<i>Micro pellet</i>		-	-	-	-	-	12,30	24,98
Minério A		26,28	26,20	26,13	26,32	26,36	26,29	27,11
Minério B		17,53	17,48	17,43	17,55	17,58	17,80	18,08
Minério C		13,02	12,98	12,94	13,03	13,05	13,22	13,43
Minério D		24,22	12,07	-	12,12	-	12,30	-
Calcário		12,87	12,82	12,77	12,56	12,24	11,50	10,08
Quartzo		0,61	0,56	0,49	0,51	0,41	0,37	0,11
Cal hidratada		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Dunito		3,64	3,64	3,64	3,60	3,55	3,66	3,68
Manganês		0,83	1,17	1,52	1,17	1,52	1,17	1,53
Coque		3,40	3,40	3,60	3,40	3,40	3,40	3,40

TABELA 4.6 – Distribuição granulométrica das misturas parciais nas diferentes condições de teste (em % acumulada).

Malha \ Condição de teste	(1) Mistura Base Referência	(2) <i>Pellet feed</i> substituindo 50% do minério D	(3) <i>Pellet feed</i> substituindo 100% do minério D	(4) <i>Pellet screenings</i> substituindo 50% do minério D	(5) <i>Pellet screenings</i> substituindo 100% do minério D	(6) <i>Micro pellet</i> substituindo 50% do minério D	(7) <i>Micro pellet</i> substituindo 100% do minério D
6,35 mm	5,08	3,91	2,75	4,24	3,41	8,93	12,78
3,36 mm	22,89	19,63	16,38	24,32	25,76	33,34	43,79
1,00 mm	47,93	41,69	35,44	50,33	52,72	55,84	63,74
24 #	52,35	45,42	38,48	54,66	56,97	59,58	66,80
32 #	55,93	48,41	40,90	58,15	60,36	62,58	69,24
48 #	60,22	51,97	43,72	62,15	64,08	66,14	72,06
65 #	64,44	55,55	46,65	66,07	67,70	69,71	74,98
100 #	71,17	60,96	50,74	71,66	72,14	75,08	79,00
150 #	75,77	65,09	54,41	75,98	76,18	79,09	82,42
200 #	81,90	70,99	60,09	81,86	81,83	84,28	86,65

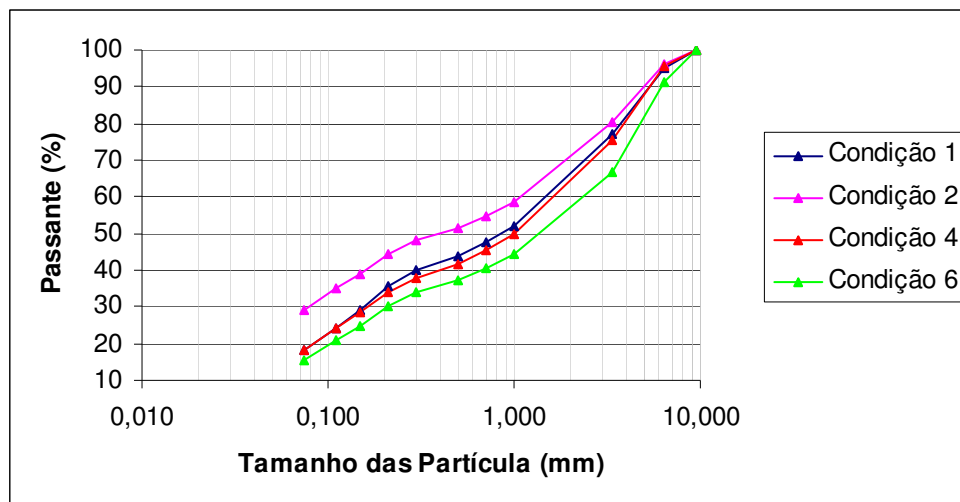


Figura 4.2 – Distribuição granulométrica das misturas parciais nas diferentes condições de teste.

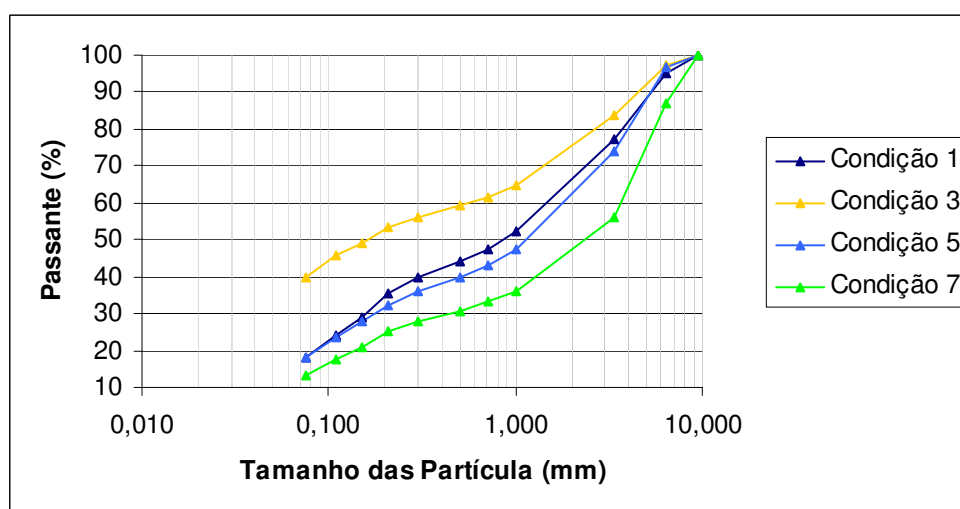


Figura 4.3 – Distribuição granulométrica das misturas parciais nas diferentes condições de teste.

4.2.2 Ensaios de Sinterização – 2ª etapa

O *pellet feed* foi testado individualmente em substituição parcial (25%), a um dos minérios de ferro da mistura, que apresenta baixo teor de SiO₂ (minério D). Essa opção foi adotada pelo fato do *pellet feed* apresentar teor de SiO₂ (1,55%) próximo ao do minério substituído (1,32%) e, assim, representar a situação mais provável numa possível utilização industrial desses produtos. As condições de testes são apresentadas a seguir:

- Condição 1 – mistura base, constituída por quatro minérios de ferro (Referência);
- Condição 2 – 25% de *pellet feed* substituindo 25% do minério D;
- Condição 3 – 50% de *pellet feed* substituindo 50% do minério D.

A realização de ensaios na Condição 3 (50%) foi realizada para verificação da validade dos valores obtidos nas duas condições anteriores.

A qualidade química visada nos sínteres foi a mesma do estudo da 1ª etapa. As tabelas 4.7 e 4.8 mostram, respectivamente, as composições das misturas parciais e as distribuições granulométricas das misturas de minérios, para as três condições testadas.

A figura 4.4 mostra as distribuições granulométricas das misturas de minérios, para as três condições testadas.

A figura 4.5 mostra o misturador utilizado nos estudos.

TABELA 4.7 – Composições das misturas parciais nas diferentes condições de teste (%).

Condição de teste / Componentes das misturas	(1) Mistura Base - Referência	(2) <i>Pellet feed</i> substituindo 25% do Minério D	(3) <i>Pellet feed</i> substituindo 50% do Minério D
<i>Pellet feed</i>	---	6,04	12,06
Minério A	26,26	26,22	26,19
Minério B	17,52	17,49	17,46
Minério C	13,01	12,99	12,97
Minério D	24,20	18,12	12,06
Calcário	12,89	12,87	12,85
Quartzo	0,68	0,65	0,62
Cal hidratada	1,00	1,00	1,00
Dunito	3,66	3,66	3,66
Manganês	0,79	0,96	1,13

TABELA 4.8 - Distribuição granulométrica das misturas nas diferentes condições de teste.

Condição de teste / Malha	(1) Mistura Base – Referência (% acumulada)	(2) <i>Pellet feed</i> substituindo 25% do Minério D (% acumulada)	(3) <i>Pellet feed</i> substituindo 50% do Minério D(% acumulada)
6,35 mm	5,28	4,69	4,11
3,36 mm	25,65	24,02	22,39
1,00 mm	53,10	49,98	46,85
24 #	57,80	54,33	50,86
32 #	61,34	57,58	53,82
48 #	65,55	61,42	57,30
65 #	69,19	64,75	60,30
100 #	74,14	69,03	63,92
150 #	77,66	72,32	66,98
200 #	84,71	79,26	73,81

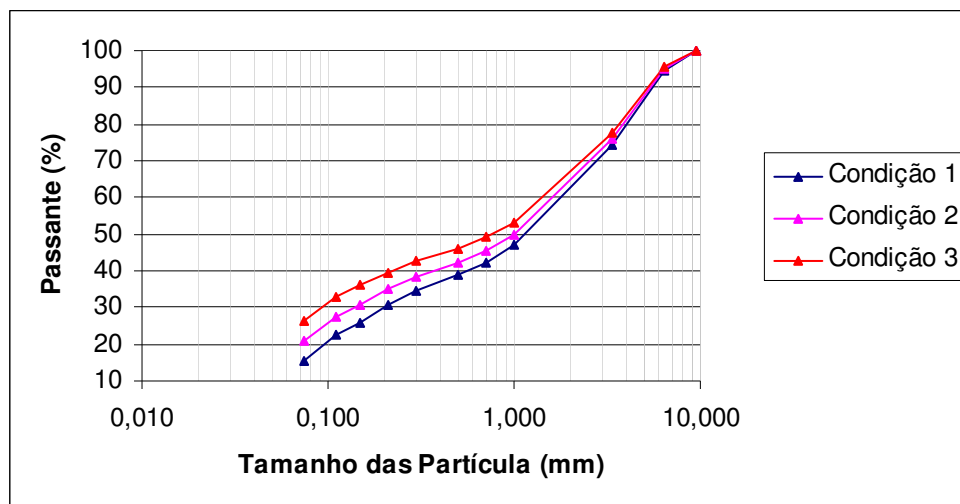


Figura 4.4 – Distribuição granulométrica das misturas parciais nas diferentes condições de teste.



Figura 4.5 – Misturador

4.3. Ensaio de sinterabilidade - Padrão Usiminas

A metodologia, adotada na Usiminas, de simulação do processo de sinterização em escala piloto, foi definida de modo a garantir, para uma mesma mistura, os seguintes aspectos:

- i. produção de um sínter com características químicas e metalúrgicas semelhantes ao produzido industrialmente;
- ii. obtenção de índices de produtividade de mesma ordem de grandeza;
- iii. reprodução, em escala industrial, das tendências observadas nos testes em escala piloto.

No ensaio de sinterabilidade são realizadas duas queimas para obtenção de finos de retorno e três queimas normais para cada condição testada. As condições de controle são: (i) todos os bolos de sínter de uma determinada condição de teste devem produzir, após a degradação, a mesma percentagem de finos de retorno, (ii) as queimas individuais não devem exibir uma divergência superior a 1,5min no tempo de sinterização, e (iii) os pesos das misturas carregadas, de uma mesma condição de teste, não devem apresentar entre si diferença superior a 1,5kg. A figura 4.6 mostra a máquina de sínter.

A percentagem de finos de retorno praticada corresponde a 25% da mistura total, sendo sua granulometria composta por 25% de material na faixa de 5 a 10mm e 75% de 0 a 5mm, valores esses que correspondem à granulometria dos finos de retorno industrial da Usiminas.

A quantidade de combustível utilizada é a necessária para balancear os finos de retorno, ou seja, aquela que garante que a quantidade de “finos de retorno produzidos” será igual à quantidade de “finos de retorno introduzidos” na mistura correspondente, com uma determinada tolerância (10% em relação à fração < 5,0mm).

A umidade ótima de cada mistura é previamente determinada através de metodologia específica. Nesse caso, determina-se, para aquela mistura em teste, a umidade que resulte na melhor produtividade e os melhores índices de qualidade do sínter.

Os parâmetros básicos dos ensaios na Máquina Piloto de Sinterização são:

- i. diâmetro médio da panela = 300mm;
- ii. altura da camada = 530mm (mistura + *bedding*), sendo *bedding* = 20mm;
- iii. pressão de sucção durante a queima = 1600mm H₂O e durante a ignição de 600mm H₂O;
- iv. tempo de ignição = 1min;
- v. intensidade de ignição = 25.000kcal/m²/min (COG);
- vi. umidade visada nas misturas = umidade ótima previamente determinada;
- vii. relação ar/gás na ignição = 5/1.

A figura 4.7 mostra a máquina durante a queima.

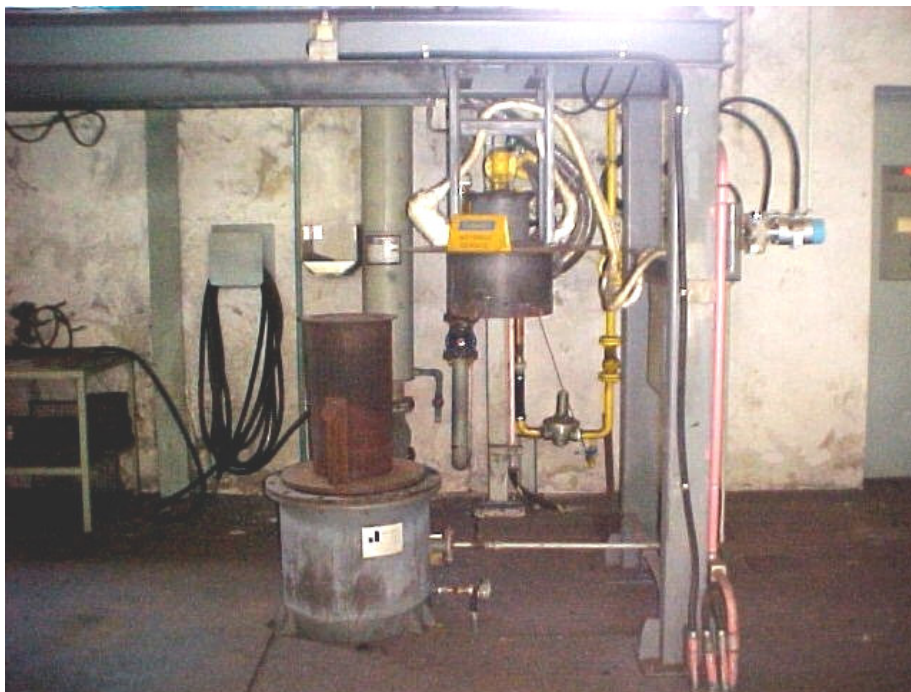


Figura 4.6 – Máquina de Sínter



Figura 4.7 – Máquina de Sínter durante a queima

A Figura 4.8 mostra detalhe da panela.



Figura 4.8 – Panela

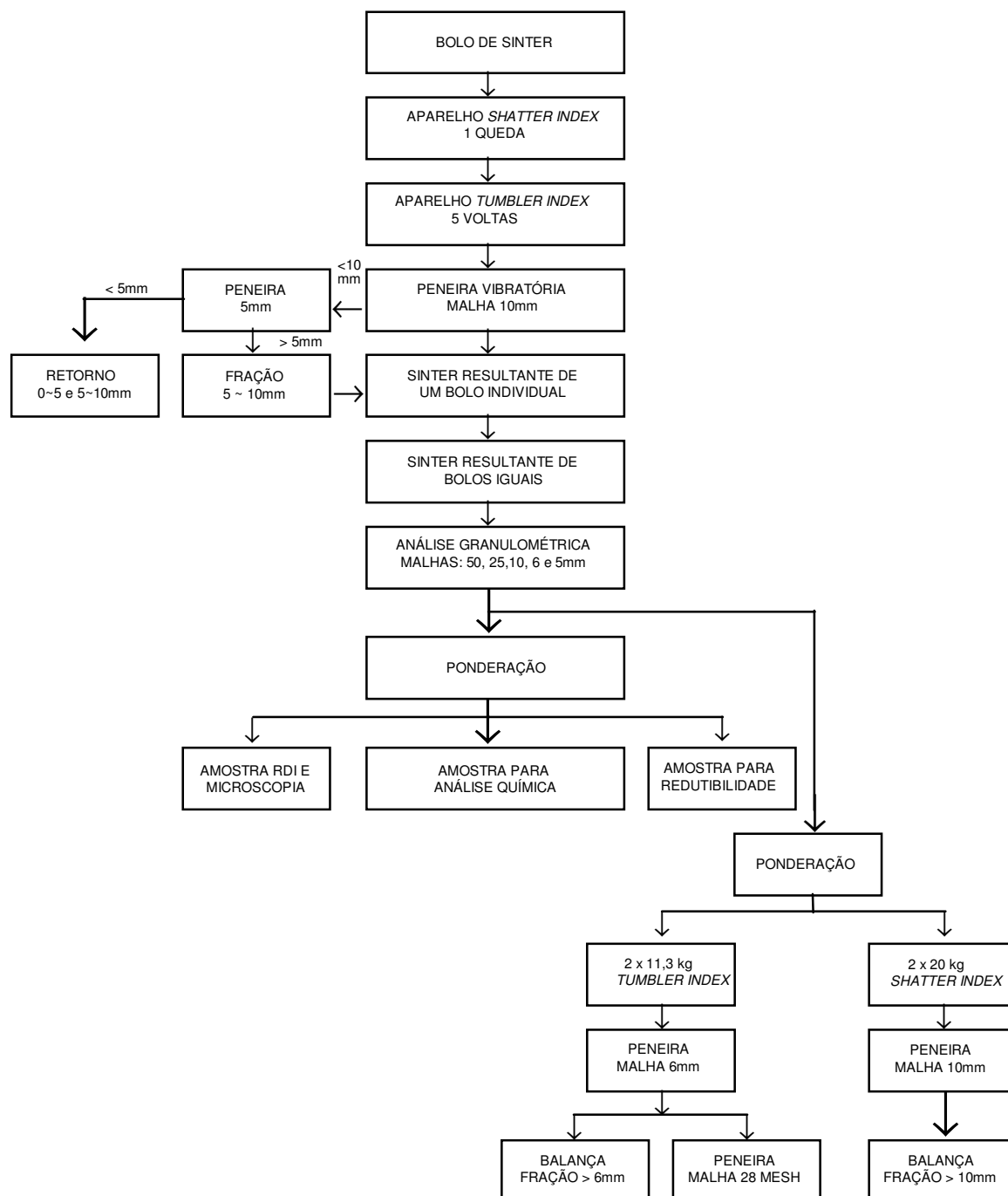
4.4. Tratamento mecânico e preparação de amostras para caracterização física e metalúrgica do sínter piloto

Objetivando simular os efeitos do manuseio e transporte sobre o grau de estabilização granulométrica do sínter industrial, o sínter piloto é submetido a um tratamento mecânico nos equipamentos de *tumbler* e *shatter test*. A figura 4.9 mostra o equipamento para o ensaio de Shatter.



Figura 4.9 – Ensaio *Shatter*

O esquema adotado para o tratamento mecânico e a preparação de amostras para os ensaios de caracterização são descritos na figura 4.10, estando de acordo com o padrão de operação do Laboratório de Sinterização Piloto.



OBSERVAÇÃO: DA FRAÇÃO > 5mm, É INCORPORADA AO RETORNO A QUANTIDADE NECESSÁRIA PARA SE OBTER UM RETORNO COM 25% DE 5 ~ 10mm. O RESTANTE DA FRAÇÃO > 5mm É REINCORPORADA AO SINTER RESULTANTE.

Figura 4.10 – Fluxograma do tratamento do bolo de sinter e preparação de amostras para caracterização física e metalúrgica.

4.5. Ensaio de caracterização física e metalúrgica do sinter

Para a caracterização física e metalúrgica dos sinteres produzidos a partir dos produtos da Samarco, foram utilizados os procedimentos normalmente adotados no Laboratório Piloto de Sinterização, a saber:

- i. Shatter index: JIS M 8711*
 - resultado expresso pela fração de material > 10mm.
- ii. Tumbler index: ASTM E-279-92*
 - resultado expresso pela fração de material > 6mm.
- iii. RDI: baseado nos procedimentos da Nippon Steel Corporation*
 - temperatura: 550°C;
 - resultado expresso pela fração de material < 2,83mm;
 - composição do gás redutor 30% CO e 70% N₂;
 - vazão de gás: 15 litros/min.
- iv. Redutibilidade: JIS M 8713*
 - temperatura: 900°C;
 - composição do gás redutor: 30% CO e 70% N₂;
 - vazão de gás: 15 litros/min.

4.6 Ensaio para determinação do Índice de Granulação (GI)

4.6.1 Considerações Preliminares

Dos parâmetros característicos das misturas carregadas no leito de sinterização, dois estão diretamente relacionados à produtividade da planta: o diâmetro médio da mistura e a permeabilidade do leito. O primeiro, de natureza granulométrica, está relacionado à distribuição granulométrica da mistura. O segundo é função da resistência oferecida pelo leito ao fluxo de ar quando a mistura é submetida a uma depressão. Interdependentes, esses fatores estão diretamente ligados à granulometria e características aglomerantes das matérias-primas e, ainda, à eficiência dos misturadores.

Uma alta eficiência de micropelotização da mistura, durante a etapa de misturamento, é fundamental para a obtenção de elevados níveis de produtividade, determinando a escolha da mistura de minérios em função da granulometria e/ou características mineralógicas de seus componentes.

Parâmetros como a distribuição granulométrica de misturas e a eficiência de micropelotização podem ser estimados através da avaliação do “Índice de Granulação” de misturas de sinterização, cuja metodologia de ensaio é descrita a seguir. Essa metodologia foi adaptada dos ensaios da NSC (Nippon Steel Corporation) pela USIMINAS.

4.6.2 Definições e Abreviaturas

- *GI – Granulation Index*
- *NSC – Nippon Steel Corporation*
- Ultra-X – Aparelho para determinação da umidade de matérias-primas e misturas
- SI – Unidades do Sistema Internacional

4.6.3 Equipamentos Utilizados

Para realização do ensaio são necessários os seguintes equipamentos:

- i. uma estufa com regulagem de temperatura, com capacidade de aquecimento até 150°C;
- ii. um quarteador de amostras;
- iii. um aparelho para determinação de umidade por infravermelho;
- iv. um agitador de soluções;
- v. seis Erlenmeyers de 500ml;
- vi. três balanças eletrônicas de precisão, com capacidade mínima de 1600g (uma exclusiva para determinação da umidade total da mistura, uma a ser usada na análise granulométrica e uma para verificar o enquadramento da umidade dos 500g na faixa de $3,0 \pm 0,5\%$ de H₂O);

- vii. uma bandeja circular;
- viii. seis bandejas pequenas, de aço, para receber o material peneirado, e que será secado na estufa maior;
- ix. uma bandeja de aço grande para comportar, na estufa, as 6 bandejas menores como material;
- x. um jogo de peneiras composto pelas malhas de 4,76; 2,00; 1,00; 0,50; 0,25mm e fundo;
- xi. uma concha pequena de amostragem.

4.6.4 Amostragem e preparação da mistura

O local de amostragem da mistura de sinterização deve ser definido previamente em função do objetivo que se pretende com o ensaio. O procedimento de preparação da amostra de mistura é apresentado a seguir:

- i. coletar uma amostra de mistura de aproximadamente 2.000g;
- ii. com o uso do quarteador, dividir a amostra em 8 partes semelhantes (seções) de aproximadamente 250g;
- iii. para a determinação da umidade total, coletar uma amostra de 100g de material, tomada com a concha em vários pontos da mistura localizada em duas opostas, e deixar durante 20 minutos a 100°C no aparelho de determinação de umidade por infravermelho;
- iv. retirar a amostra, deixando-a estabilizar por 5 min.;
- v. determinar a umidade total pela diferença entre pesos inicial e final (%);
- vi. de dois pares de seções opostas restantes, juntar o material formando duas amostras de 500g;
- vii. guardar uma das amostras de 500g como reserva, em saco plástico selado;
- viii. a outra amostra de 500g (amostra teste) deve ficar preferencialmente sobre a balança na caixa de acrílico, fechada para que a perda de umidade seja mínima, até que seja conhecido o resultado da umidade total.

4.6.5 Acerto da umidade da amostra de 500g

O procedimento de acerto da umidade é apresentado a seguir:

- i. depois de conhecer a umidade determinada a partir da amostra de 100g, levar a amostra teste, em uma bandeja metálica circular, para a estufa à 70°C durante aproximadamente 15 minutos, onde será efetuada a semi-secagem, ajuste da umidade para 3% com variação de $\pm 0,5\%$ (a amostra deve retornar a estufa até que a umidade esteja ajustada para a faixa estipulada);
- ii. caso a umidade já esteja dentro dessa faixa, não é necessário adequar a umidade das 500g;
- iii. após o tempo de secagem dos 500g, tirar o prato com a mistura e deixá-la estabilizar na bancada, fora da estufa, por 5 min.

4.6.6 Etapa de peneiramento A

Essa é uma das fases que exigem maior atenção por parte do executante e, por isso, deve ser feita com o máximo de cuidado. O procedimento é o seguinte:

- i. após a inspeção e limpeza das peneiras, montar o jogo com as malhas de 4,76; 2; 1; 0,5 e 0,25mm;
- ii. carregar a amostra de 500g, após o ajuste da umidade, cuidadosamente sobre o sistema de peneiramento;
- iii. com o conjunto de peneiras inclinado a $\pm 30^\circ$ para a direita, girá-lo da esquerda para a direita, em forma de círculo (± 200 mm de diâmetro), dando 1 volta completa e parar. Dar a segunda volta completa com o conjunto e parar;
- iv. nessa mesma condição, colocar o conjunto de malhas sobre a bancada, bater de leve duas vezes na lateral esquerda do conjunto;
- v. retirar cuidadosamente a malha de 4,76mm, incliná-la a $\pm 30^\circ$ para a esquerda e dar 3 tapas leves em sua lateral direita;
- vi. inverter a inclinação para a direita e dar 3 tapas leves em sua lateral esquerda;

- vii. incliná-la a $\pm 30^\circ$ novamente para a esquerda e dar 3 tapas leves em sua lateral direita;
- viii. inverter a inclinação para a direita e dar 3 tapas leves em sua lateral esquerda, perfazendo um total de 12 tapas leves;
- ix. o material $<4,76\text{mm}$ deve ser colocado sobre a peneira de $2,0\text{mm}$ para ser peneirado com o material $>2,0\text{mm}$;
- x. o material $>4,76\text{mm}$ deve ser identificado e posto em uma das 6 bandejas menores que, posteriormente, serão levadas à estufa para secagem completa do material;
- xi. repetir o procedimento acima com as peneiras de $2,0$; $1,00$; $0,50$ e $0,25\text{mm}$;
- xii. o material $<0,25\text{mm}$ deve ser juntado ao material do fundo;
- xiii. colocar as 6 bandejas pequenas, com o material peneirado, sobre a bandeja maior, e levar o conjunto à estufa grande para secagem completa (0% de umidade) durante 40 minutos a 120°C ;
- xiv. após os 40 minutos, retirar o conjunto da estufa e esperar 10 minutos para estabilização da temperatura;
- xv. pesar separadamente o material retido em cada faixa granulométrica ($>4,76$; $>2,00$; $>1,00$; $>0,50$; $>0,25$ e $<0,25\text{mm}$), registrando os resultados;
- xvi. o peso do material correspondente à fração $<0,25\text{mm}$ será identificado por (A).

4.6.6.1 Etapa de peneiramento B

O procedimento é o seguinte:

- i. os materiais secos e separados por faixa granulométrica da etapa anterior (exceto a fração $<0,25\text{mm}$) serão lavados por 2 minutos com água em um sistema de lavagem automático (equipamento do tipo agitador), onde cada fração é colocada em um recipiente (Erlenmayer) com 300ml de água;
- ii. após a lavagem, montar o conjunto de peneiras ($4,76$; $2,00$; $1,00$; $0,50$ e $0,25\text{mm}$) novamente e virar o material de cada recipiente sobre a sua malha de peneira específica, começando sempre pela malha inferior, lavando os retidos com água corrente e eliminando-se com isso as frações super finas aderidas;
- iii. levar ao forno para secar todo o conjunto de peneiras, com o material lavado, à uma temperatura de 120°C durante aproximadamente 90 minutos;

- iv. após a secagem, retirar o conjunto de peneiras da estufa deixando-o inerte por 10 minutos para a estabilização da temperatura;
- v. a seguir, levar o conjunto de peneiras para o “Ro-tap”, e efetuar o peneiramento mecânico do material durante 2 minutos;
- vi. retirar o material das malhas e pesar todos os retidos, determinando-se a fração <0,25mm por diferença, identificando-a por (B).

4.6.7 Cálculo do Índice de Granulação método Usiminas (GI₁)

O Índice de Granulação da mistura é determinado a partir da expressão:

$$GI_1 = \left[\frac{B(g)}{A(g)+B(g)} \right] \times 100$$

Onde: A = massa em gramas da fração <0,25mm das quasi partículas;

B = massa em gramas da fração <0,25mm das partículas primárias.

4.6.8 Cálculo do Índice de Granulação método Nippon Steel Corporation (NSC) - (GI₂)

O Índice de Granulação da mistura é determinado a partir da expressão:

$$GI_2 = \left[\frac{(C(\%)+D(\%))-E(\%)+F(\%)}{(C(\%)+D(\%))} \right] \times 100$$

Onde: C = % < 0,25mm das partículas primárias;

D = % retida na malha 0,25mm das partículas primárias;

E = % < 0,25mm das quasi partículas;

F = % retida na malha 0,25mm das quasi partículas.

4.7 Estudo da microestrutura

O estudo da microestrutura será abordado em um capítulo específico, abrangendo materiais, métodos e resultados obtidos.

5. Resultados

Apresentamos a seguir os resultados dos ensaios de sinterabilidade das duas etapas. As variações numéricas dos resultados obtidos estão de acordo com as tolerâncias pelas normas de ensaios utilizados.

5.1 Primeira etapa

Os resultados das avaliações realizados neste estudo são relacionados, de forma itemizada, a seguir:

- i. composições químicas dos sínteres produzidos a partir das diferentes condições de teste na tabela 5.1;
- ii. resultados dos ensaios de sinterabilidade nas diferentes condições de teste na tabela 5.2 e figuras 5.1 (a – d);
- iii. resultados dos ensaios de caracterização dos sínteres na tabela 5.3 e figuras 5.2 (a – d);
- iv. resultados individuais de caracterização dos sínteres nas tabelas 5.4 a 5.10.

TABELA 5.1 – Resultados das análises químicas dos sinteres (% em peso).

Condições Parâmetros	(1) Mistura Base Referência	(2) <i>Pellet Feed</i> Substituindo 50% do minério D	(3) <i>Pellet Feed</i> Substituindo 100% do minério D	(4) <i>Pellet screenings</i> substituindo 50% do minério D	(5) <i>Pellet screenings</i> substituindo 100% do minério D	(6) <i>Micro pellet</i> substituindo 50% do minério D	(7) <i>Micro pellet</i> substituindo 100% do minério D
Fe_T	59,52	59,46	60,02	59,90	59,21	59,15	58,79
FeO	4,61	4,88	5,37	4,87	4,64	4,69	5,35
SiO₂	4,71	4,74	4,70	4,71	4,68	4,69	4,71
Al₂O₃	0,95	0,92	0,92	0,97	1,00	1,00	1,02
CaO	7,62	7,66	7,61	7,66	7,61	7,65	7,60
MgO	1,40	1,41	1,38	1,42	1,40	1,41	1,40
P	0,047	0,047	0,049	0,048	0,056	0,056	0,056
CaO/SiO₂	1,62	1,62	1,62	1,63	1,63	1,63	1,61
Zn	0,015	0,016	0,017	0,017	0,030	0,030	0,030
S	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,011	0,019
Cu	0,006	0,006	0,006	0,007	0,006	0,006	0,005
K₂O	0,027	0,030	0,030	0,031	0,030	0,035	0,038
Na₂O	0,013	0,016	0,018	0,019	0,020	0,010	0,022
Mn	0,321	0,321	0,320	0,321	0,330	0,328	0,323
TiO₂	0,050	0,051	0,050	0,053	0,051	0,054	0,056

TABELA 5.2 – Resultados dos ensaios de sinterabilidade com as diferentes misturas.

Condição de teste	H₂O (%)	Peso seco carregado (kg)	Peso do bolo (kg)	Tempo sinterização (min)	Retorno <5mm (%)	Retorno total (%)	Produtividade (t/h/m²)	Coke rate (kg/t)
1	5,9	79,58	76,26	27,5	19,18	25,43	1,585	51,04
2	6,0	79,10	75,69	28,2	18,67	24,92	1,541	50,76
3	6,0	77,61	73,93	32,0	18,69	24,94	1,324	54,11
4	6,0	75,96	72,83	26,3	18,55	24,80	1,592	50,66
5	6,0	74,99	71,93	26,2	19,01	25,26	1,566	51,02
6	6,0	78,67	75,29	27,1	18,50	24,75	1,601	50,63
7	6,1	78,80	75,31	27,4	19,02	25,27	1,575	51,13

TABELA 5.3 – Resultados de caracterização física e metalúrgica dos sínteres.

Condição de teste	Shatter index (%)	Tumbler index (%)	RDI (%)	Redutibilidade (%)
1	81,23	68,19	23,64	74,47
2	80,18	68,10	23,13	70,24
3	83,53	69,78	23,96	74,66
4	77,55	66,55	24,54	73,60
5	79,13	65,09	23,33	75,08
6	77,13	68,76	25,23	75,73
7	77,08	68,94	24,32	78,91

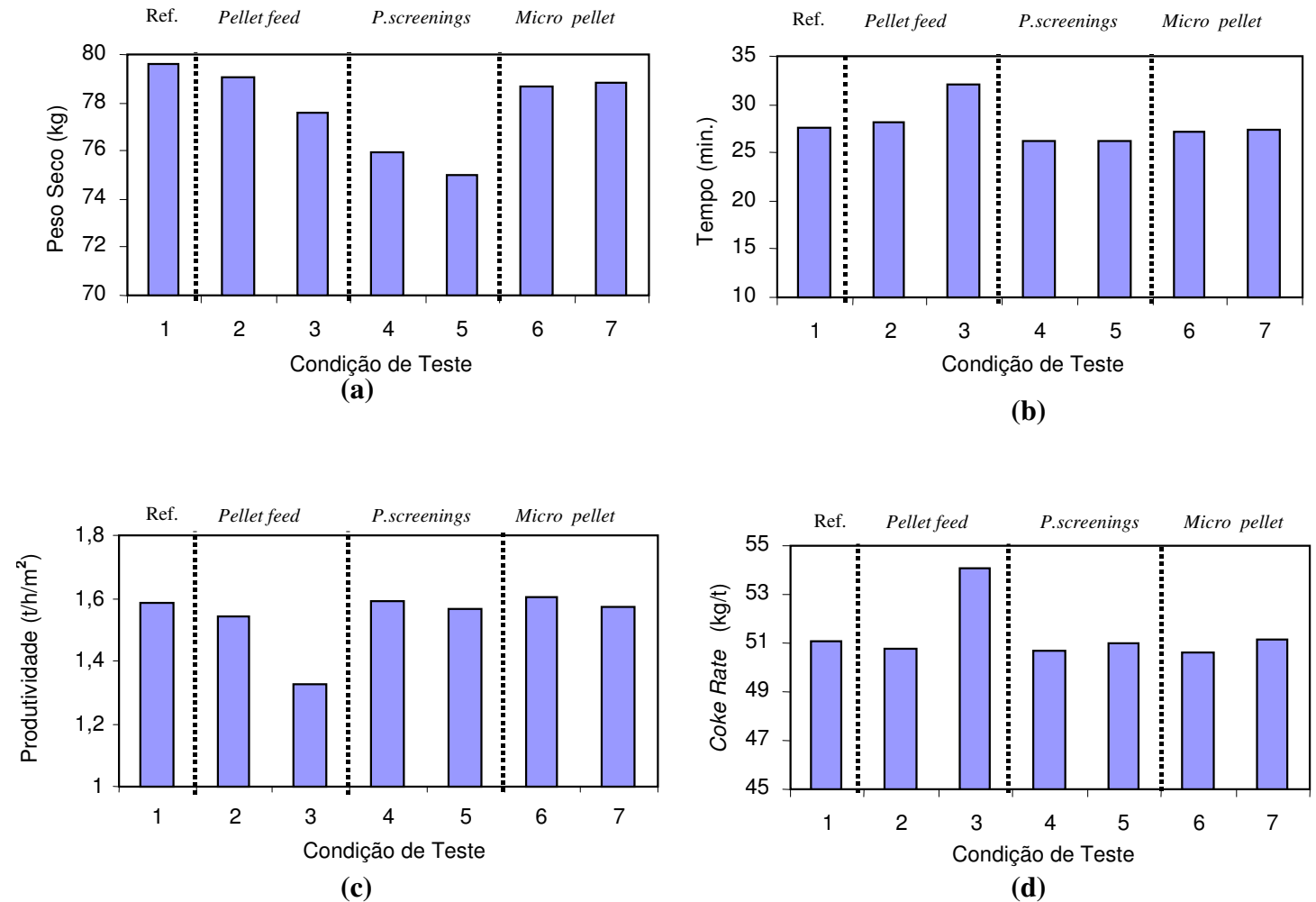
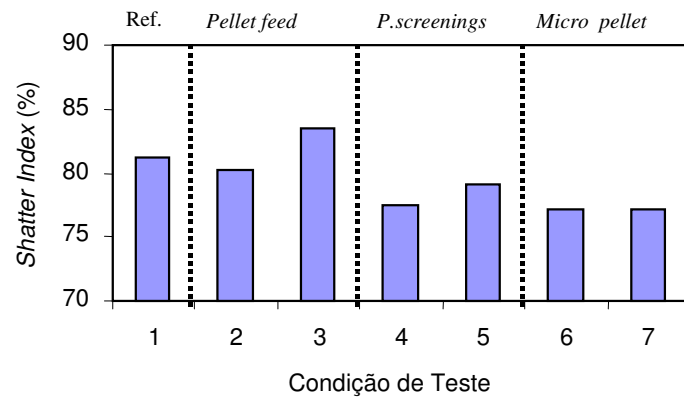
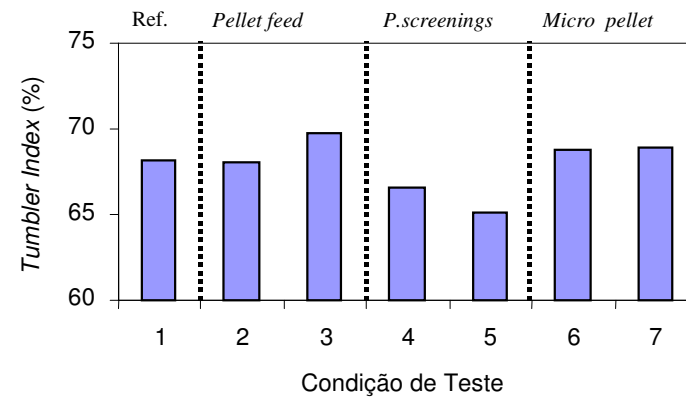


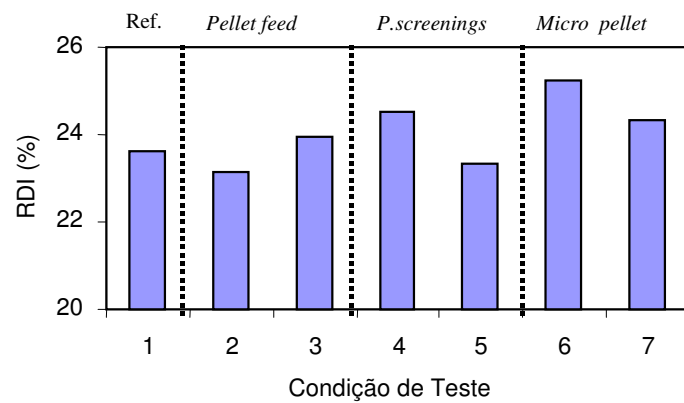
Figura 5.1 – Resultados dos ensaios de sinterabilidade nas diferentes condições de teste.



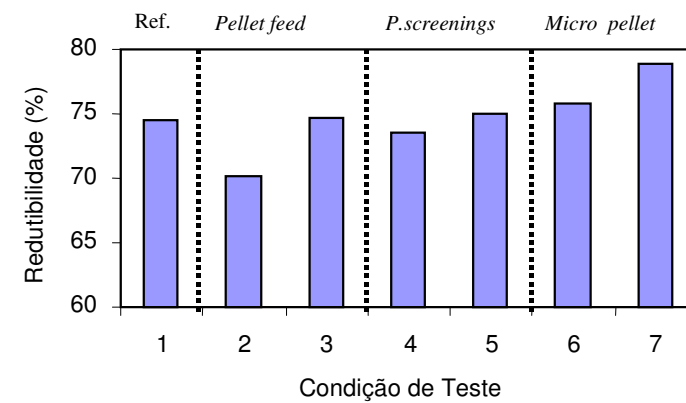
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.2 – Resultados dos ensaios de caracterização dos sinteres nas diferentes condições de teste.

Tabela 5.4 – Resultados individuais da mistura base de referência.

Queima	H ₂ O (%)	Peso seco carregado (kg)	Peso do bolo (kg)	Tempo sinterização (min)	Retorno <5mm (%)	Retorno total (%)	Coke rate (kg/t)	Produtividade (t/h/m ²)	Shatter test (%)	Tumbler test (%)	RDI (%)	RI (%)
04	5,90	79,69	76,42	27,7	18,47	24,72	50,44	1,593	81,55	68,05	24,04	74,47
05	5,90	79,27	75,91	26,6	18,43	24,68	50,52	1,647	80,90	68,32	23,23	
06	5,80	79,77	76,44	28,2	20,65	26,90	52,17	1,514				
Média	5,87	79,58	76,26	27,5	19,18	25,43	51,04	1,585	81,23	68,19	23,64	74,47

Tabela 5.5 – Resultados individuais do *pellet feed* substituindo 50% do minério D.

Queima	H ₂ O (%)	Peso seco carregado (kg)	Peso do bolo (kg)	Tempo sinterização (min)	Retorno <5mm (%)	Retorno total (%)	Coke Rate (kg/t)	Produtividade (t/h/m ²)	Shatter test (%)	Tumbler test (%)	RDI (%)	RI (%)
07	6,10	79,02	75,71	28,3	19,78	26,03	51,52	1,513	80,70	67,52	22,53	70,24
08	5,90	79,32	75,74	27,8	18,04	24,29	50,43	1,580	79,65	68,67	23,73	
09	6,00	78,96	75,62	28,6	18,19	24,44	50,34	1,531				
Média	6,00	79,10	75,69	28,2	18,67	24,92	50,76	1,541	80,18	68,10	23,13	70,24

Tabela 5.6 – Resultados individuais do *pellet feed* substituindo 100% do minério D.

Queima	H ₂ O (%)	Peso seco carregado (kg)	Peso do bolo (kg)	Tempo sinterização (min)	Retorno <5mm (%)	Retorno total (%)	Coke rate (kg/t)	Produtividade (t/h/m ²)	Shatter test (%)	Tumbler test (%)	RDI (%)	RI (%)
12	6,10	77,67	74,10	32,1	18,98	25,23	54,29	1,318	84,10	70,18	24,54	74,66
14	5,90	77,49	73,70	31,6	18,96	25,21	54,52	1,330	82,95	69,38	23,38	
15	6,10	77,66	73,99	32,3	18,14	24,39	53,52	1,323				
Média	6,03	77,61	73,93	32,0	18,69	24,94	54,11	1,324	83,53	69,78	23,96	74,66

Tabela 5.7 – Resultados individuais do *pellet screenings* substituindo 50% do minério D.

Queima	H ₂ O (%)	Peso seco carregado (kg)	Peso do bolo (kg)	Tempo sinterização (min)	Retorno <5mm (%)	Retorno total (%)	Coke rate (kg/t)	Produtividade (t/h/m ²)	Shatter test (%)	Tumbler test (%)	RDI (%)	RI (%)
16	5,90	76,14	73,05	26,2	17,82	24,07	50,05	1,621	77,85	66,55	24,62	73,60
17	6,10	75,78	72,73	26,2	19,62	25,87	51,40	1,571	77,25	66,55	24,46	
18	6,00	75,97	72,70	26,5	18,20	24,45	50,53	1,584				
Média	6,00	75,96	72,83	26,3	18,55	24,80	50,66	1,592	77,55	66,55	24,54	73,60

Tabela 5.8 – resultados individuais do *pellet screenings* substituindo 100% do minério D.

Queima	H ₂ O (%)	Peso seco carregado (kg)	Peso do bolo (kg)	Tempo sinterização (min)	Retorno <5mm (%)	Retorno total (%)	Coke rate (kg/t)	Produtividade (t/h/m ²)	Shatter test (%)	Tumbler test (%)	RDI (%)	RI (%)
20	5,80	74,18	70,98	26,3	18,89	25,14	51,13	1,540	79,30	64,60	22,85	75,08
21	6,20	74,60	71,54	25,7	18,58	24,83	50,71	1,598	78,95	65,58	23,81	
35	6,00	75,17	72,16	25,5	20,27	26,52	51,93	1,585				
37	6,10	76,01	73,03	27,4	18,31	24,56	50,32	1,539				
Média	6,03	74,99	71,93	26,2	19,01	25,26	51,02	1,566	79,13	65,09	23,33	75,08

Tabela 5.9 – Resultados individuais do *micro pellet* substituindo 50% do minério D.

Queima	H ₂ O (%)	Peso seco carregado (kg)	Peso do bolo (kg)	Tempo sinterização (min)	Retorno <5mm (%)	Retorno total (%)	Coke rate (kg/t)	Produtividade (t/h/m ²)	Shatter test (%)	Tumbler test (%)	RDI (%)	RI (%)
24	6,00	79,25	75,74	28,1	18,93	25,18	51,05	1,543	77,00	68,76	25,37	75,73
25	6,00	78,34	74,97	27,9	18,28	24,53	50,49	1,553	77,25	68,76	25,08	
26	6,10	78,44	75,23	25,9	18,60	24,85	50,57	1,672				
28	6,10	79,48	76,12	27,1	18,94	25,19	50,89	1,609				
29	6,00	77,82	74,41	26,6	17,75	24,00	50,17	1,628				
Média	6,04	78,67	75,29	27,12	18,50	24,75	50,63	1,601	77,13	68,76	25,23	75,73

Tabela 5.10 – Resultados individuais do *micro pellet* substituindo 100% do minério D.

Queima	H₂O (%)	Peso seco carregado (kg)	Peso do bolo (kg)	Tempo sinterização (min)	Retorno <5mm (%)	Retorno total (%)	Coke rate (kg/t)	Produtividade (t/h/m²)	<i>Shatter test</i> (%)	<i>Tumbler test</i> (%)	RDI (%)	RI (%)
30	6,20	78,53	74,92	27,3	19,08	25,33	51,31	1,565	77,20	68,32	24,22	78,91
31	6,10	79,12	75,51	25,7	18,10	24,35	50,52	1,701	76,95	69,56	24,41	
32	6,10	78,61	75,23	28,7	18,85	25,10	50,91	1,502				
33	5,90	78,94	75,59	27,8	20,04	26,29	51,78	1,531				
Média	6,08	78,80	75,31	27,4	19,02	25,27	51,13	1,575	77,08	68,94	24,32	78,91

5.1.1 Discussão dos resultados da primeira etapa

5.1.1.1 Ensaio de sinterabilidade

Pellet Feed (condições 2 e 3)

Com relação ao desempenho do produto *pellet feed* na mistura de sinterização percebe-se que a sua utilização, em substituição ao minério D, acarreta uma redução na produtividade do processo mais notadamente na condição 3 (100% de substituição) e no aumento do consumo de combustível também na condição 3, conforme mostrado nas figuras 5.1(c) e 5.1(d).

No primeiro caso, isso é devido à granulometria extremamente fina do material, o que leva ao afinamento da mistura com perda de permeabilidade do leito de sinterização. Isso é facilmente percebido na tabela 4.6, pois, com a utilização de 100% do *pellet feed* (condição 3), a participação de material na fração > 1 mm diminuiu de 47,93% para 35,44% e a fração < 150 # aumentou de 24,23% para 45,59%. Isso reflete negativamente no tempo de sinterização, como pode ser visto na figura 5.1(b).

A elevação do consumo de combustível, por sua vez, parece estar ligada não só à maior quantidade de finos (maior superfície específica), como também ao fato do material apresentar perda por calcinação mais elevada, caracterizando-se como levemente hidratado. Isso resulta em uma maior geração de trincas no bolo de sinter e, portanto, maior geração de finos, justificando o consumo mais elevado de combustível para o balanceamento dos finos de retorno.

Pellet Screenings (condições 4 e 5)

No caso do produto *pellet screenings* em substituição ao minério D, o primeiro ponto a ser destacado é a menor densidade de carregamento apresentada pela mistura. Esse fato é devido à menor densidade do *pellet screenings*.

A baixa densidade de carregamento tem efeitos distintos com relação à produtividade do processo de sinterização. Se por um lado ela leva à um menor peso do bolo de sinter, conforme a figura 5.1(a), reduzindo os níveis de produção, por outro, ela representa uma

melhor permeabilidade do leito devido a um maior índice de vazios, contribuindo para a redução do tempo de sinterização, conforme figura 5.1(b) e um conseqüente aumento da produtividade. Assim, de uma maneira geral, com a utilização do *pellet screenings* os níveis de produtividade do processo de sinterização mantiveram-se nos mesmos níveis dos obtidos com a mistura referência, conforme figura 5.1(c).

Nenhuma alteração significativa foi observada no consumo de combustível do processo nessa situação, conforme figura 5.1(d).

Micro Pellet (condições 6 e 7)

Nesse caso, um resultado em especial chama a atenção, as altas densidades de carregamento de mistura na panela piloto de sinterização, representadas, na figura 5.1(a), pelo peso carregado de mistura seca.

A explicação para esse fato está na estreita faixa granulométrica em que se encontra o produto *micro pellet* (3,36mm a 6,35mm), o que favorece a micropelotização, por atuar, basicamente, como partícula nucleante, permitindo que as partículas mais finas da mistura, intermediárias e aderentes, participem da formação de micropelotas e que as micropelotas de menor tamanho ocupem os vazios, resultando em uma densidade de carregamento mais alta.

A produtividade do processo e o consumo de combustível ficaram próximos com a substituição do minério D pelo produto *micro pellet*, ou seja, permaneceram nos mesmos níveis dos obtidos com a mistura referência.

5.1.1.2 Caracterização física e metalúrgica do sinter

Pellet Feed (condições 2 e 3)

Quanto aos aspectos de qualidade física, nas figuras 5.2(a) e 5.2(b) observa-se que os sínteres produzidos a partir da utilização de *pellet feed* em substituição ao minério D não apresentaram tendência clara quanto à resistência mecânica, pois, para uma substituição de 50%, houve uma ligeira queda no *shatter index*, sendo revertida no caso

da substituição total do minério D. Nesse caso, essa reversão se deveu à elevação da quantidade de coque adicionada, conforme tabela 5.2, para o balanceamento de finos de retorno.

Com relação à qualidade metalúrgica, a utilização do *pellet feed* não resultou em alterações significativas no RDI e na redutibilidade, conforme as figuras 5.2(c) e 5.2(d).

Pellet Screenings (condições 4 e 5)

Apesar do bom desempenho quanto à produtividade do processo, a entrada do produto *pellet screenings* na mistura levou à uma queda na resistência mecânica do sinter, conforme figuras 5.2(a) e 5.2(b).

Essa tendência pode ser revertida na planta de sinterização industrial, com uma maior adição de combustível ou redução da velocidade de máquina de sinter, explorando a vantagem da maior produtividade desse produto em relação ao *sinter feed* substituído.

A princípio, explicar essa queda na resistência mecânica do sinter só seria possível aprofundando-se mais o estudo, onde seriam necessárias, dentre outras coisas, avaliações granuloquímicas dos minérios para a determinação da distribuição da SiO_2 e Al_2O_3 nas diferentes faixas granulométricas do material. De antemão, pode-se afirmar que a maior concentração de SiO_2 nas frações mais finas do minério favorece a formação de escória e a resistência do sinter.

A qualidade metalúrgica, por sua vez, não foi significativamente afetada pela entrada do produto *pellet screenings*, conforme figuras 5.2(c) e 5.2(d).

Micro Pellet (condições 6 e 7)

A participação do *micro pellet* na mistura, em substituição ao minério D, ocasionou queda no *shatter index*; o *tumbler index* não sofreu grande alteração, conforme figuras 5.2(a) e 5.2(b).

Também nesse caso, essa tendência de queda na resistência poderia ser revertida na sinterização industrial, elevando a adição de combustível ou reduzindo a velocidade da máquina de síter, explorando a vantagem desse produto em relação ao *sinter feed* substituído.

O RDI (degradação durante redução) dos sínteres, nesses casos, apresentou-se ligeiramente mais elevado que o do nível referência, conforme figura 5.2(c). Isso pode estar associado aos teores mais elevados de Al_2O_3 e TiO_2 do *micro pellet* em relação ao minério D. Esses compostos promovem a intensificação da degradação do material durante a etapa de redução hematita/magnetita.

Quanto à redutibilidade, os sínteres, nessas condições de teste, apresentaram a tendência de serem mais redutíveis, conforme figura 5.2(d). A princípio, isso se deve à porosidade da *micro pellet*, pois, por se tratar de um aglomerado de partículas individuais, apresenta elevada porosidade facilitando o acesso do gás redutor e favorecendo a redutibilidade.

5.2 Segunda etapa

Os resultados das avaliações realizadas na segunda etapa desse estudo são relacionadas, de forma itemizada, a seguir:

- i. composição química dos sínteres produzidos a partir das diferentes condições de teste na tabela 5.11;
- ii. resultados dos ensaios de sinterabilidade nas diferentes condições de teste na tabela 5.12 e figuras 5.5 (a-d);
- iii. resultados dos ensaios de caracterização dos sínteres na tabela 5.13 e figuras 5.6 (a-d);
- iv. resultados individuais de caracterização dos sínteres nas tabelas 5.14 a 5.16.

TABELA 5.11 - Resultados das análises químicas dos sinteres (% em peso).

Composto/Elemento	(1) Nível Referência (%)	(2) 25% de Pellet feed (%)	(3) 50% de Pellet feed (%)
Fe(t)	59,51	59,19	59,34
FeO	5,24	5,96	5,05
SiO₂	4,58	4,82	4,68
Al₂O₃	0,86	0,88	0,84
CaO	7,26	7,54	7,49
MgO	1,36	1,42	1,36
P	0,044	0,044	0,044
B2	1,59	1,56	1,60
Zn	0,010	0,010	0,010
S	0,005	0,006	0,006
Cu	0,006	0,006	0,006
K₂O	0,024	0,025	0,025
Na₂O	0,006	0,007	0,008
Mn	0,516	0,508	0,506
TiO₂	0,043	0,045	0,042
Cr	0,011	0,013	0,012
V	0,007	0,008	0,007

TABELA 5.12 - Resultados dos ensaios de sinterabilidade com diferentes misturas.

Condição de teste	H₂O (%)	Peso Seco carregado (kg)	Peso do bolo (kg)	Tempo sinterização (min)	Retorno <5mm (%)	Retorno Total (%)	Produtividade (t/h/m²)	Coke rate (kg/t)
1	5,87	80,44	77,04	25,9	18,61	24,86	1,711	50,61
2	5,87	80,43	76,99	26,0	18,24	24,49	1,715	50,37
3	5,93	79,28	75,74	26,3	18,18	24,43	1,565	50,50

TABELA 5.13 - Resultados de caracterização física e metalúrgica dos sínteres.

Condição de teste	Shatter index (%)	Tumble Index (%)	RDI (%)	Redutibilidade (%)
1	80,43	69,56	22,53	74,30
2	80,60	71,38	22,27	74,78
3	80,18	70,36	21,81	76,77

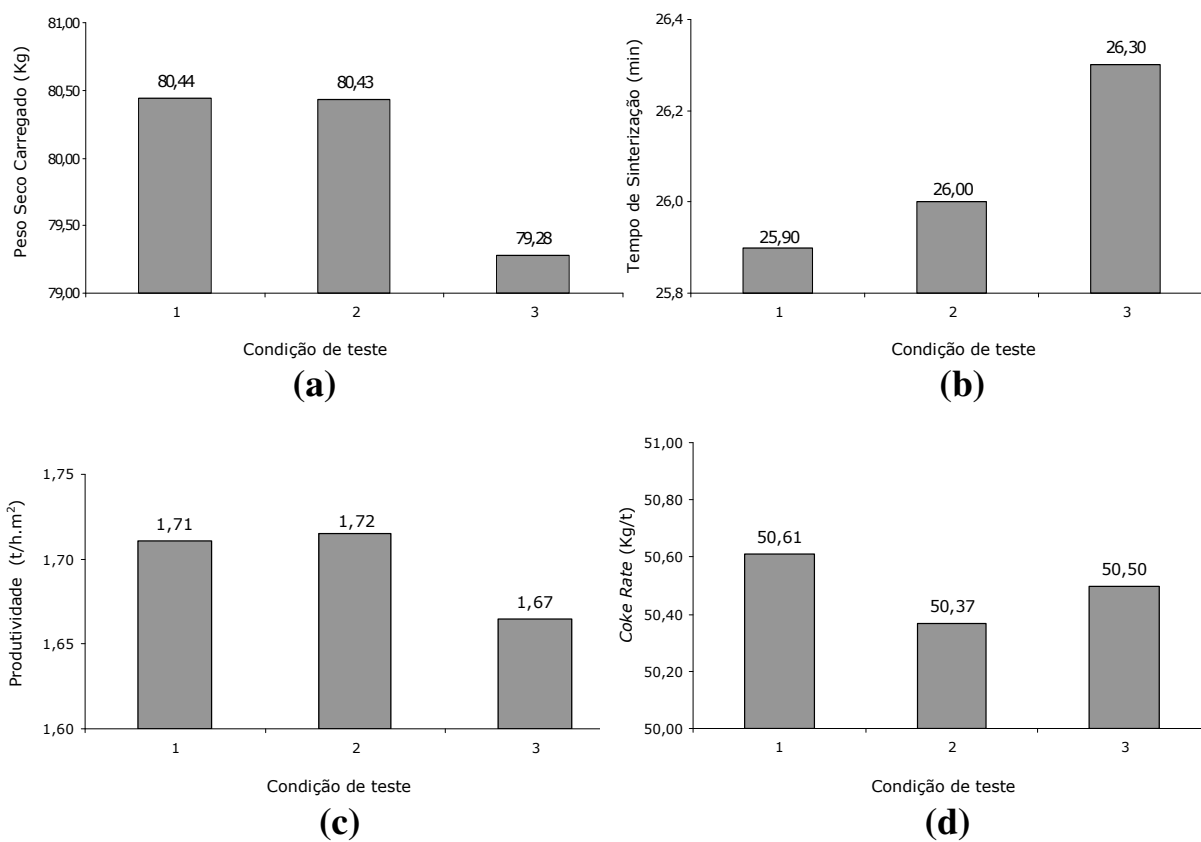


Figura 5.5 - Resultados dos ensaios de sinterabilidade nas diferentes condições de teste.

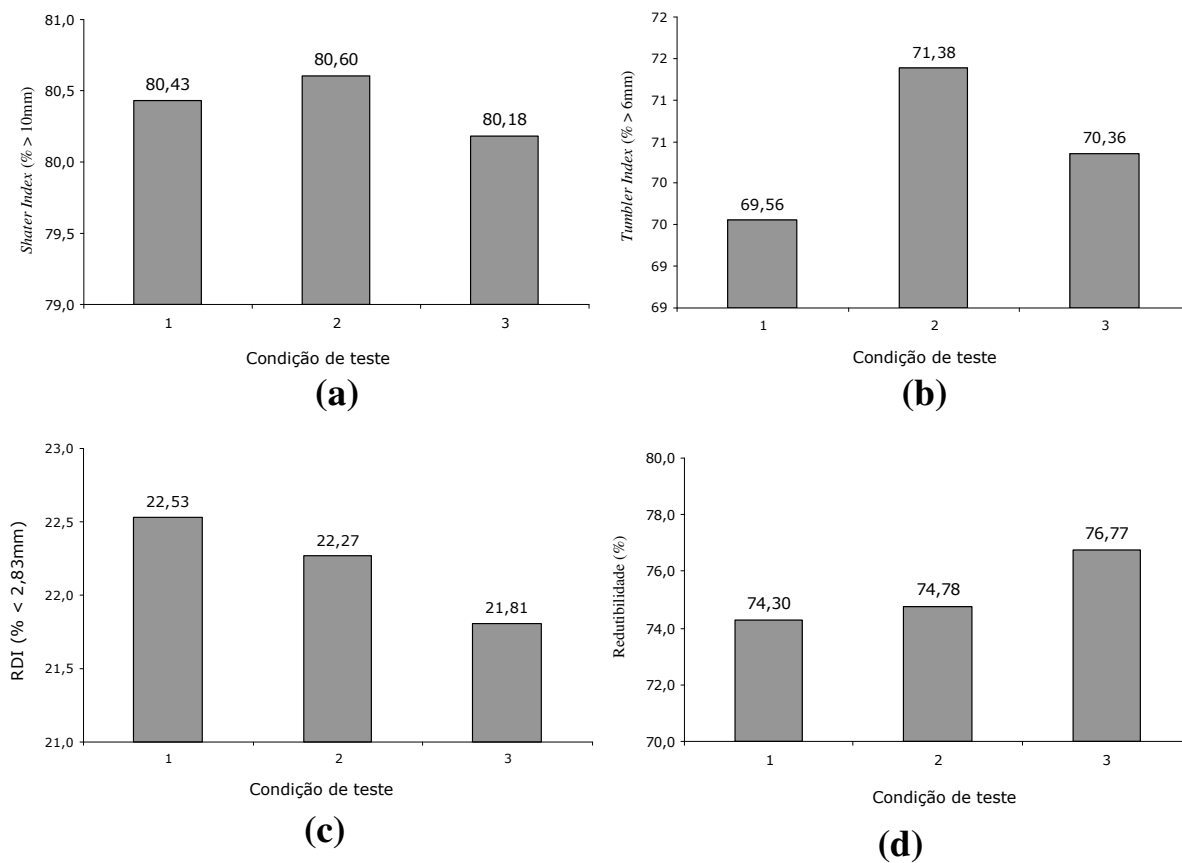


Figura 5.6 - Resultados dos ensaios de caracterização dos sinteres nas diferentes condições de teste.

TABELA 5.14 - Resultados individuais das misturas base de referência.

Queima	H ₂ O (%)	Peso Seco Carregado (kg)	Peso do Bolo (kg)	Tempo Sinterização (min)	Retorno < 5mm (%)	Retorno Total (%)	Coke Rate (kg/t)	Produtividade (t/h.m ²)	Shatter test (%)	Tumbler test (%)	RDI (%)	RI (%)
05	5,80	79,73	76,31	26,1	17,92	24,17	50,17	1,700	80,90	69,82	22,19	72,77
06	5,90	80,61	77,20	26,2	18,14	24,39	50,25	1,710	79,95	69,29	22,86	75,82
07	5,90	80,98	77,62	25,5	19,77	26,02	51,42	1,725				
Média	5,87	80,44	77,04	25,9	18,61	24,86	50,61	1,711	80,43	69,56	22,53	74,30

TABELA 5.15 - Resultados individuais do *pellet feed* substituindo 25% do minério (D).

Queima	H ₂ O (%)	Peso Seco Carregado (kg)	Peso do Bolo (kg)	Tempo Sinterização (min)	Retorno < 5mm (%)	Retorno Total (%)	Coke Rate (kg/t)	Produtividade (t/h.m ²)	Shatter test (%)	Tumbler test (%)	RDI (%)	RI (%)
02	6,00	80,59	77,28	25,4	19,35	25,60	51,07	1,735	80,25	71,42	22,82	72,97
03	5,80	80,48	77,07	26,7	17,82	24,07	50,02	1,682	80,95	71,33	21,71	76,59
04	5,80	80,23	76,63	25,9	17,55	23,80	50,02	1,729				
Média	5,87	80,43	76,99	26,0	18,24	24,49	50,37	1,715	80,60	71,38	22,27	74,78

TABELA 5.16 - Resultados individuais do *pellet feed* substituindo 50% do minério (D).

Queima	H₂O (%)	Peso Seco Carregado (kg)	Peso do Bolo (kg)	Tempo Sinterização (min)	Retorno < 5mm (%)	Retorno Total (%)	Coke Rate (kg/t)	Produtividade (t/h.m²)	Shatter test (%)	Tumbler test (%)	RDI (%)	RI (%)
17	5,80	78,76	75,06	26,2	17,71	23,96	50,35	1,667	80,10	70,44	21,43	77,12
18	6,00	80,01	76,60	26,7	18,46	24,71	50,54	1,656	80,25	70,27	22,19	76,42
19	6,00	79,05	75,56	26,1	18,37	24,62	50,62	1,671				
Média	5,93	79,28	75,74	26,3	18,18	24,43	50,50	1,665	80,18	70,36	21,81	76,77

5.2.1 Discussão dos resultados da segunda etapa

5.2.1.1 Ensaio de sinterabilidade

A produtividade do nível com 25% de *pellet feed* foi tecnicamente igual à de referência. Contudo, houve uma redução nesse parâmetro, quando sua participação foi de 50% da mistura de minérios, conforme mostrado na figura 5.5(c). Esse fato está ligado a granulometria extremamente fina do material, o que leva ao afinamento da mistura, com a perda de permeabilidade do leito de sinterização.

Isso é mostrado na tabela 4.8, pois, com a utilização de 25% do *pellet feed*, a participação de material na fração > 1 mm diminuiu de 53,10% para 49,98% e a fração < 150 # aumentou de 22,34% para 27,68%. Com a participação de 50% do *pellet feed* os valores foram respectivamente: 46,85% > 1mm e 33,02% < 150#.

Essa variação da granulometria do material, no nível com 50% de *pellet feed*, refletiu negativamente no tempo de sinterização, conforme tabela 5.5(b).

Não ocorreram variações significativas no consumo específico de combustível (*coke rate*). Com a introdução de 25% ou 50% de *pellet feed* substituindo o minério D a média do consumo específico manteve-se em torno de 50,50kg/t de sinter produzido, conforme mostra a figura 5.5(d).

5.2.1.2 Caracterização física e metalúrgica do sinter

Quanto ao aspecto de qualidade física, observa-se que os sínteres produzidos apresentaram grandes alterações quanto à resistência mecânica. As condições de 25% e 50% de *pellet feed* apresentaram estabilidade na resistência à queda (*shatter index*), conforme a figura 5.6(a).

A resistência à abrasão (*tumbler index*), do nível com 25% de *pellet feed*, foi maior que a referência. Quando a substituição foi de 50%, houve uma ligeira redução, contudo, mantendo-se, ainda, acima do índice do nível referência, conforme figura 5.6(b).

Com relação à qualidade metalúrgica, a utilização de 25% de *pellet feed* não resultou em alterações significativas no RDI e na redutibilidade. Porém, quando utilizado no percentual de 50%, nota-se uma ligeira melhora no item RDI, acompanhado, também, pelo aumento da redutibilidade, conforme figuras 5.6(c) e 5.6(d).

5.3. Resultados dos índices médios de granulação (GI) e tamanhos médios de partículas de misturas

Os índices médios de granulação das misturas testadas, na primeira etapa e na segunda etapa, bem como os tamanhos médios das quasi partículas (ou micro pelotas) e partículas primárias das misturas, são mostrados na tabela 5.17 e figuras 5.7 e 5.8.

TABELA 5.17 - Resultados dos índices médios de granulação das misturas (GI₁ e GI₂), tamanhos médios das partículas das misturas testadas e tamanhos médios das quasi partículas. GI₁ - Método Usiminas. GI₂ - Método NSC.

Nível	Tamanho Médio das Partículas Primárias (mm)	Tamanho Médio das Quasi - Partículas (mm)	Índice de Granulação GI ₁ (%)	Índice de Granulação GI ₂ (%)
Referência	2,08	3,61	98,99	95,77
25% de Pellet feed	2,04	3,52	97,33	92,71
50% de Pellet feed	1,95	3,61	96,88	93,09
100% de Pellet feed	1,67	3,41	96,11	92,44
50% de Sinter feed	2,09	3,43	98,17	93,19
100% de Sinter feed	2,09	3,26	95,70	88,28
50% de Micro pellet	2,27	3,57	97,34	92,74
100% de Micro pellet	2,56	3,65	94,09	88,60

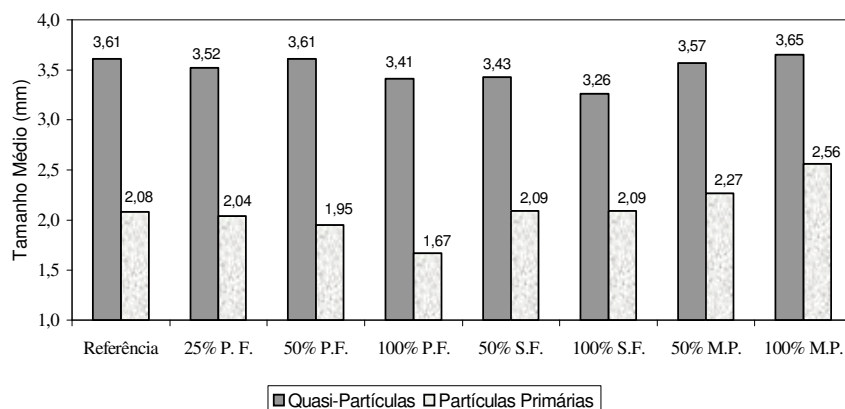


Figura 5.7 - Tamanho médio das quasi-partículas (ou micro pelotas) e partículas primárias.

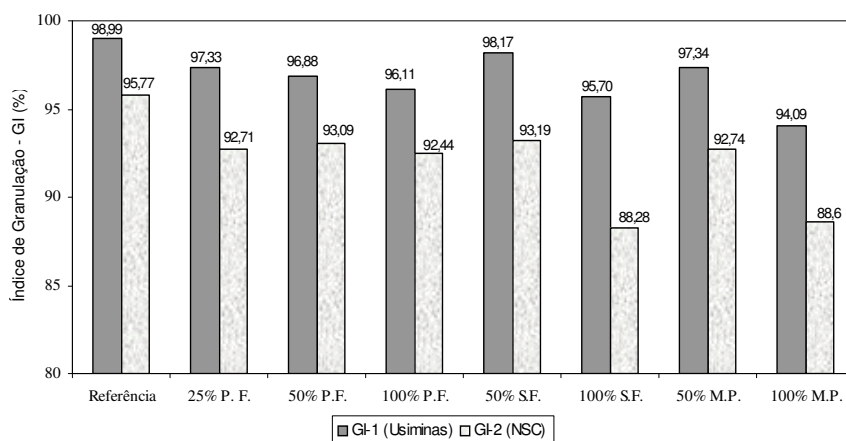


Figura 5.8 - Índices de granulação das misturas (GI).

5.4. Discussão dos resultados dos índices de granulação das misturas (GI), tamanhos médios de partículas primárias e quasi-partículas

Considerando isoladamente o índice de granulação (GI) da mistura, sabe-se que, quanto mais alto, melhor será a capacidade de aglomeração a frio dos componentes dessa mistura.

Além da mistura de referência, foram determinados os índices de granulação e tamanhos das partículas das misturas testadas na primeira e segunda etapas do estudo, conforme tabela 5.17 e figuras 5.7 e 5.8.

Os resultados mostram que, independente do método de cálculo adotado, a mistura que gerou os maiores índices de granulação, foi a do nível Referência (98,99% pelo método Usiminas - GI₁ e 95,77%, pelo método da NSC - GI₂).

O tamanho médio das partículas primárias das misturas é função direta da granulometria dos componentes. Assim, quanto maior a adição de material fino, menor será o tamanho médio das partículas primárias. Observa-se que, à medida que a participação do *pellet feed* aumenta, o tamanho médio das partículas primárias diminui. A mistura com 100% de *pellet feed* foi a que apresentou o menor tamanho médio de partículas primárias. O maior tamanho médio foi obtido pela mistura com 100% de *micro pellet*.

As quasi-partículas representam as micro pelotas formadas após o misturamento e que serão carregadas no leito ou panela, para sinterização. O tamanho médio das quasi partículas (ou micropelotas), obtido após o misturamento, manteve-se praticamente inalterado nas oito misturas, na faixa de 3,50mm, mas as misturas com *pellet feed* apresentaram um maior crescimento em relação às partículas primárias.

6. Estudo da Microestrutura

6.1. Introdução

Com o objetivo conhecer as fases presentes nos sinteres e a sua microestrutura, foram realizados estudos de microscopia óptica e eletrônica de varredura. As amostras foram assim codificadas:

- A1 – Sínter piloto nível 1 – referência
- A2 – Sínter piloto nível 2 – 50% do *pellet feed* Samarco substituindo 50% do minério D
- A3 – Sínter piloto nível 3 – 100% do *pellet feed* Samarco substituindo 100% do minério D
- A4 – Sínter piloto nível 4 – 50% do *pellet screenings* Samarco substituindo 50% do minério D
- A5 – Sínter piloto nível 5 – 100% do *pellet screenings* Samarco substituindo 100% do minério D
- A6 – Sínter piloto nível 6 – 50% do *micro pellet* Samarco substituindo 50% do minério D
- A7 – Sínter piloto nível 7 – 100% do *micro pellet* Samarco substituindo 100% do minério D
- A8 – Sínter piloto nível referência – utilizando o minério A como recebido
- A9 – Sínter piloto – 25% de *pellet feed* Samarco substituindo 25% do minério D (utilizando o minério A como recebido)
- A10 – Sínter piloto – 50% de *pellet feed* Samarco substituindo 50% do minério D (utilizando o minério A como recebido)
- A11 – Sínter piloto – 25% de *pellet feed* Samarco substituindo 25% do minério D (utilizando o minério A preparado como utilizado)

6.2. METODOLOGIA

A caracterização das amostras foi feita utilizando-se o microscópio óptico de luz refletida (MOLR) e o microscópio eletrônico de varredura (MEV) com microanalisador EDS (espectrômetro de raios-X dispersivo em energia) associado, o que possibilitou a identificação das fases presentes nas amostras e uma avaliação da morfologia dessas fases. O estudo foi realizado utilizando-se secções polidas representativas de cada um dos sínteres. Os equipamentos utilizados foram: um microscópio óptico da marca Leitz, modelo Orthoplan, com câmara fotográfica acoplada; um MEV da marca Jeol, modelo JSM-5410, tendo acoplado o EDS marca Noran, modelo TN-M3055, capaz de analisar todos os elementos a partir do boro. A preparação das amostras para a observação no MEV consistiu de um recobrimento com uma fina película de carbono obtida na metalizadora-evaporadora modelo Desk II, marca Denton.

6.3. Análise

Os sínteres de minério de ferro são essencialmente constituídos por quatro fases: hematita, magnetita, silicoferrita de cálcio e alumínio (SFCA) e silicatos de cálcio amorfos, resultantes da mistura de diferentes minérios de ferro com os fundentes e com o coque que é o combustível usado na mistura a sinterizar. Do ponto de vista da microestrutura há de considerar-se ainda a presença dos poros, que têm as seguintes origens: a porosidade própria do minério, os poros de compactação que se formam durante a distribuição do material no leito, os poros resultantes do escape de voláteis e as trincas ou fissuras, devidas a esforços mecânicos e termo-mecânicos.

Serão apresentados a seguir todos os aspectos microestruturais observados nas amostras estudadas e ressaltadas as diferenças observadas entre as amostras a partir da substituição de um minério da mistura de referência por *pellet feed*, *pellet screenings* e *micro pellets*.

6.3.1. Hematita

A hematita apresenta feições microestruturais variadas resultantes da evolução do processo de sinterização. Ocorre tanto como porções preservadas do minério original (hematita primária ou residual) como na forma de fase neoformada resultante das variações nas condições atuantes durante o processo.

As porções hematíticas residuais do minério encontram-se distribuídas heterogeneamente no sinter e são compostas por grãos policristalinos, com cristais granulares (equiaxiais) anédricos ou euédricos (figura 6.1a), e também cristais lamelares alongados (figura 6.1b), com tamanhos variados tanto como grãos de hematita fina, microcristalina, como grãos compostos de cristais mais grossos. Essas porções residuais podem mostrar porosidade, geralmente originária do minério. Esses grãos podem apresentar alguma evidência de reestruturação pelo processo, o que é evidenciado pela presença de fissuras, poros e de pequena quantidade de fases do sinter, na região próxima à borda do grão (figura 6.1a).

Algumas amostras quando observadas no MOLR com nicóis parcialmente cruzados, mostram uma feição diferente em alguns grãos residuais de hematita (figura 6.2a), com a formação de domínios intracristalinos orientados em vários cristais, evidentemente formados durante o processo de sinterização. Cristais de hematita maclados em grãos residuais também são observados (figura 6.2b). Ambos os aspectos se devem, provavelmente, à reestruturação incipiente na hematita. Essas feições são principalmente observadas nas amostras do sinter referência.

Na borda dos grãos residuais e próximo a fraturas, por vezes preenchidas por SFCA e silicato ou até mesmo com ocorrência de cristais de magnetita, observa-se a presença da hematita secundária, neoformada, em geral euédrica, resultante da reestruturação desse mineral durante a sinterização (figura 6.3). Essas transformações ocorrem devido apenas a efeitos térmicos e de oxidação-redução; além disso, a hematita pode sofrer a interferência (assimilação e/ou desestabilização) das demais fases presentes na amostra (figuras 6.4 e 6.5). Cristais de hematita euédricos, em geral equiaxiais, e tanto maciços

como esqueletais, são observados, e podem estar associados à SFCA e magnetita (figuras 6.6 e 6.7). Cristais esqueletais de hematita euédrica ocorrem formando intercrescimento com a SFCA e na borda de grãos residuais na amostra do sínter referência.

Nas bordas dos grãos residuais de hematita cristais com bordas arredondadas também ocorrem, mostrando coalescência e ligação por películas de silicato (figura 6.8a), podendo conter magnetita, SFCA e silicato, em bolsas intergranulares. Frequentemente, um intercrescimento fino de SFCA e silicato (fase escória) que ocorre entre os cristais euédricos e subédricos da hematita neoformada (figura 6.8b).

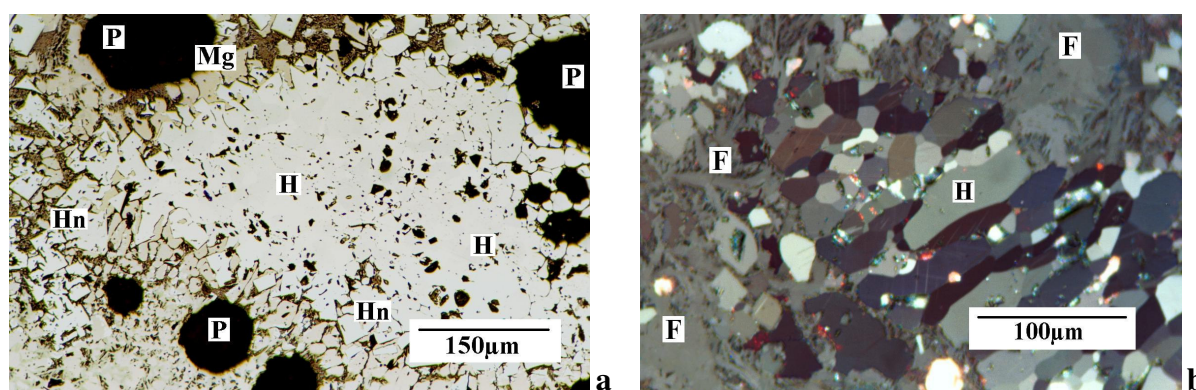


Figura 6.1 **a** – Grão policristalino de hematita(H) fina, com menor coalescimento nas bordas, onde se observam hematita neoformada(Hn) e magnetita(Mg), envolvendo parcialmente o grão; poros originados durante o processo de sinterização(P); amostra A1. MOLR – microscópio óptico de luz refletida; apenas polarizador (Ap). **b** – Grão policristalino de hematita(H) preservado, onde predominam cristais lamelares, em contacto com SFCA(F) tabular; amostra A10. MOLR; nicóis parcialmente cruzados (Npc).

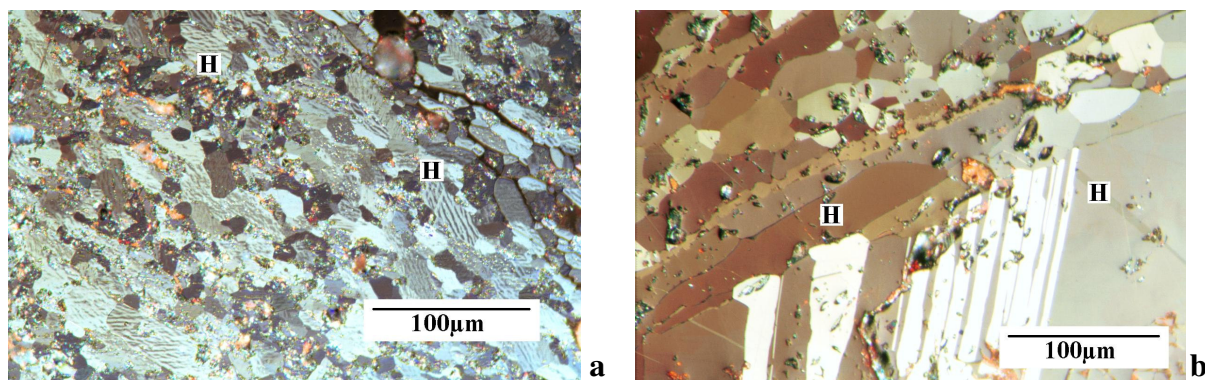


Figura 6.2 **a** – grão de hematita(H) lamelar, mostrando uma diferenciação intracristalina orientada; amostra A2. **b** – cristal de hematita(H) maclada, em borda de grão reliquiar de hematita lamelar; amostra A8. MOLR, Npc.

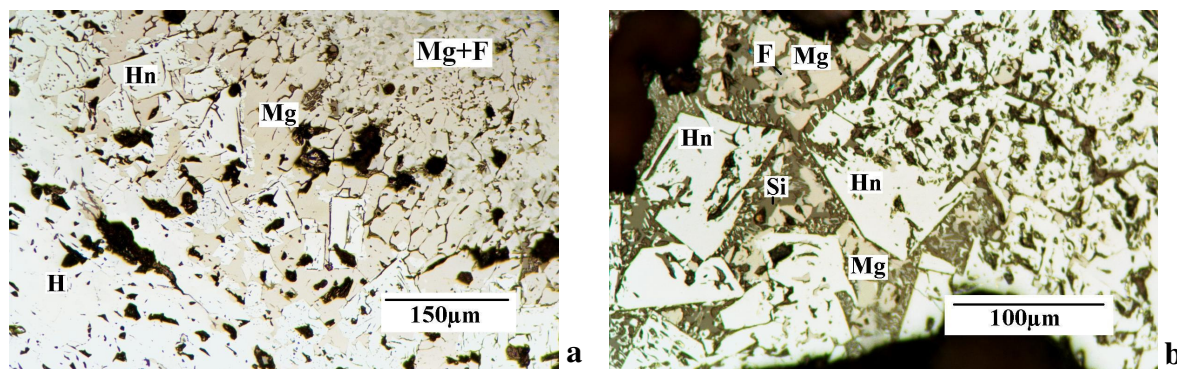
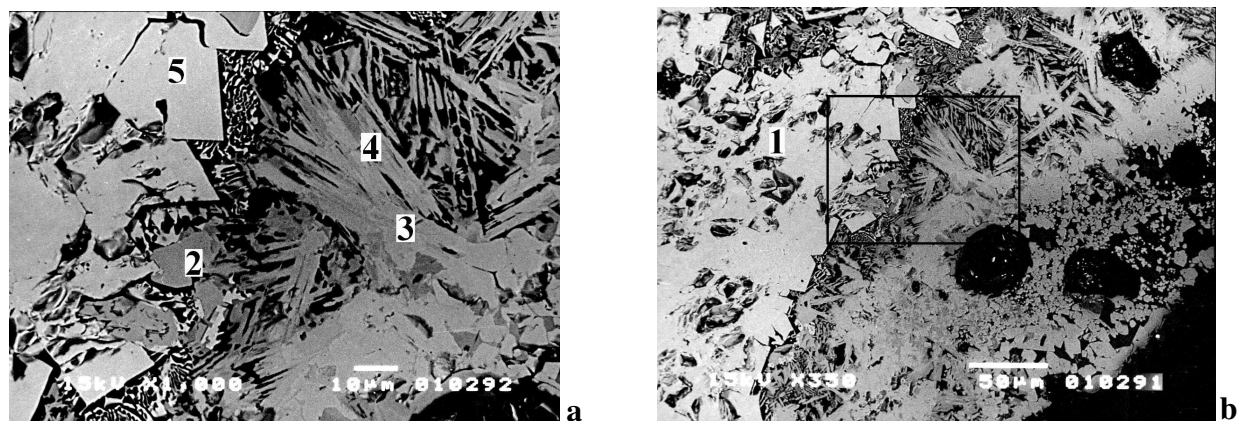


Figura 6.3 **a** – Contacto entre um grão de hematita(H) preservado e uma região de magnetita(Mg) predominante; na interface destas duas regiões, a magnetita mostra-se parcialmente coalescida, e observam-se cristais euédricos de hematita neoformada(Hn); na porção direita superior, há magnetita fina formando intercrescimento com SFCA(Mg+F); amostra A1. **b** – cristais euédricos de hematita(Hn), parcialmente esqueletais, contendo intersticialmente magnetita(Mg), SFCA(F) e silicato(Si); amostra A4. MOLR, Ap.



Área	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	MnO	Fase
1	2,57	0,00	28,13	69,30	0,00	0,00	Silicato
2	69,91	2,83	8,71	16,91	0,83	0,81	SFCA maciça
3	89,86	1,18	0,24	1,62	3,98	3,11	Magnetita
4	99,02	0,48	0,17	0,15	0,17	0,00	Hematita
5	71,06	2,77	7,90	16,96	0,65	0,67	SFCA tabular

Figura 6.4: Borda de grão residual de hematita lamelar mostrando coalescimento dos cristais. A magnetita ocorre associada a SFCA maciça, tabular e acicular. A fase silicática aparece preenchendo espaços entre os cristais das outras fases. Microscópio eletrônico de varredura(MEV), imagem de elétrons retroespalhados(IER); amostra A1.



Área	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	MnO	Fase
1	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	Hematita primária
2	89,33	0,97	0,00	2,84	5,12	1,73	Magnetita
3	85,95	1,46	1,72	7,87	3,01	0,00	Magnetita
4	74,33	2,17	7,12	15,32	1,06	0,00	SFCA
5	93,43	0,00	0,00	2,16	4,40	0,00	Hematita neoformada

Figura 6.5 - Grão de hematita primária mostrando coalescimento nas bordas, com hematita euédrica neoformada, em contacto com a SFCA acicular e tabular e ainda com intercrescimento de SFCA colunar e silicato intersticial. Magnetita fina, próxima aos poros resultantes do processo, é observada; amostra A1. A fotomicrografia **b** corresponde a ampliação da área marcada em **a**. MEV, IER.

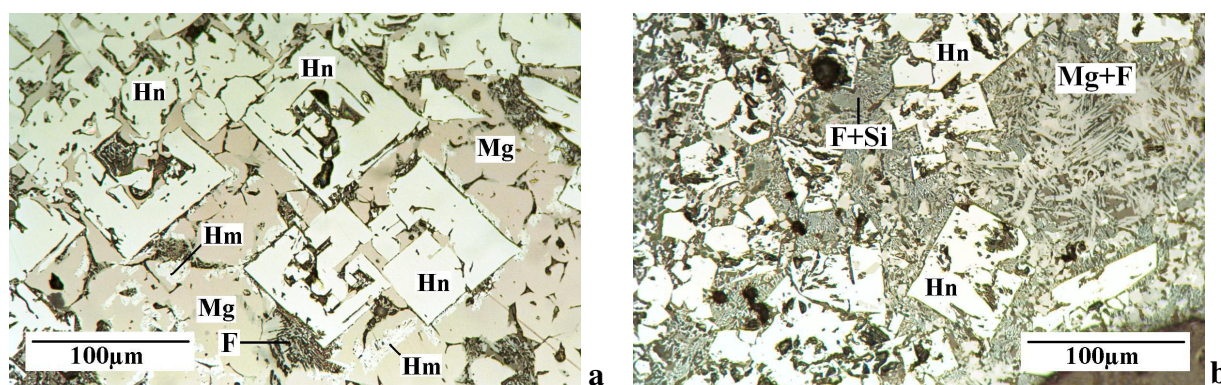
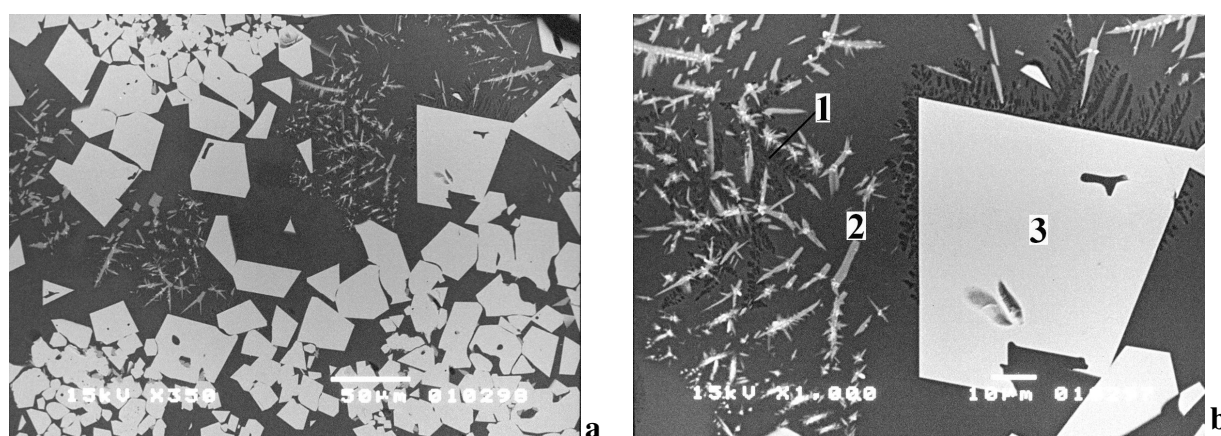


Figura 6.6 **a** – cristais euédricos de hematita neoformada(Hn) associados a magnetita(Mg) coalescida mostrando início de reoxidação com formação de hematita(Hm), principalmente nas bordas dos cristais, e ainda com SFCA(F) colunar; amostra A11. **b** – hematita neoformada, em cristais euédricos semi-esqueletais, em contacto com a SFCA acicular a tabular que ocorre associada com magnetita(Mg+F), mostrando ainda SFCA colunar associada com a fase silicática(F+Si); amostra A6. MOLR, Ap.



Área	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	MnO	Fase
1	28,98	1,61	26,99	42,42	0,00	0,00	Silicato
2	64,07	1,32	11,01	23,60	0,00	0,00	SFCA
3	95,09	0,55	0,17	1,37	0,94	0,99	Hematita

Figura 6.7 - Cristais euédricos de hematita envoltos pela fase silicática e SFCA (acicular). A fotomicrografia b é uma ampliação de parte de a; amostra A7. MEV, IER.

Outra feição comumente observada são monocristais de hematita, que são compostos de cristais de hematita euédrica coalescidos parcial ou totalmente, ou seja, um cristal único

com uma orientação uniforme (figura 6.9), de tamanho maior que os cristais originais dos minérios utilizados. A hematita quando está em contato com a magnetita geralmente origina novos cristais anédricos (as duas fases são concorrentes), porém quando a hematita não encontra resistência para crescer (em contato com o silicato) preserva as bordas retas da hematita. Cristais de hematita euédrica, coalescidos ou não, podem ocorrer circundando os poros originados durante o processo de sinterização.

As microanálises realizadas para a hematita neoformada mostram a presença de alumínio, cálcio, silício, magnésio e até manganês além do ferro dominante, indicando que houve assimilação desses elementos pela hematita durante o processo.

6.3.2. Magnetita

A magnetita é quase sempre uma fase neoformada, originada da redução da hematita e da goethita dos minérios de ferro. Contudo, raramente, magnetita relictas em grãos de hematita, proveniente do minério original, pode ser observada.

A magnetita encontra-se frequentemente associada à SFCA (figura 6.10); porém, ocorre também associada e intercrescida com a hematita (figura 6.11). Pode ocorrer envolvendo núcleos parcialmente fundidos de fases silicáticas ou poros grandes originados durante o processo (figura 6.12), geralmente na forma de agregados muito finos de cristais parcial ou totalmente coalescidos, e algumas vezes como cristais bem formados não coalescidos.

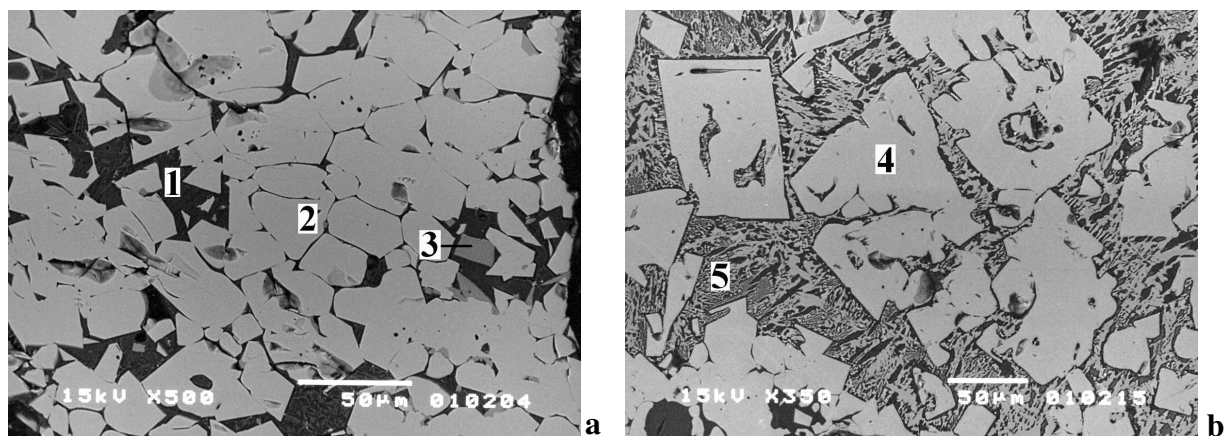
Agregados de cristais de magnetita com SFCA distribuída intergranularmente é o principal arranjo microestrutural presente nas amostras dos sinteres (figura 6.13); algumas vezes a SFCA assimila a magnetita, desestabilizando seus cristais, deformando suas bordas e produzindo uma magnetita anédrica e chegando mesmo a substituir quase totalmente a magnetita (cristais pseudomorfs de SFCA), caracterizando a SFCA maciça. Cristais de magnetita em início de reoxidação para hematita são observados na figura 6.14.

As microanálises realizadas para a magnetita revelam, além dos teores de ferro altos esperados, teores menores de alumínio, silício, cálcio e magnésio, assimilados durante o processo.

6.3.3. Ferrita de cálcio, contendo silício e alumínio (FCSA)

Essa fase é impropriamente denominada por alguns de silicoferrita de cálcio e alumínio (SFCA). Ela é uma fase cristalina formada durante o processo de sinterização. Ocorre nas formas maciça, acicular a tabular e colunar; em geral, os cristais são euédricos, mas, mais raramente, podem ser anédricos (figuras 6.15 e 6.16). A forma maciça ocorre associada com magnetita (intergranularmente), podendo substituir em parte esse mineral, o que resulta em cristais pseudomórficos. Os cristais aciculares variam de tamanho e forma, desde agulhas típicas até gradualmente chegar a tabulares (figura 6.16a). A forma colunar (figura 6.16b) que se distribui em espaços existentes entre os cristais e agregados de cristais de hematita e magnetita pode mostrar porções mais claras (enriquecidas em ferro); freqüentemente ocorre intercrescida com a fase silicática. Sua feição típica é mostrada na figura 6.16b, onde têm-se um cristal central mais bem desenvolvido de onde crescem outros cristais menores. Pode ocorrer ainda intergranularmente ou formando intercrescimento com os cristais de hematita. Comumente observam-se cristais que crescem radialmente aos poros de sinterização.

As microanálises obtidas para essa fase mostram valores de ferro altos, seguido pelo cálcio que pode mostrar variações no seu teor (áreas 6 e 7 da figura 6.16). Os valores de silício e alumínio são mais baixos que os anteriores, embora um pequeno aumento da sílica na forma colunar possivelmente em função do intercrescimento da SFCA com o silicato, seja observado.



Área	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	MnO	Fase
1	18,40	1,82	30,83	48,42	0,18	0,36	Silicato
2	97,82	0,39	0,81	0,45	0,05	0,48	Hematita neoformada
3	76,09	2,01	7,28	14,27	0,00	0,35	SFCA colunar
4	99,22	0,52	0,10	0,00	0,02	0,14	Hematita neoformada
5	17,30	2,04	31,03	49,08	0,22	0,33	Silicato

Figura 6.8 **a** – Cristais de hematita (ou magnetita) coalescidos, com alguma fase silicática intersticial. **b** – Cristais de hematita neoformada, euédrica e parcialmente esqueletal, com pouca coalescência, ligados por uma matriz de SFCA e silicato intercrescidos (fase escória); há alguma inclusão desta matriz na hematita. Amostra A4. MEV, IER.

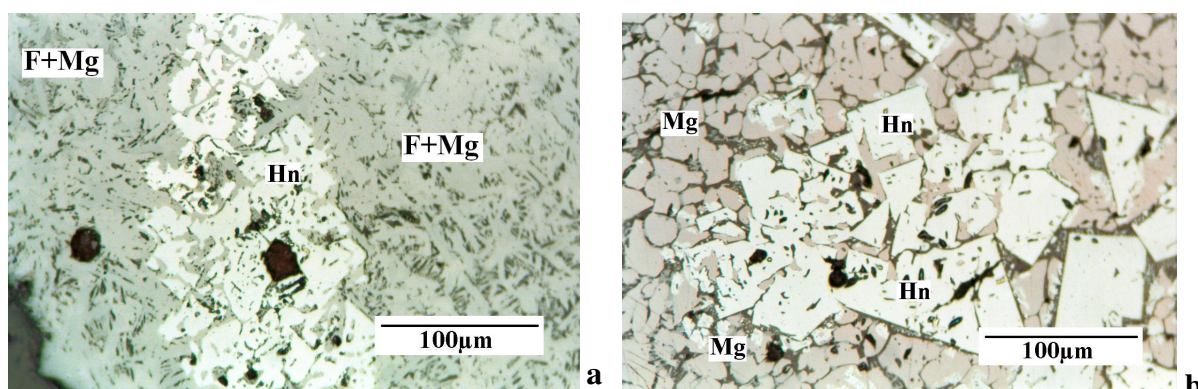
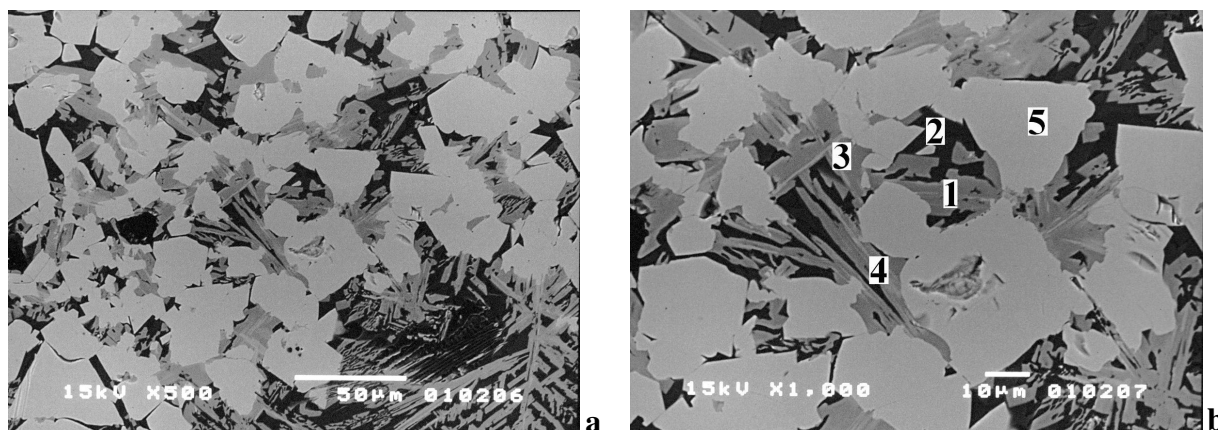


Figura 6.9 **a** – região composta por SFCA e magnetita anédrica(F+Mg) envolvendo hematita neoformada (Hn) em processo de coalescência; amostra A6. **b** – hematita neoformada em processo de coalescência, em meio a um agregado de cristais de magnetita(Mg), parcialmente coalescidos; amostra A8. MOLR, Ap.



Área	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	Fase
1	21,43	1,42	33,39	43,76	SFCA
2	3,41	0,00	27,60	68,99	Silicato
3	76,63	1,50	7,11	14,76	SFCA
4	78,13	1,28	6,11	14,48	SFCA
5	98,15	0,30	0,06	1,48	Magnetita

Figura 6.10 - Cristais euédricos a subédricos de magnetita associados a SFCA (tabular, maciça e acicular) que consome suas bordas, tornando a magnetita localmente anédrica. A fase silicática ocorre intersticialmente. A fotomicrografia **b** é uma ampliação de parte de **a**; amostra A4. MEV, IER.

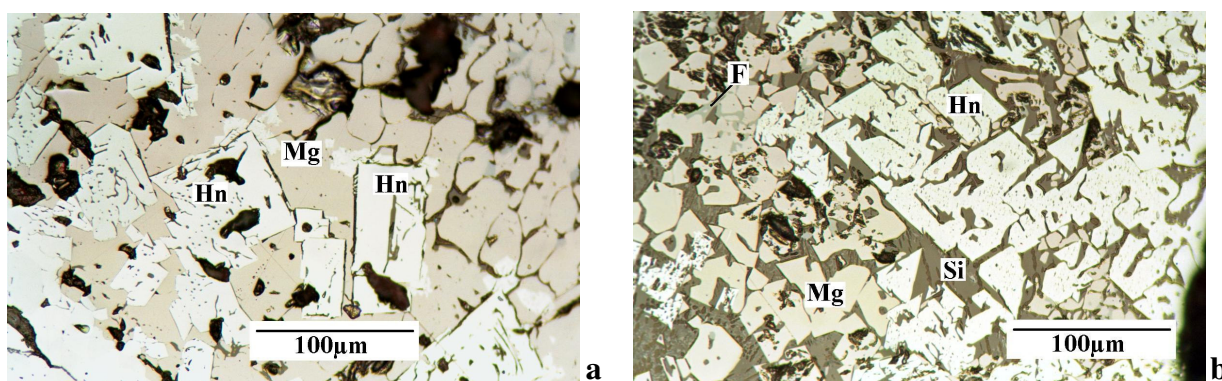


Figura 6.11 **a** – Cristais euédricos de hematita neoformada(Hn) em contacto com magnetita coalescida, geralmente com bordas arredondadas, com e sem películas de silicato intersticiais. **b** – hematita neoformada euédrica semi-esquelética e magnetita subédrica, com a fase silicática intersticial. SFCA(F) maciça também ocorre associada à magnetita. Amostra A1. MOLR, Ap.

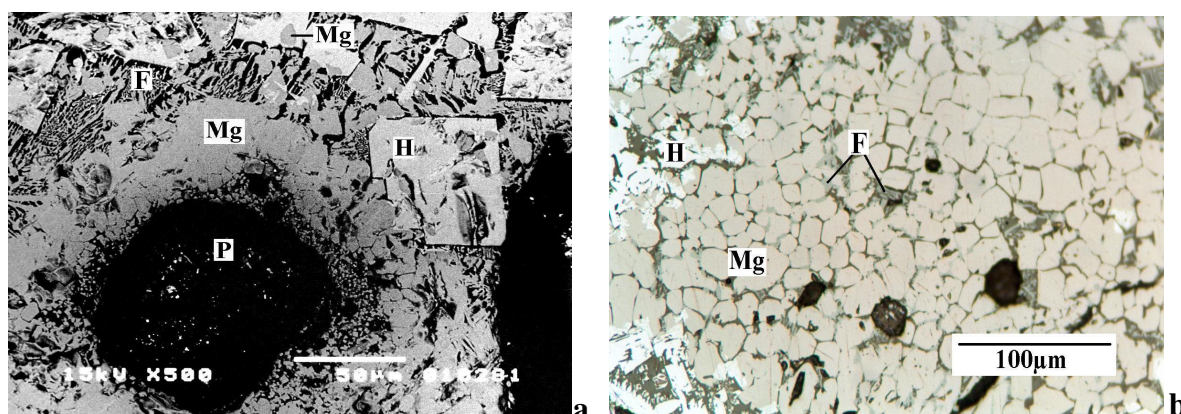
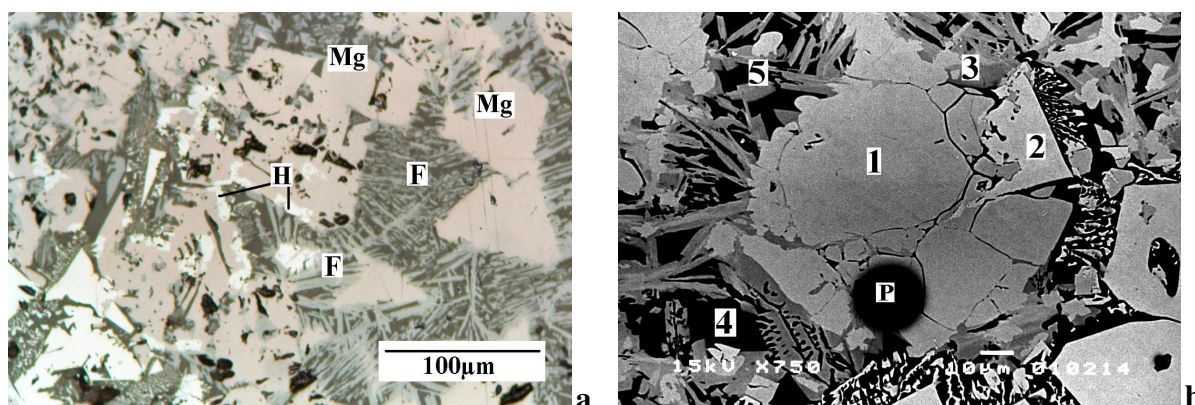


Figura 6.12 **a** – poro(P) originado durante o processo circundado por um agregado de cristais de magnetita(Mg) muito fina coalescida. Cristais euédricos de hematita(H) e SFCA(F) dendrítica e intercrescida com silicatos são observados; amostra A1. MEV, IER. **b** – magnetita granular fina parcialmente coalescida, mostrando SFCA intergranular e início de oxidação para hematita; amostra A8. MOLR, Ap.



Área	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	MnO	Fase
1	93,41	0,00	0,12	2,17	2,63	1,66	Magnetita
2	96,74	0,30	1,53	0,77	0,20	0,46	Hematita neoformada
3	73,09	2,84	8,83	13,39	0,11	1,09	SFCA
4	20,67	2,88	34,77	41,00	0,67	0,00	Silicato
5	80,01	1,33	5,62	13,04	0,00	0,00	SFCA

Figura 6.13 **a** – Cristais euédricos de magnetita(Mg) com início de oxidação nas bordas(H), associados a SFCA(F) acicular que cresce a partir de suas bordas; SFCA e silicato intercrescidos; amostra A3. MOLR, Ap. **b** – cristais de magnetita ligados a SFCA tabular, maciça e acicular; hematita neoformada também ocorre; amostra A1. MEV, IER.

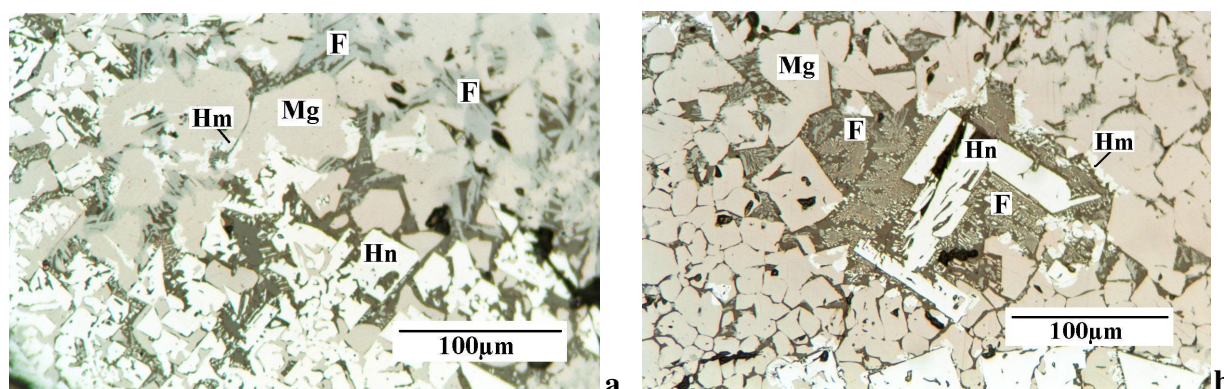


Figura 6.14 **a** – Cristais de magnetita(Mg) em início de oxidação(Hm), principalmente nas bordas dos grãos, associada com SFCA(F) acicular e maciça, hematita neoformada(Hn) e silicato. **b** – cristais de magnetita(Mg) coalescidos, mostrando início de oxidação; SFCA colunar intercrescida com silicato e hematita neoformada euédrica são observadas. Amostra A8. MOLR, Ap.

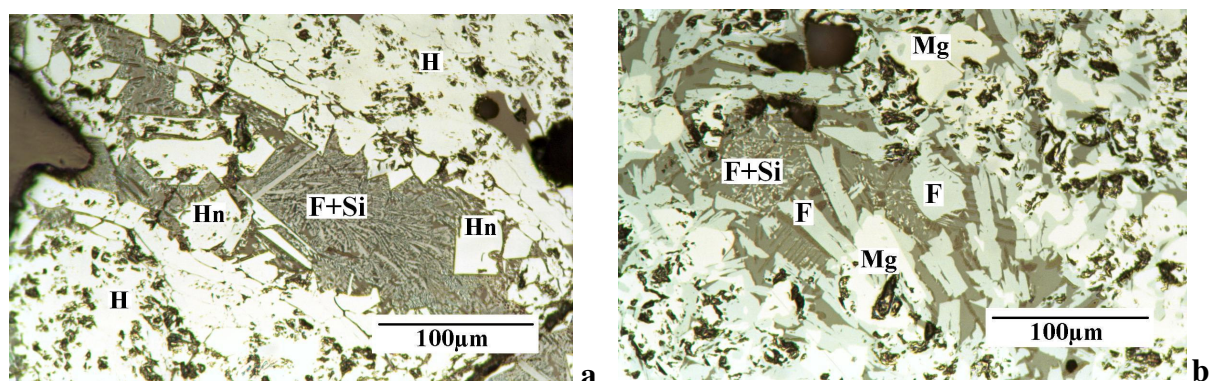


Figura 6.15 **a** – bolsa de SFCA fina e silicato intercrescidos(F+Si), rodeada por grãos de hematita residual(H) cuja borda mostra cristais transformados; cristais euédricos de hematita(Hn) são observados no contato da bolsa com a hematita residual. **b** – cristais tabulares e maciços de SFCA associados à magnetita(Mg), intercrescimentos da SFCA e silicato intersticial. Amostra A1. MOLR, Ap.

6.3.4. Fase silicática

Os silicatos são formados a partir da mistura dos minérios e da ganga quartzosa com os fundentes utilizados no processo, principalmente envolvendo o serpentinito, por um processo de fusão parcial e reação, devido às elevadas temperaturas alcançadas durante o processo de sinterização.

São essencialmente silicatos de cálcio (silicato dicálcico), contendo teores de cálcio elevados (até 70%) e medianos de silício (30%). Os teores de cálcio podem mostrar valores mais baixos (em torno de 40%), quando há uma presença mais significativa de ferro. A fase silicática é considerada como essencialmente vítrea ou amorfa (Vieira et al, 2003).

As principais feições relacionadas à fase silicática são:

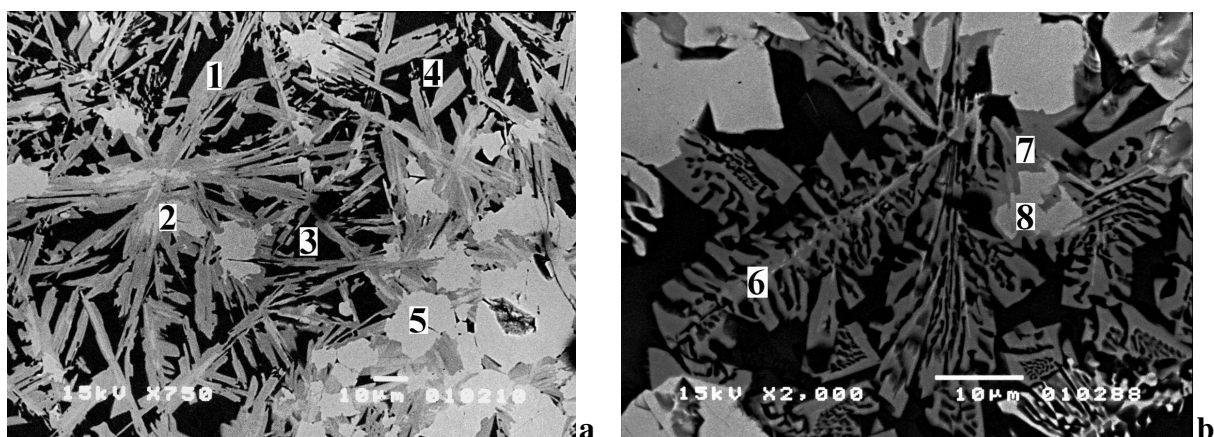
- ocorre intergranularmente aos cristais de hematita e magnetita;
- forma intercrescimento com a SFCA acicular e colunar, principalmente; essa feição, muito comum, é denominada de “fase escória” na literatura;

- ocorre também como núcleos preservados, principalmente a partir do serpentinito, que mostram fusão parcial, mas pouco grau de reação (figuras 6.17 e 6.18).

6.3.5. Poros, fraturas e trincas

Poros de tamanhos e formas variadas são observados, incluindo:

- poros de empacotamento (das partículas do sinter feed e dos outros materiais usados), que são irregulares, relativamente grandes, e mostram-se muito alterados pelo processo de sinterização;
- a porosidade original do minério que está presente nos grãos de hematita residuais (são irregulares e freqüentemente de tamanho menor que os demais);
- poros arredondados formados durante o processo de sinterização devido à liberação de voláteis. Essas regiões são ambientes favoráveis a reações, como é evidenciado, por exemplo, pela presença de magnetita e hematita coalescidas, circundando esses poros e pela presença de SFCA crescendo radialmente (figura 6.19a e b);
- fraturas irregulares (figura 6.20), que ocorrem cortando as diversas fases presentes e podem ou não estar preenchidas, freqüentemente por SFCA, pela fase silicática ou ainda pode conter alguma magnetita. Em grãos de hematita residual, observam-se fraturas onde a SFCA ocorre na forma colunar ou formando intercrescimento com a hematita, e vêm-se grãos de hematita euédrica e de magnetita bem formados. Trincas irregulares também podem interligar poros de tamanho maior. As fraturas ou trincas formam-se principalmente devido a esforços mecânicos e termo-mecânicos, durante o processo de sinterização, principalmente na fase de resfriamento.



Área	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	MnO	Fase
1	79,29	1,06	6,32	13,34	0,00	0,00	SFCA tabular
2	96,41	0,38	2,09	1,12	0,00	0,00	Magnetita
3	21,87	0,80	33,08	44,25	0,00	0,00	Silicato
4	7,50	0,28	31,78	60,12	0,00	0,33	Silicato
5	93,27	0,54	1,75	1,54	1,84	1,07	Magnetita
6	56,50	2,40	11,98	27,27	0,79	1,06	SFCA dendrítica
7	71,99	2,66	7,83	16,44	1,08	0,00	SFCA maciça
8	90,82	0,84	0,00	2,69	2,84	2,81	Magnetita

Figura 6.16 **a** – SFCA acicular a tabular e maciça associada à magnetita, consumindo suas bordas, dando origem a cristais anédricos; amostra A5. **b** – SFCA colunar intercrescida com silicato (fase escória) ocupando espaços entre cristais de hematita e magnetita; amostra A3. MEV, IER.

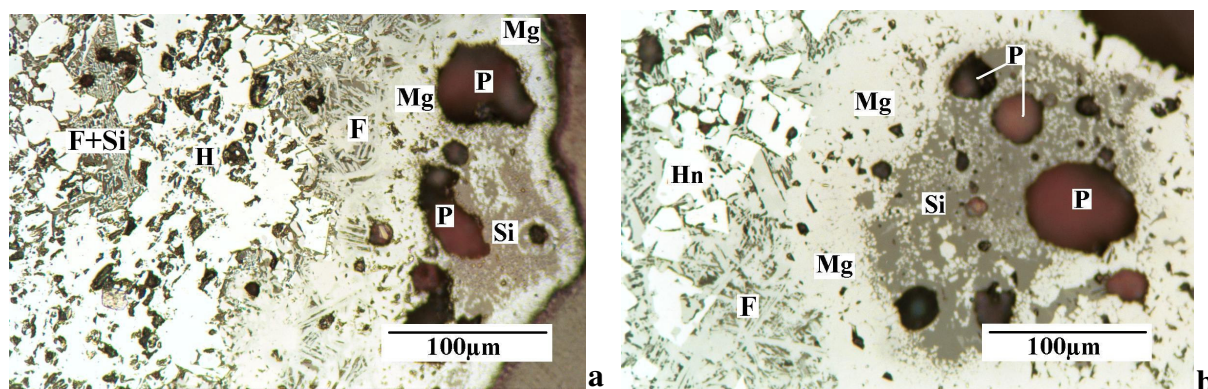


Figura 6.17 **a** – fase silicática(Si) preservada, circundada por magnetita(Mg) fina coalescida e SFCA(F). Agregado de hematita preservado, com borda transformada, onde observam-se cristais de hematita em contacto com a SFCA; amostra A1. **b** – núcleo da fase silicática(Si) pouco transformada, contendo alguma magnetita (pontos claros), circundado por magnetita fina coalescida; SFCA acicular a tabular, hematita neoformada(Hn) e poros redondos(P) também ocorrem; amostra A10. MOLR, Ap.

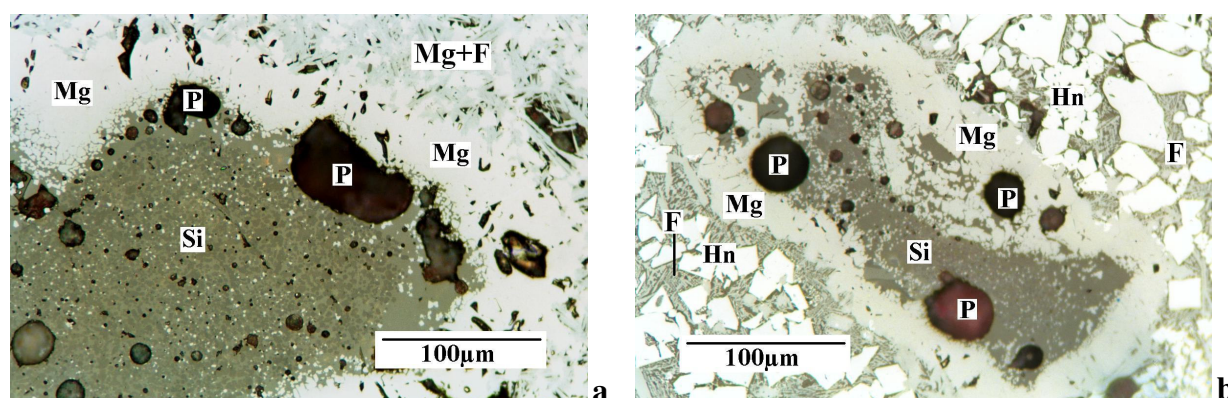


Figura 6.18 Núcleos da fase silicática pouco transformada, circundados por magnetita fina coalescida. Em **a** (amostra A9), observa-se uma porção formada por SFCA e magnetita associadas(Mg+F); em **b** (amostra A10), hematita reestruturada mostrando tanto grãos coalescidos (bordas arredondadas) como grãos euédricos, com SFCA e silicato interescidos intersticiais. MOLR, Ap.

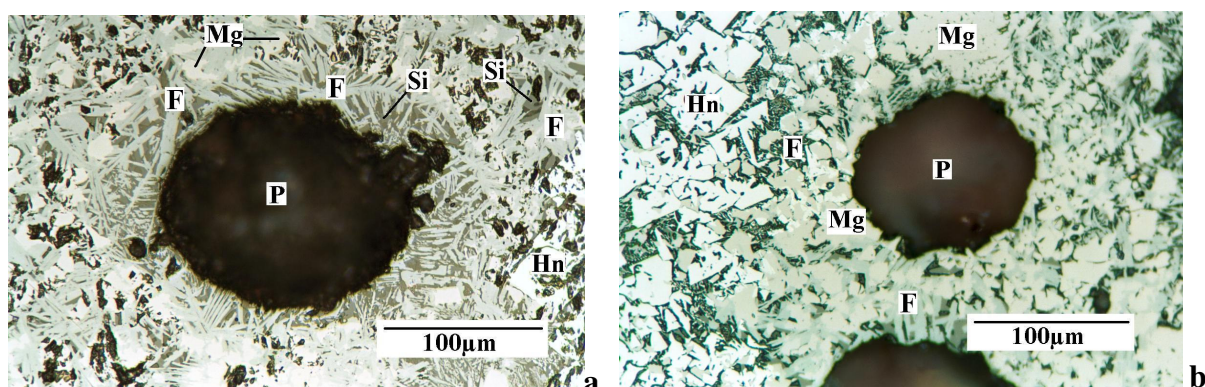


Figura 6.19 **a** – magnetita(Mg) anédrica associada a SFCA(F) acicular e tabular, circundando poro(P) redondo; hematita neoformada(Hn) e SFCA intercrescida com a fase silicática são também observadas; amostra A9. **b** – poro redondo, circundado por SFCA dendrítica intercrescida com silicato; amostra A1. MOLR, Ap.

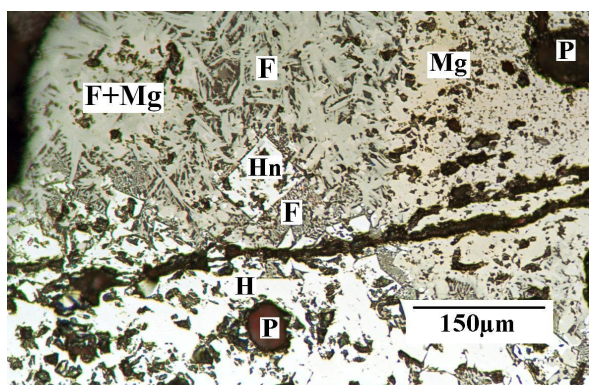


Figura 6.20 Trinca irregular cortando duas regiões distintas: porção composta por SFCA e magnetita (F+Mg) e grão de hematita residual; poros(P), hematita neoformada(Hn) e fase escória também são observados; amostra A5. MOLR, Ap.

6.3.6. Aspectos microestruturais e mineralógicos marcantes

Serão discutidos abaixo os aspectos considerados mais marcantes em cada uma das amostras estudadas.

Na amostra **A1** que corresponde ao sinter piloto, nível 1 referência, a magnetita é a fase predominante seguida pela SFCA, em proporção bem próxima, depois pela hematita e por último pelo silicato. Cristais grandes de magnetita associados ou intercrescidos com hematita e SFCA são observados. A hematita neoformada predomina sobre a hematita

residual. Observam-se nos grãos de hematita residual a porosidade original do minério, muitos poros arredondados maiores oriundos da sinterização e ainda poros de empacotamento; alguns poros podem estar preenchidos pela SFCA e pelo silicato. Essa amostra apresenta a seguinte distribuição de fases: magnetita e SFCA predominantes ocorrendo em proporções aproximadas, seguidas pela hematita (a secundária predomina sobre a residual) e por último pelo silicato.

Nas amostras **A2 e A3**, onde tem-se o pellet feed substituindo o minério D, há um aumento da magnetita em relação ao sinter A1, e observa-se a presença de cristais de magnetita maiores e mais bem formados. A magnetita ocasionalmente mostra bordas reoxidadas para hematita e agregados coalescidos nas regiões de contato com as bordas dos grãos de hematita residuais. Nota-se um aumento de agregados de cristais finos de hematita em A3, provenientes do pellet feed, mostrando-se reestruturados e com orientação definida. A2 mostra uma maior quantidade de hematita neoformada que de hematita residual, enquanto que em A3 a hematita residual é que predomina. Os cristais de SFCA em A3 mostraram-se mais bem desenvolvidos que nas outras duas amostras (A1 e A2). Fraturas ocorrem em grãos de hematita residual e podem conter cristais de hematita e magnetita bem formados e ainda a fase escória. Essas amostras apresentam a seguinte distribuição de fases, segundo a ordem decrescente de abundância: magnetita, SFCA, hematita e silicato.

Nas amostras **A4 e A5**, nas quais houve uma adição de pellet screenings, observa-se um aumento da magnetita em relação ao sinter referência, que ocorre principalmente na forma de cristais finos (magnetita granular subédrica a anédrica), porém, isto é mais freqüente na amostra A5; cristais euédricos maiores de magnetita são mais raros, às vezes mostrando coalescência. Em A5, nota-se a presença de uma massa indistinta de magnetita muito fina, em processo de coalescimento avançado, onde não é possível se observar forma de cristais. Há uma predominância da hematita neoformada sobre a residual, possivelmente originada da adição do pellet screenings que foi apenas reestruturado. As feições de coalescimento também são menos freqüentes e os cristais esqueléticos estão mais presentes. Poros arredondados, de tamanhos variados, resultantes do processo, podendo mostrar hematita recristalizada em sua volta são observados. Nas

regiões onde a hematita pouco coalescida é predominante, observa-se um aumento da quantidade desses poros. A distribuição das fases, para essas duas amostras, mostra magnetita predominante, seguida pela SFCA, hematita e pelo silicato.

Nas amostras **A6** e **A7**, a hematita é a fase mais abundante, ocorrendo em diferentes feições, seja como hematita neoformada ou preservada. Hematita fina em cristais individualizados e que sofreram reestruturação durante o processo (arredondamento das bordas e recristalização) são observados. Nota-se ainda que a SFCA ocorre abundantemente, porém a associação com a magnetita é mais rara. Observam-se porções constituídas quase que essencialmente por SFCA, com rara magnetita intersticial. A associação da SFCA é mais freqüente com a hematita, que por vezes desestabiliza esta fase. A amostra A7 mostra uma menor presença de magnetita que a amostra A6. Poros de tamanhos variados oriundos do processo são observados e esses aumentam nas porções onde a hematita ocorre como grãos individualizados em meio à escória. A hematita ocorre em maior proporção que a SFCA, que é seguida pela magnetita e por último pelo silicato. Em A7, a proporção de hematita aumenta em relação à amostra A6, tornando-se bem mais freqüente que as demais fases.

Na amostra **A8**, a magnetita é a fase predominante, mostrando variadas feições e associações. Agregados de cristais, mostrando feições de coalescimento com ou sem presença de SFCA e silicato intergranular (fase escória) e cristais mostrando a forma externa da hematita preservada, às vezes podendo estar coalescidos podem ser observados. Agregados de hematita parcialmente preservados mostram maclas e fissuras em diferentes direções. Observa-se ainda hematita neoformada, presente ao redor de poros arredondados originados durante o processo, mostrando-se coalescida e recristalizada. A magnetita e SFCA são as fases que ocorrem em maiores proporções que as demais fases nesta amostra. Observam-se poros arredondados em meio a porções constituídas por magnetita e SFCA, e ainda a presença de trincas e fissuras nestas porções. Essas podem estar preenchidas pela fase escória (SFCA colunar e silicatos). A magnetita e a SFCA são as fases predominantes nessa amostra, seguidas pela hematita e pelo silicato em proporções menores.

A amostra **A9** mostra um aumento na quantidade de hematita e uma diminuição da magnetita que se aproxima mais da quantidade de SFCA, em relação ao sínter referência (A8). Na amostra **A10**, o aumento da hematita é ainda mais significativo, assim como a redução da magnetita. A hematita passa a ser a fase predominante, em quantidades bem superiores à SFCA e à magnetita, que são as fases seguintes em ordem de abundância, seguidas por último pelo silicato. Agregados de hematita fina mostram uma orientação preferencial marcante em meio à escória caracterizando uma feição de fluxo. Cristais maiores de hematita individualizados, euédricos e coalescidos, porém, preservando a estrutura externa, ocorrem: circundando poros oriundos do processo, em borda de agregados parcialmente preservados de hematita primária, em meio a porções constituídas por magnetita e SFCA, e associados com SFCA onde este último consome parte dessa fase. Nessa amostra, os grãos de hematita que sofreram pouca ou nenhuma modificação são predominantes. A distribuição das fases para essa amostra é a seguinte: magnetita aproximadamente igual à SFCA que é maior (porém próxima) que a hematita e a fase silicática.

Na amostra **A11**, a magnetita predomina, com proporções próximas à SFCA, seguidas pela hematita e pelo silicato. A hematita secundária ou neoformada é predominante, ou seja, quase toda hematita presente na amostra já foi modificada. Hematita neoformada intercrescida com magnetita e cristais euédricos e que sofreram coalescência em meio a porções de magnetita e SFCA são observados. A magnetita, localmente, mostra estrutura de fluxo. Presença de poros arredondados com maior frequência nas porções onde a hematita ocorre como grãos individualizados, e também de poros de compactação preenchidos ou não pela fase escória, podendo conter ainda alguma magnetita.

6.4. Conclusões

As amostras de sínteres estudadas não apresentaram muitas variações nas feições microestruturais, após a adição de novos materiais aos sínteres referência. Aspectos como o aumento da magnetita, da hematita neoformada e ainda associação freqüente da SFCA com a magnetita nas amostras A2, A3, A4 e A5 em relação ao sínter referência

(A1) devem ser ressaltados. Já nas amostras A6 e A7, a hematita é a fase predominante e a SFCA ocorre mais frequentemente associada com esta. As amostras A9 e A10 mostraram um aumento da hematita acompanhando o aumento da porcentagem do pellet feed adicionado, e ainda uma diminuição da magnetita (proporção de hematita muito maior que de magnetita e SFCA) relativamente ao sinter referência A8. Na amostra A11, a magnetita predomina, não havendo muita alteração com relação ao sinter referência A8.

7. CONCLUSÕES

7.1 *Pellet Feed*

O produto *pellet feed* foi testado em níveis de substituição de 100%, 50% e 25% a um *sinter feed* de referência que participa em 25% na mistura de sinterização. Isso representa uma participação na mistura estudada de, respectivamente, 25%, 12,5% e 6,25%.

Com base nos resultados, para que não haja uma queda na produtividade da máquina de síter, a quantidade máxima de *pellet feed* a ser adicionada em substituição ao *sinter feed* de referência será de 25% da participação desse na mistura, o que representa 6,25% da massa de minérios na mistura de sinterização estudada.

Os resultados de qualidade do síter produzido no nível de substituição de 25% *sinter feed* de referência pelo *pellet feed*, não apresentaram redução nos parâmetros de qualidade analisados.

7.2 *Pellet Screenings*

O produto *pellet screenings* foi testado em níveis de substituição de 100% e 50% a um *sinter feed* de referência que participa em 25% na mistura de sinterização. Isso representa uma participação na mistura estudada de respectivamente, 25% e 12,5%.

De acordo com os resultados, para que não haja uma queda na produtividade na máquina de síter, o nível de substituição do *sinter feed* de referência está limitado em 50% de sua participação na mistura de sinterização, o que representa uma participação de 12,5% de *pellet screenings* na massa de minérios que compõe a mistura de sinterização.

Os parâmetros de qualidade avaliados foram levemente inferiores aos da mistura padrão, mas poderão ser elevados com uma maior adição de carvão, tendo em vista que o consumo de combustível para esse nível foi inferior ao da mistura padrão.

7.3 Micro Pellets

O produto micro pellets foi testado em níveis de substituição de 100% e 50% a um *sinter feed* de referência que participa em 25% na mistura de sinterização. Isso representa uma participação na mistura estudada de, respectivamente, 25% e 12,5%.

De acordo com os resultados, para que não haja queda da produtividade na máquina de *sinter* o nível máximo de substituição do *sinter feed* de referência está limitado em 50% de sua participação na mistura de sinterização, o que representa uma participação de 12,5% de micro pellets na massa de minérios que compõe a mistura de sinterização.

Os parâmetros de qualidade *shatter index* e RDI se encontram um pouco abaixo aos da mistura padrão, mas poderão ser elevados com uma maior adição de carvão, tendo em vista que o consumo de combustível para esse nível foi inferior ao da mistura padrão.

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugerimos que sejam realizados estudos utilizando as seguintes técnicas citadas nas referências bibliográficas: Processo HPS, utilização de dois misturadores em linha e utilização de pré-mistura dos materiais mais finos em misturadores em paralelo. O objetivo seria fazer uma comparação em escala piloto dessas novas técnicas de sinterização com o processo convencional, para aumentar a participação de materiais mais finos nas misturas de sinterização.

Sugerimos ainda, caracterização das matérias-primas utilizadas nos estudos.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMETRANO, R. et al. Utilization of Waste Materials at Siderar's Sinter Plant. In: Ironmaking Conference Proceedings, 1999. p. 577-588.

ARAUJO, M.A.C. Investigação sobre a localização mineralógica do fósforo nos sinteres e pelotas de minério de ferro. Dissertação de mestrado, CPGEM-UFMG, 1996, 120p.

BENTES, M.A.G.; RIBEIRO, R. e BALIZA, A.C. Elevação da Produtividade em Sinterizações da CSN Parte II: Elevação da Proporção de Superfinos do *Sinter Feed*. In: XXIV Seminário de Redução de Minério de Ferro: Qualidade Total Aplicada à Área de Redução, 1993, Vitória:ABM. p. 115-134.

BASTOS, J.R. et al. Implantação do Sistema de Carregamento ISF nas Sinterizações da Usiminas. In: II Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro, 1999, Ouro Preto: ABM. p. 264-279.

CAPPEL, F.; LÜNGEN, H.B. Historical Review of Developments in Sintering and Pelletising Techniques. In: Seminar on Sinter and Pellets, 1999, Brussels: IISI. p. 12-31.

CHENG, A. ; RORICK, F. e RANADE, M. Outlook for North American Ironmaking. In: 4th European Coke and Ironmaking Congress, 2000, Paris: ATS. p. 44-52.

CHO, Y.H.; Moon, S.M. e Jhung, S.S. In: Ironmaking Conference Proceedings, 1996. p. 399-406.

DAWSON, P.R. Granulation and Strand Feeding. In: Ironmaking and Steelmaking, 1993, Vol. 20, N° 2. p.144 – 149.

DUTTA, D.K. et al. Investigation on Cold Bonded Pelletization in Iron Ore Fines Using Indian Slag-Cement. In: International Journal of Mineral Processing, 34, 1992. p. 149-159.

ERRIGO, V.; PINTI, M. e PIGNATELLI, C. A New Method for Evaluating the Particulate Material Granulation. In: 3rd International Symposium on Agglomeration, 1981, Nürnberg: PARTEC. p. A160-A174.

FONSECA, D.C. e PERES, A.E.C. Reaproveitamento de Resíduos Industriais; Estudo de Caso. In: XVII Encontro Nacional de Tratamento de Minério e Met. Extrativa, 1998. p.97-114.

FORMOSO, A. et al. Influence of Nature and Particle Size distribution on Granulation of Iron Ore Mixtures Used in a Sinter Strand. In: Ironmaking and Steelmaking, 2003, Vol.30, N°6. p. 447-460.

FUJII, N et al. Construction and Operation of Vibration Granulation Equipament. In: Ironmaking Conference Proceedings, 1990. p. 615-621.

FUJIMORI, H. Evolution of Ironmaking Practice in Japan. In: ICSTI/Ironmaking Conference Proceedings, 1998, Toronto: ISS. p. 41-55.

HAGA, T. et al. Selective Granulation Technology of Iron Ores for Controlling Melting Reactions in the Sintering Process. In: 4th European Coke and Ironmaking Congress, 2000, Paris: ATS. p. 118-125.

HARTIG, W. Cost Reduction and Increase of Productivity by Transition from 3 to 2 Blast Furnances Operation at Rogesa Dillinger. In: XXXII Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas, 2002, Vila Velha: ABM. p. 145-165.

HUGGET, C.; RUSSO, P. e Soland, J. Production Increase at the Sollac Fos Sinter Plant. In: Ironmaking Conference Proceedings, 1991. p. 549-554.

Iron and Steel Works of the World. In: Iron and Steel Works of the World 15th Edition, 2002. Metal Bulletin Directories Ltd. p. 1 – 308.

Iron Ore Manual. Summary of Japanese Steel Mills. In: Iron Ore Manual 2002-2003, 2003. The TEX Report Ltd. p. 99 – 99.

JIGMING, R. The Study about Small Pellet Sintering Technology. In: Sintering and Pelletizing, n°6, 1980. p 39 – 44. Apud / ZHANG, C. et al. Small Pellet Sintering Process of Fine Concentrate. In: ICSTI/Ironmaking Conference Proceedings, 1998, Toronto: ISS. p. 1317-1323.

KASAI, E.; RANKIN, W.J. e GANNON, J.F. The Effect of Raw Mixture Properties on Bed Permeability During Sintering. In: ISIJ International, Vol. 29(1989), N°1. p. 33 – 42.

KAWAGUSHI, T. et al. Design of Pseudo Particles Considering Distribution of CaO Component in Sinter. In: Proceedings of The Sixth International Iron and Steel Congress, 1990, Nagoya, ISIJ. p. 40 - 47

KONG, L. et al. An Industrial Practice of Sinter Produced from Magnetite Concentrate. In: 61st Ironmaking Conference Proceedings, 2002, Nashville: ISS. p. 715 – 720.

KUROSAWA, S. et al. Recent Advanced in Sintering Technologies by NKK. In: Ironmaking Conference Proceedings, 1989.p. 451-457.

LITSTER, J.D. e WATERS, A.G. Influence of the Material Properties of Iron Ore Sinter Feed on Granulation Effectiveness. In: Powder Technology, 55(1988). p. 141-151.

LOO, C.E.; Willians, R.P.; Matthews, L.T. Influence of Material Properties on High-temperature Zone Reaction in Sintering of Iron Ore. In: Trans.Instn.Min.Metall.,101, January-April, 1992.p.C7-C16.

LOO, C.E. Some Progress in Understanding the Science of Iron Ore Sintering. In: ICSTI/Ironmaking Conference Proceedings, 1998, Toronto: ISS. p. 1299-1316.

LOO, C.E.; PENNY, G.C. e WITCHARD, D. Effective Sintering of Iron Ore Blends Containing Porous Ores at Low Moistures Contents. In: Trans. Instn. Min. Metall., 105, January – April 1996. p. C22 – C36.

LOO, C.E. ; WITCHARD, D. e PENNY, G.C. Improving Sintering Performance of Ore Blend Containing Pisolitic Ore. In: Trans. Instn. Min. Metall., 103, May – August 1994. p. C135 – C146.

MAGALHÃES, M.S. and BRANDÃO, P.R.G. Microstructures of industrial sinters from Quadrilatero Ferrifero's iron ores, Minas Gerais State, Brazil. Minerals Engineering, vol.16, no.11, suppl.1, p.1251-1256, 2003.

MATSUMOTO, K. et al. High Bed Operation at Mizushima N°4 Sinter Plant. In: Ironmaking Conference Proceedings, 1988. p.613 – 616.

MOORE, C.M.; DEIKE, R. e HILLMANN, C. The Recycling of Complex Iron Containing Waste Oxides. In: 4th European Coke and Ironmaking Congress, 2000, Paris: ATS. p. 408-412.

NANDY, B.; GUPTA, S.S. Development of a Technique in Sintering to Utilise Low Alumina Superfines. In: 59th Ironmaking Conference Proceedings, 2000, Pittsburgh:ISS. p. 241-247.

NIWA, Y. et al. Development of Hybrid Pelletized Sinter Process and its Commercial Operation at Fukuyama N° 5 Sintering Plant. In: Ironmaking Conference Proceedings, 1990. p. 683-690.

NIWA, Y. et al. Comercial Production of Iron Ore Agglomerates Using Sinter Feeds Containing a Large Amount of Fines Ores. In: ISIJ International, Vol. 33, 1993, N° 4, p. 454-461.

OBOSO, A. et al. Operation Results of Separated Granulation Equipament at Wakayama N°4 Sintering Plant. In: ICSTI/Ironmaking Conference Proceedings, 1998, Toronto: ISS. p. 1327-1336.

OKOCHI, I. et al. Achievement of High Rate Pulverized Coal Injection of 266kg/t at Fukuyama N° 3 BF. In: 4th European Coke and Ironmaking Congress, 2000, Paris: ATS. p. 196-203.

PAMMER, O. Perfect Sinter - The Dream of the Blast Furnace Operator. In: 2002 AISE Annual Convention and Steel Expo. p. 1 – 9.

PIMENTA, H.P.; HONORATO, E.P. e BASTOS, J.R. Estudo de Adequação de Granulometria das Matérias-Primas de Sinterização na Usiminas. In: XXXI Seminário de Redução de Minério de Ferro, 2000, Santos: ABM. p. 751- 765.

PIMENTA, H.P. et al. Caracterização Tecnológica de Minérios de Ferro para Sinterização. In: II Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro, 1999, Ouro Preto: ABM. p. 1-21.

PISSILÄ, E. The Keynote Speech. In: The Twenty Third McMaster Symposiom on Improved Productivity of Blast Furnace Operations, 1995, Hamilton, Canadá: McMaster University. p. 1-16.

- ROLLER, P.W. Granulation of Iron Ores. In: BHP Tech. Bull. , 1982, 26(1), p. 44 – 45.
- SAITO,G. Recent Developments and Future Prospects of Sintering Technology in Nippon Steel. In: Seminar on Sinter and Pellets, 1999, Brussels: IISI. p. 119-126.
- SAKAI, A. et al. Recent Progress of Hybrid Pelletized Sinter Process at Fukuyama Works, NKK. In: 1st International Meeting on Ironmaking, 2001, Belo Horizonte: ABM. p. 180-191.
- SAKAMOTO, N. Iron Ore Granulation Model Supposing the Granulation Probability Estimated from Both Properties of the Ores and Their Size Distributions. In: ISIJ International, Vol. 42, 2002, N° 8. p.834- 843.
- SAKAMOTO, N. et al. A Commercial Production Test of Iron Ore Sinter Using High Amounts of Pisolite Ores and Quality Evaluation of the Sinter Products. In: ISIJ International, Vol. 37, 1997, N° 11. p. 1066-1071.
- SANTIAGO, T.C. Caracterização Química e Estrutural do Minério de Ferro Sinter Feed – Avaliação Técnica em Sinterização Piloto Utilizando Minérios da Porção Leste do Quadrilátero Ferrífero. Belo Horizonte: UFMG, 2000. 117p. Dissertação (Mestrado em Metalurgia Extrativa) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2000.
- SCHWALM, T. ; GERLACH, W. New Developments in Agglomeration Technologies. In:Asia Steel International Conference, 2003, Jamshedpur.
- SONG, Y. Development of Ironmaking Technologies in China. In: ICSTI/Ironmaking Conference Proceedings, 1998, Toronto: ISS. p. 85-92.

SONG, Y. China's Preparation Technologies of Raw Materials for Blast Furnaces. In: Seminar on Sinter and Pellets, 1999, Brussels: IISI. p. 45-53.

SHINONG, Y.; YUNJIANG, D. Central Laboratory Report of Anshan Iron and Steel Company, Anshan Iron and Steel Company, China, 1960. Apud / ZHANG, C. et al. Small Pellet Sintering Process of Fine Concentrate. In: ICSTI/Ironmaking Conference Proceedings, 1998, Toronto: ISS. p. 1317-1323.

THE ANNUAL OUTLOOK FOR IRON ORE 2003. In: CRU International, 2003, London: CRU. p. 31-41.

VIEIRA, C.B. et al. Avaliação técnica de minérios de ferro para sinterização nas siderúrgicas e minerações brasileiras: uma análise crítica. Revista da Escola de Minas – REM, Ouro Preto, vol.56, no. 2, p.97-102, abr.-jun. 2003.

YANG, L.X. ; WITCHARD, D. Sintering of Blends Containing Magnetite Concentrate and Hematite or/and Goethite Ores. In: ISIJ International, Vol. 38 , 1998, N° 10. p. 1069 – 1076.

YANG, L.X.; DAVIS, L. Assimilation and Mineral Formation during Sintering for Blends Containing Magnetite and Hematite/Pisolite Sintering Fines. In: ISIJ International, Vol. 39, 1999, N° 3. p.239-245.

YANG, L.X.; JELENICH, L. Blending Australian Ores with Chinese Ores for Sintering. In: 61st Ironmaking Conference Proceedings, 2002, Nashville:ISS. p. 759-767.

YOUMANS, C.T.; Rorick, F.C. Operating Improvements – Sparrows Point “L” Furnace. In: The Twenty Third McMaster Symposium on Improved Productivity of Blast Furnace Operations, 1995, Hamilton, Canadá: McMaster University. p. 137-150.

ZHANG, C. et al. Small Pellet Sintering Process of Fine Concentrate. In: ICSTI/Ironmaking Conference Proceedings, 1998, Toronto: ISS. p. 1317-1323.