

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Tese de Doutorado

**PRODUÇÃO DE SÍNTER COM *PELLET SCREENINGS* E
PELLET FEED COM EMPREGO DE GRANULAÇÃO
INTENSIVA**

Autor: Helio Cardoso Pereira
Orientador Antônio Eduardo Clark Peres

Novembro/2015

Helio Cardoso Pereira

PRODUÇÃO DE SÍNTER COM *PELLET SCREENIGS* E *PELLET FEED* COM EMPREGO DE GRANULAÇÃO INTENSIVA

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas.

Área de Concentração: Tecnologia Mineral.

Orientador: Antônio Eduardo Clark Peres

Belo Horizonte
Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas
2015

P436p

Pereira, Helio Cardoso.

Produção de sinter com pellet screenings e pellet feed com emprego de granulação intensiva [manuscrito] / Helio Cardoso Pereira. – 2015. xv, 222 f., enc.: il.

Orientador: Antônio Eduardo Clark Peres.

Tese (doutorado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia de minas. 2. Tecnologia mineral - Teses. 3. Travertino - Teses. 4. Sinterização - Teses. 5. Aglomeração - Teses. 6. Minérios de ferro - Teses. I. Peres, Antônio Eduardo Clark. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 622(043)

DEDICATÓRIA

À minha esposa Daniela por seu amor, compreensão e apoio.

Aos meus pais pela vida e pelos valores ensinados e praticados.

AGRADECIMENTOS

À SAMARCO MINERAÇÃO S/A por acreditar no desenvolvimento de seus empregados.

Ao CNPq (Conselho Nacional de desenvolvimento Científico e Tecnológico), CAPES-PROEX (Programa de Excelência Acadêmica) e FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais).

Ao Amigo e Orientador Toninho pela amizade e por acreditar em um aluno veterano.

Aos Amigos: Roberto Carvalho, Leonardo Sarlo, Ricardo Vescovi, Mauricio Otaviano, Philippe Rocha, Denilson Rodrigues, Francisco Pinheiro, Rodrigo Franklin, Priscila Barbosa, Plinio Bueno, Virgilio Gaggiato, Mauricio Cota, Mateus Lima, Rafael Camelo, Claudia Segatto, Ethiele da Silva, Tatiana Silva, Camila Fassarella, Julio Cezar, Marilene Pimentel, Nilson Alves, Henrique Turrer, Efrem Ribeiro, Miguel Bentes, Hamilton Pimenta, Ana Maria Bailon, Grasiel Freire, Raquel da Silva, Adriana Pereira, Alaecio Meschiatti, Thiago Marchezi...

Ao Grande Amigo Leonardo Lage que me ajudou na formatação da tese.

Aos Amigos da UFMG Nelson e Cida pela ajuda na parte burocrática da tese.

Ao aluno de graduação Fábio Amaral que me ajudou na confecção das tabelas e gráficos.

Ao Amigo Dr. Volker Ritz do SGA pela ajuda, que ultrapassou o relacionamento puramente comercial.

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	16
2. OBJETIVOS.....	24
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
3.1 Importância da granulação de finos no processo de sinterização	25
3.2 Processo HPS (<i>Hybrid Pelletized Sinter</i>).....	52
3.3. Utilização de misturadores intensivos.....	56
3.4 Tecnologias chinesas de aglomeração	87
3.5 Produção mundial de sinter	94
4. MATERIAIS E MÉTODOS	101
4.1 Preparação e caracterização das matérias-primas	102
4.1.2 Avaliação do <i>pellet feed</i> Samarco em uma mistura de sinterização da Ásia...	106
4.1.3 Avaliação do <i>pellet screenings</i> Samarco em uma mistura de sinterização da Europa.....	110
4.1.4 <i>Pellet screenings</i> Samarco em uma mistura de sinterização da Ásia	113
4.2 Planejamento dos ensaios de sinterabilidade	116
4.2.1 Ensaios de sinterização com <i>pellet feed</i> Samarco em substituição de minérios em misturas de sinterização de referência da Europa Ocidental e da Ásia.....	116
4.2.2 Ensaios de sinterização com <i>pellet screenings</i> Samarco em substituição de minérios em misturas de sinterização de referência da Europa Ocidental e da Ásia	122

4.3 Ensaio de sinterabilidade - Padrão SGA	127
4.4 Tratamento mecânico e preparação de amostras para caracterização, química, física e metalúrgica do sínter piloto.....	133
4.5 Ensaios de caracterização física e metalúrgica do sínter piloto.....	136
5. RESULTADOS	138
5.1 Testes de sinterização de <i>pellet feed</i> em misturas da Europa Ocidental.....	138
5.1.1 Série 1- Séries de referência da mistura Europa Ocidental	138
5.1.2 Série 2 – Séries com a adição de 10% de <i>pellet feed</i> na mistura de referência da Europa Ocidental	140
5.1.3 Série 3 – Séries com a adição de 20% de <i>pellet feed</i> na mistura de referência da Europa Ocidental	142
5.1.4 Série 4 – Séries com a adição de 20% de <i>pellet feed</i> com pré-aglomeração na mistura de referência da Europa Ocidental.....	144
5.1.5 Série 5 – Séries com a adição de 30% de <i>pellet feed</i> com pré-aglomeração na mistura de referência da Europa Ocidental.....	146
5.1.6 Série 6 – Séries com a adição de 40% de <i>pellet feed</i> com pré-aglomeração na mistura de referência da Europa Ocidental.....	148
5.2 Testes de sinterização de <i>pellet feed</i> com as misturas da Ásia	150
5.2.1 Série 7- Séries de referência da mistura da Ásia	150
5.2.2 Série 8 - Séries com a adição de 10% de <i>pellet feed</i> na mistura de referência da Ásia	152
5.2.3 Série 9 - Séries com a adição de 20% de <i>pellet feed</i> na mistura de referência da Ásia	154
5.2.4 Série 10 – Séries com a adição de 20% de <i>pellet feed</i> com pré-aglomeração na mistura de referência da Ásia.....	156
5.2.5 Série 11 – Séries com a adição de 30% de <i>pellet feed</i> com pré-aglomeração na mistura de referência da Ásia.....	158
5.3 Testes de sinterização de <i>pellet screenings</i> com as misturas da Europa Ocidental.....	165

5.3.1 Série 1- Séries de referência da mistura Europa Ocidental	165
5.3.2 Série 2 – Séries com a adição de 10% de <i>pellet screenings</i> na mistura de referência da Europa Ocidental.....	167
5.3.3 Série 3 – Séries com a adição de 20% de <i>pellet screenings</i> na mistura de referência da Europa Ocidental.....	169
5.3.4 Série 4 – Séries com a adição de 30% de <i>pellet screenings</i> na mistura de referência da Europa Ocidental.....	171
5.3.5 Série 5 – Séries com a adição de 40% de <i>pellet screenings</i> na mistura de referência da Europa Ocidental.....	173
5.4 Testes de sinterização de <i>pellet screenings</i> com as misturas da Ásia.....	175
5.4.1 Série 6- Séries de referência da mistura Ásia	175
5.4.2 Série 7 – Séries com a adição de 10% de <i>pellet screenings</i> na mistura de referência da Ásia	177
5.4.3 Série 8 – Séries com a adição de 20% de <i>pellet screenings</i> na mistura de referência da Ásia	179
5.4.4 Série 9 – Séries com a adição de 30% de <i>pellet screenings</i> na mistura de referência da Ásia	181
5.4.5 Série 10 – Séries com a adição de 40% de <i>pellet screenings</i> na mistura de referência da Ásia	183
6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	187
6.1 Testes de sinterização de <i>pellet feed</i> com as misturas da Europa Ocidental ...	187
6.2 Testes de sinterização de <i>pellet feed</i> com as misturas da Ásia	193
6.3 Testes de sinterização de <i>pellet screenings</i> com as misturas da Europa Ocidental.....	197
6.4 Testes de sinterização de <i>pellet screenings</i> com as misturas da Ásia.....	200
7. CONCLUSÕES.....	204
7.1 Testes de sinterização de <i>pellet feed</i> em misturas da Europa Ocidental.....	204
7.2 Testes de sinterização de <i>pellet feed</i> com as misturas da Ásia	205

7.3 Testes de sinterização de <i>pellet screenings</i> com as misturas da Europa	
Ocidental.....	205
7.4 Testes de sinterização de <i>pellet screenings</i> com as misturas da Ásia.....	206
8. RELEVÂNCIA.....	208
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	209

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Produção de ROM na China e sua equivalência em 62% de Fe (Milhões de toneladas). Fonte: (WOOD MACKENZIE, 2014).	16
Figura 1.2 Projeção de produção futura de minério de ferro na China com equivalência em 62% de Fe (Milhões de toneladas). Fonte: (WOOD MACKENZIE, 2014).	17
Figura 1.3 Tendências de qualidade dos principais fornecedores. Fonte: (WOOD MACKENZIE, 2014).	18
Figura 1.4 – Elevação do teor de SiO ₂ do sínter alimentado nas siderúrgicas. Fonte: (OLIVEIRA, 2015).	20
Figura 1.5 – Redução da produtividade das máquinas de sinterização. Fonte: (OLIVEIRA, 2015).	21
Figura 1.6 – Aumento do teor de escória nos altos-fornos. Fonte: (OLIVEIRA, 2015).	21
Figura 1.7 – Aumento do consumo de combustíveis redutores nos altos-fornos. Fonte: (OLIVEIRA, 2015).	21
Figura 3.1 Fluxo de processo da planta de sinterização número 4 de Fukuyama. Fonte: (SAKAMOTO et al, 1997).	31
Figura 3.2 – Desenho esquemático do equipamento de granulação. Fonte: (HARA et al, 2011).	40
Figura 3.3 – Fluxo de processo das máquinas de sinterização da JFE em West Japan Works. Fonte: (MIWA e KURIHARA, 2011).	41
Figura 3.4 – Fluxo do processo SPEX II. Fonte: (TAKAMATSU et al, 2012).	44
Figura 3.5 – Efeitos da superfície específica das partículas aderentes na granulação. Fonte: (GAN et al, 2015).	45
Figura 3.6 – Efeitos da proporção das partículas aderentes na granulação. Fonte: (GAN et al, 2015).	46
Figura 3.7 – Micrografia dos minérios estudados. Fonte: (MAO et al, 2013).	47
Figura 3.8 – Permeabilidade do leito de grânulos versus a quantidade dos minérios estudados. Fonte: (MAO et al, 2013).	48
Figura 3.9 – Fases da evolução da tecnologia siderúrgica do Japão. Fonte: (NAITO et al, 2015).	49
Figura 3.10 – Transição das matérias-primas importadas e da composição e qualidade da carga dos altos-fornos do Japão. Fonte: (NAITO et al, 2015).	51
Figura 3.11 – Fluxo de processo da máquina de sínter N°5 da NKK em Fukuiama Steel Works com HPS. Fonte: (NIWA et al, 1993).	52
Figura 3.12 – Primeiro misturador intensivo do mundo instalado na planta de sinterização da Voestalpine Donawitz . Fonte: (PAMMER et al, 2002).	57
Figura 3.13 – Layout da unidade de granulação instalada na usina de Pohang, da Posco. Fonte: (KIN e PARK, 2011).	58
Figura 3.14 – Circuito montado na planta de sinterização N°4 em Fukuyama. Fonte: (OYAMA et al, 2009).	59
Figura 3.15 – Efeitos da granulação nos resultados operacionais na planta de sinterização N°4 em Fukuyama. Fonte: (OYAMA et al, 2009).	59
Figura 3.16 – Efeitos da granulação nos resultados de qualidade do sínter na planta de sinterização N°4 em Fukuyama. Fonte: (OYAMA et al, 2009).	60
Figura 3.17 – Diagrama esquemático da planta de sinterização da Kobe em Kakogawa. Fonte: (MATSUMURA et al, 2009).	61
Figura 3.18 – Misturador intensivo. Fonte: (NEPPER et al, 2011).	62

Figura 3.19 – Interior do misturador intensivo. Fonte: (NEPPER et al, 2011).	63
Figura 3.20 - Layout da planta de sinterização com misturadores intensivos. Fonte: (NEPPER et al, 2011).	63
Figura 3.21 - Distribuição granulométrica dos materiais. Fonte: (NEPPER et al, 2011).	64
Figura 3.22 - Fluxo de processo com mistura intensiva e sistema de granulação com misturador intensivo e granulador horizontal. Fonte: (REIDESCHLAEGER et al, 2013).	66
Figura 3.23 - Diferença de homogeneidade durante o tempo entre o misturador intensivo e o misturador de tambor convencional. Fonte: (REIDESCHLAEGER et al, 2013).	67
Figura 3.24 - Intensidade do movimento das matérias primas no interior do misturador intensivo. Fonte: (REIDESCHLAEGER et al, 2013).	67
Figura 3.25 - Princípio de funcionamento do misturador intensivo. Fonte: (REIDESCHLAEGER et al, 2013).	68
Figura 3.26 - Interior de um granulador intensivo. Fonte: (REIDESCHLAEGER et al, 2013).	69
Figura 3.27 - Curvas de distribuição granulométrica (%passante acumulada), com a utilização de granulador convencional e intensivo. Fonte: (REIDESCHLAEGER et al, 2013).	70
Figura 3.28 - Desenho esquemático do aparato de medição de permeabilidade. Fonte: (REIDESCHLAEGER et al, 2013).	71
Figura 3.29 – Comportamento da sílica no síter da Usiminas – Usina de Ipatinga.	74
Figura 3.30 – Layout da Sinterização 1 e 2 da Usiminas – Usina de Ipatinga. Fonte: (SILVA e HONORATO, 2013).	74
Figura 3.31 – Estrutura do leito com aplicação da tecnologia MEBIOS. Fonte: (KAMIJO et al, 2013).	78
Figura 3.32 – Comparação dos sistemas de granulação. Fonte: (KAMIJO et al, 2013).	78
Figura 3-33 - Vista esquemática da planta de sinterização nº5 de Wakayma. Fonte: (KAMIJO et al, 2013).	79
Figura 3.34 – Comparação entre a média das sinterizações do Japão em 2011 com a planta de sinterização nº5 de Wakayma . Fonte: (KAMIJO et al, 2013).	79
Figura 3.35 – Relação entre o tamanho dos pseudo-grãos e o percentual de material fino na mistura a ser sinterizada . Fonte: LIMA et al (2014).	81
Figura 3.36 – Efeito do misturador intensivo e da dosagem de aglomerante na produtividade da planta piloto. Fonte: LIMA et al (2014).	81
Figura 3.37 - – Aumento da capacidade de granulação. Fonte: LIMA et al (2014).	83
Figura 3.38 – Fluxo de processo da Sinterização número 2 da Arcelor Mittal Gent.	84
Figura 3.39 – Desenho esquemático do layout da instalação do misturador intensivo da Sinterização número 2 da Arcelor Mittal Gent. Fonte: LUDIVINE et al (2014).	85
Figura 3.40 – Fotografia da instalação da Sinterização número 2 da Arcelor Mittal Gent. Fonte: LUDIVINE et al (2014).	85
Figura 3.41– Fotografia do interior do misturador intensivo da Sinterização número 2 da Arcelor Mittal Gent. Fonte: LUDIVINE et al (2014).	86
Figura 3.42 – Consumo de energia específico de acordo com o grau de moagem. Fonte: (CRU 2013).	88
Figura 3.43 – Opções de processamento de acordo com tamanho do grão. Fonte: (CRU 2013).	89

Figura 3.44 – Comparação entre tamanho de grão e teor de ferro de vários projetos. Fonte: (CRU 2013).	92
Figura 4.1 – Visão geral da área de preparação das matérias-primas no laboratório do SGA.	103
Figura 4.2 - Gráfico da distribuição granulométrica dos minérios constituintes das misturas da Europa Ocidental.	106
Figura 4.3 - Gráfico da distribuição granulométrica dos minérios constituintes das misturas da Ásia.	109
Figura 4.4 - Gráfico da distribuição granulométrica dos minérios constituintes das misturas da Europa Ocidental.	113
Figura 4.5 - Gráfico da distribuição granulométrica dos minérios constituintes das misturas da Ásia.	116
Figura 4.6 - Distribuição granulométrica das misturas com as diferentes adições de <i>pellet feed</i> nas séries de sinterização da Europa Ocidental.	121
Figura 4.7 - Distribuição granulométricas das misturas com diferentes adições de <i>pellet feed</i> nas séries de sinterização da Ásia.	121
Figura 4.8 - Distribuição granulométrica das misturas com as diferentes adições de <i>pellet screenings</i> nas séries de sinterização da Europa Ocidental.	126
Figura 4.9 - Distribuição granulométricas das misturas com diferentes adições de <i>pellet screenings</i> nas séries de sinterização da Ásia.	126
Figura 4.10 - Máquina de sínter durante a queima.	128
Figura 4.11 - Misturador Cyclos.	130
Figura 4.12 – Tambor de aglomeração.	130
Figura 4.13 – Painel de sinterização carregada com a mistura.	131
Figura 4.14 - Misturador intensivo EIRICH modelo R05T.	131
Figura 4.15 – Aspecto do bolo de sínter na panela após a queima.	132
Figura 4.16 – Bolo de sínter após resfriamento.	133
Figura 4.17 – Ensaio <i>Shatter</i>	133
Figura 4.18 – Ensaio de tamboramento.	134
Figura 4.19 – Fluxograma do tratamento do bolo de sínter e preparação de amostras para caracterização física e metalúrgica.	135
Figura 6.1 – Efeito da adição de <i>pellet feed</i> sem pré-aglomeração na mistura de sinterização da Europa Ocidental na produtividade e consumo de coque.	188
Figura 6.2 – Efeito da adição de <i>pellet feed</i> com pré-aglomeração na mistura de sinterização da Europa Ocidental na produtividade e consumo de coque.	188
Figura 6.3 – Efeito da adição de <i>pellet feed</i> sem pré-aglomeração na mistura de sinterização da Europa Ocidental na resistência ao tamboramento e abrasão.	189
Figura 6.4 – Efeito da adição de <i>pellet feed</i> com pré-aglomeração na mistura de sinterização da Europa Ocidental na resistência ao tamboramento e abrasão.	190
Figura 6.5 – Efeito da adição de <i>pellet feed</i> sem pré-aglomeração na mistura de sinterização da Europa Ocidental na redutibilidade e no tempo de redução.	191
Figura 6.6 – Efeito da adição de <i>pellet feed</i> com pré-aglomeração na mistura de sinterização da Europa Ocidental na redutibilidade e no tempo de redução.	191
Figura 6.7 – Efeito da adição de <i>pellet feed</i> sem pré-aglomeração na mistura de sinterização da Europa Ocidental na degradação estática <3,15mm.	192
Figura 6.8 – Efeito da adição de <i>pellet feed</i> com pré-aglomeração na mistura de sinterização da Europa Ocidental na degradação estática <3,15mm.	192

Figura 6.9 – Efeito da adição de <i>pellet feed</i> sem pré-aglomeração na mistura de sinterização da Ásia na produtividade e consumo de coque.....	194
Figura 6.10 – Efeito da adição de <i>pellet feed</i> com pré-aglomeração na mistura de sinterização da Ásia na produtividade e consumo de coque.....	194
Figura 6.11 – Efeito da adição de <i>pellet feed</i> sem pré-aglomeração na mistura de sinterização da Ásia na resistência ao tamboramento e abrasão.....	195
Figura 6.12 – Efeito da adição de <i>pellet feed</i> com pré-aglomeração na mistura de sinterização da Ásia na resistência ao tamboramento e abrasão.....	195
Figura 6.13 – Efeito da adição de <i>pellet feed</i> sem pré-aglomeração na mistura de sinterização da Ásia na degradação estática <2,8mm.....	196
Figura 6.14 – Efeito da adição de <i>pellet feed</i> com pré-aglomeração na mistura de sinterização da Ásia na degradação estática <2,8mm.....	197
Figura 6.15 – Efeito da adição de <i>pellet screenings</i> com na mistura de sinterização da Europa Ocidental na produtividade e consumo de coque.....	198
Figura 6.16 – Efeito da adição de <i>pellet screenings</i> na mistura de sinterização da Europa Ocidental na resistência ao tamboramento e abrasão.....	199
Figura 6.17 – Efeito da adição de <i>pellet screenings</i> na mistura de sinterização da Europa Ocidental na degradação estática <3,15mm.....	200
Figura 6.18 – Efeito da adição de <i>pellet screenings</i> com na mistura de sinterização da Ásia na produtividade e consumo de coque.....	201
Figura 6.19 – Efeito da adição de <i>pellet screenings</i> na mistura de sinterização da Ásia na resistência ao tamboramento e abrasão.....	202
Figura 6.20 – Efeito da adição de <i>pellet screenings</i> na mistura de sinterização da Ásia na degradação estática <2,8mm.....	203

LISTA DE TABELAS

Tabela III.1 Distribuição granulométrica da mistura antes e depois da modificações ...	37
Tabela III.2 Influência da granulação no processo de sinterização na operação do alto-forno dois da usina de Kurashiki (OYAMA et al, 2005).....	41
Tabela III.3 – Comparação dos resultados operacionais do alto-forno N°5 da NKK em Fukuiama Steel Works antes e depois da utilização de sínter HPS (NIWA et al, 1993)	53
Tabela III.4 – Instalações com misturadores e granuladores intensivos. Fonte: (REIDESCHLAEGGER et al, 2013).....	72
Tabela III.5 - Características da panela e parâmetros do processo.....	76
Tabela IV.1 - Propriedades químicas e físicas dos minérios constituintes das misturas da Europa Ocidental	104
Tabela IV.2 - Propriedades químicas e físicas dos aditivos utilizados nas misturas de sinterização da Europa Ocidental	105
Tabela IV.3 - Propriedades químicas e físicas dos minérios constituintes das misturas da Ásia	107
Tabela IV.4 - Propriedades químicas e físicas dos aditivos utilizados nas misturas de sinterização da Ásia	108
Tabela IV.5 - Propriedades químicas e físicas dos minérios constituintes das misturas da Europa Ocidental	111
Tabela IV.6 - Propriedades químicas e físicas dos aditivos utilizados nas misturas de sinterização da Europa Ocidental	112
Tabela IV.7 - Propriedades químicas e físicas dos minérios constituintes das misturas da Ásia	114
Tabela IV.8 - Propriedades químicas e físicas dos aditivos utilizados nas misturas de sinterização da Ásia	115
Tabela IV.9 – Séries de sinterização da Europa Ocidental.....	117
Tabela IV.10 – Séries de sinterização da Ásia.....	117
Tabela IV.11 - Propriedades químicas e físicas das séries de sinterização da Europa Ocidental.....	119
Tabela IV.12 - Propriedades químicas e físicas das séries de sinterização da Ásia	120
Tabela IV.13 – Séries de sinterização da Europa Ocidental.....	122
Tabela IV.14 – Séries de sinterização da Ásia.....	122
Tabela IV.15 - Propriedades químicas e físicas das séries de sinterização da Europa Ocidental.....	124
Tabela V.1 – Resultados dos testes de sinterização da série 1	139
Tabela V.2 – Resultados dos testes de sinterização da série 2	141
Tabela V.3 – Resultados dos testes de sinterização da série 3	143
Tabela V.4 – Resultados dos testes de sinterização da série 4	145
Tabela V.5 – Resultados dos testes de sinterização da série 5	147
Tabela V.6 – Resultados dos testes de sinterização da série 6	149
Tabela V.7 – Resultados dos testes de sinterização da série 7	151
Tabela V.8 – Resultados dos testes de sinterização da série 8	153
Tabela V.9 – Resultados dos testes de sinterização da série 9	155
Tabela V.10 – Resultados dos testes de sinterização da série 10	157
Tabela V.11 – Resultados dos testes de sinterização da série 11	159
Tabela V.12 – Resultados dos testes de sinterização da série 12	161

Tabela V.13 - Resumo dos testes de sinterização selecionados de cada série dos sínteres da mistura da Europa Ocidental.....	163
Tabela V.14 - Resumo dos testes de sinterização selecionados de cada série dos sínteres da mistura da Ásia.....	164
Tabela V.15 – Resultados dos testes de sinterização da série 1	166
Tabela V.16 – Resultados dos testes de sinterização da série 2	168
Tabela V.17 – Resultados dos testes de sinterização da série 3	170
Tabela V.18 – Resultados dos testes de sinterização da série 4	172
Tabela V.19 – Resultados dos testes de sinterização da série 5	174
Tabela V.20 – Resultados dos testes de sinterização da série 6	176
Tabela V.21 – Resultados dos testes de sinterização da série 7	178
Tabela V.22 – Resultados dos testes de sinterização da série 8	180
Tabela V.23 – Resultados dos testes de sinterização da série 9	182
Tabela V.24 – Resultados dos testes de sinterização da série 10	184
Tabela V.25 - Resumo dos testes de sinterização selecionados de cada série dos sínteres da mistura da Europa Ocidental.....	185
Tabela V.26 - Resumo dos testes de sinterização selecionados de cada série dos sínteres da mistura da Ásia.....	186

RESUMO

Foram realizados experimentos em sinterização piloto, com o objetivo de comparar parâmetros de produção e qualidade dos sínteres produzidos com misturas de referência da Europa Ocidental e Ásia, com os sínteres resultantes de misturas, onde os minérios das misturas de referência foram substituídos proporcionalmente por *pellet feed* e *pellet screenings* Samarco sob quatro diferentes condições.

***Pellet feed* Samarco na mistura de referência da Europa Ocidental**

Para as adições de 10% e 20% do produto *pellet feed*, sem pré-aglomeração, houve uma queda da produtividade de sínter.

No entanto, foi possível atingir uma produtividade máxima de sínter, com a adição de 30% de *pellet feed* pré-aglomerado em misturador intensivo com adição de 10% de cal hidratada em substituição aos outros minérios da mistura de referência estudada. Com a adição do *pellet feed* pré-aglomerado foi possível reduzir o consumo energético e obter bons resultados de características metalúrgicas do sínter.

***Pellet feed* na mistura de referência da Ásia**

Para as adições de 10% e 20% do produto *pellet feed*, sem pré-aglomeração, houve uma queda da produtividade de sínter.

Com a adição de *pellet feed* pré-aglomerado em misturador intensivo com adição de 10% de cal hidratada em substituição aos outros minérios da mistura de referência estudada, não foi obtido ganho de produtividade para as adições de 30% e 40%, houve um pequeno ganho para a adição de 20%. Entretanto, com a adição do *pellet feed* pré-aglomerado, foi possível reduzir o consumo energético e alcançar bons resultados de características físicas e metalúrgicas.

***Pellet screenings* na mistura de referência da Europa Ocidental**

Foi alcançada uma elevada produtividade na máquina de sínter, com a adição do *pellet screenings* de 10% até 40% em substituição aos outros minérios da mistura estudada. Uma adição de 40% de *pellet screenings* elevou o valor de produtividade de sínter em $6,6t/m^2 \cdot 24h$ ou 19,13%, superior ao alcançado com a mistura de referência. Com adição de *pellet screenings* foi possível reduzir o consumo energético com bons resultados de características físicas e metalúrgicas do sínter.

***Pellet screenings* na mistura de referência da Ásia**

Foi possível atingir uma elevada produtividade na de sínter, com a adição do *pellet screenings* de 10% até 40% em substituição aos outros minérios da mistura de referência estudada. Uma adição de 40% de *pellet screenings* elevou o valor de produtividade da máquina de sínter em $6,6t/m^2 \cdot 24h$ ou 20,50%, superior ao alcançado com a mistura de referência. Com adição de *pellet screenings* foi possível reduzir o consumo energético com bons resultados de características físicas e metalúrgicas do sínter.

ABSTRACT

Pilot sintering tests were performed in order to compare production parameters and quality of sinters produced based on Western Europe and Asia standard mixtures, with sinters produced from the addition of Samarco's pellet feed and pellet screenings, that substituted part of the ore in the standard mixture, under four different conditions.

Samarco pellet feed in Western Europe's standard mixture

For additions of 10% and 20% of Samarco's pellet feed without pre-agglomeration, there was a drop in productivity of the sinter.

However, it was possible to achieve maximum productivity in the sinter plant, with the addition of 30% of pellet feed pre-agglomerated in an intensive mixer with addition of 10% of hydrated lime, by replacing other ores from the standard mixture studied. With the addition of the pre-agglomerated pellet feed it was possible to reduce energy consumption and achieve good results on sinter's metallurgical characteristics.

Pellet feed in Asia's standard mixture

For additions of 10% and 20% of the pellet feed without pre-agglomeration, there was a drop in productivity of the sinter.

With the addition of pellet feed pre-agglomerated in an intensive mixer with addition of 10% hydrated lime, by substituting other ores from the standard mixture studied, it was not obtained productivity gain for additions of 30% and 40%. There was a small gain when adding 20%. However, with the addition of the pre-agglomerated pellet feed, it was possible to reduce energy consumption and achieve good results in physical and metallurgical characteristics.

Pellet screenings in Western Europe's standard mixture

It was achieved high productivity in the sinter, with the addition of pellet screenings from 10% to 40% by substituting the other ores from the mixture studied. A level of 40% addition of pellet screenings increased the yield value of the sinter plant $6.6t/m^2.24h$ or 19.13%, superior to that was achieved with the standard mixture. With the addition of pellet screenings, it was possible to reduce energy consumption with good results in the sinter's physical and metallurgical characteristics.

Pellet screenings in Asian's standard mixture

It was possible to achieve a high productivity in the sinter, with the addition of pellet screenings from 10% to 40% replacing other ores from the standard mixture studied. A level of 40% addition of pellet screenings increased the yield value of the sinter plant by $6.6t / m^2.24h$ or 20.50%, superior to the result achieved with the standard mixture. With the addition of pellet screenings it was possible to reduce energy consumption with good results in the sinter's physical and metallurgical characteristics.

1. INTRODUÇÃO

A dinâmica do mercado de minério de ferro vem ganhando complexidade nos últimos tempos. Até o século passado, a prática na exploração de minério ocorria quando encontrado em elevados teores e apresentando granulometria que facilitasse seu processo de redução. No Brasil, os minérios mais pobres e finos eram, e ainda são em muitos casos, tratados como estéreis por não apresentarem viabilidade econômica. Entretanto, a qualidade do minério, de forma global, vem se deteriorando ao longo do tempo e o volume de materiais, antes considerados não comercializáveis, passa cada vez mais a representar parte significativa do corpo das jazidas (UNCTAD, 2014).

Do lado da oferta de minério, a mudança acentuada das características dos minérios comercializados atualmente é devida à exaustão das jazidas de maior teor, mas também proveniente dos projetos de novas empresas no setor. A queda no teor médio de ferro das jazidas tem sido constatada nos últimos anos, em especial na China, devido a sua massiva produção, conforme mostrado na figura 1.1.

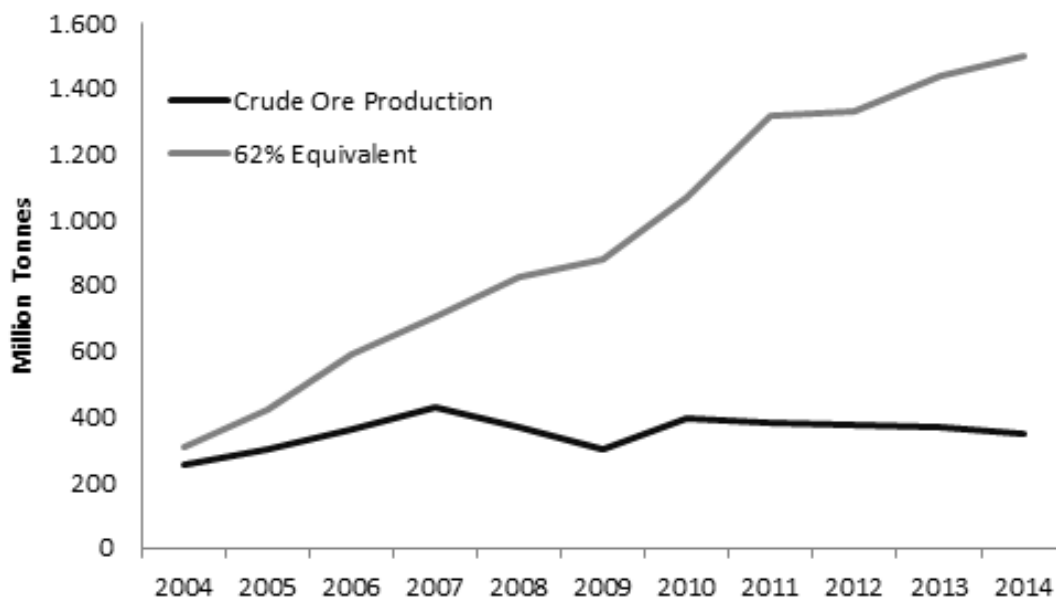


Figura 1.1 Produção de ROM na China e sua equivalência em 62% de Fe (Milhões de toneladas). Fonte: (WOOD MACKENZIE, 2014).

Os produtores de aço na China, que já se habituaram a trabalhar com minérios de menor granulometria e maiores teores de impurezas, devido à característica de seu minério

doméstico, tenderão a aumentar a participação de minério importado em seu consumo total. Mesmo que continuem aumentando a produção de ROM, sua capacidade de produção de minério equivalente a um teor de 62% de ferro tende a cair, conforme demonstrado na figura 1.2.

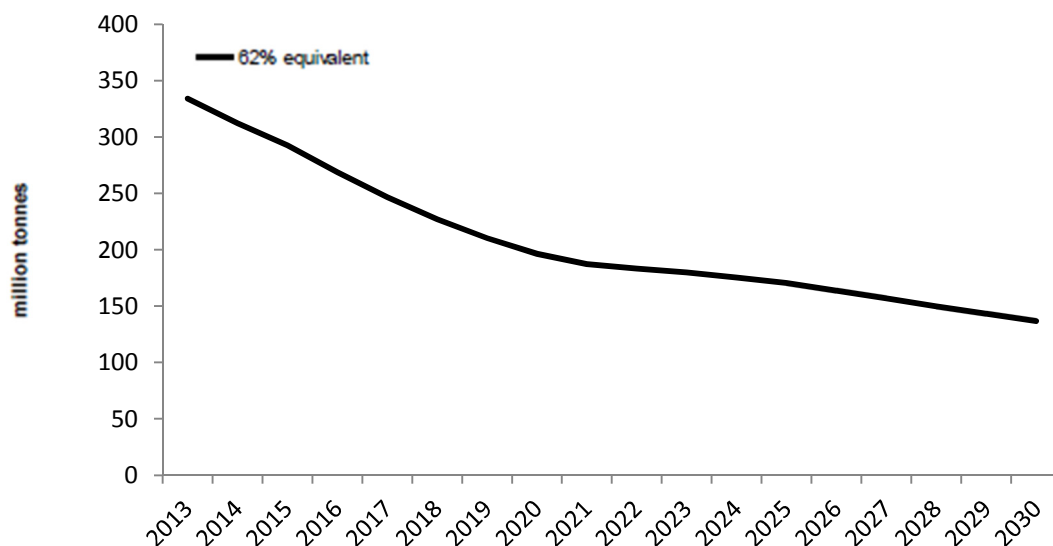


Figura 1.2 Projeção de produção futura de minério de ferro na China com equivalência em 62% de Fe (Milhões de toneladas). Fonte: (WOOD MACKENZIE, 2014).

Avaliando o portfólio de produtos ofertados pelos principais fornecedores do mercado transoceânico é possível notar o aumento da fatia de produtos de menor teor em detrimento da carga considerada nobre, conforme figura 1.3. Como consequência do menor teor de ferro, a granulometria dos minérios ofertados tem diminuído impactando nas tecnologias de processamento das siderúrgicas. Diversos dos novos projetos anunciados já contemplam a produção apenas de *pellet feed* e concentrados (produtos de menor granulometria) o que poderia promover uma inversão tecnológica na aglomeração de minérios. Esta questão da qualidade também repercute nos custos produtivos de minério, que por sua vez terão papel relevante na determinação dos preços em situação de excesso de oferta, onde os produtores de maior custo automaticamente regularizarão a oferta com sua retirada do mercado.

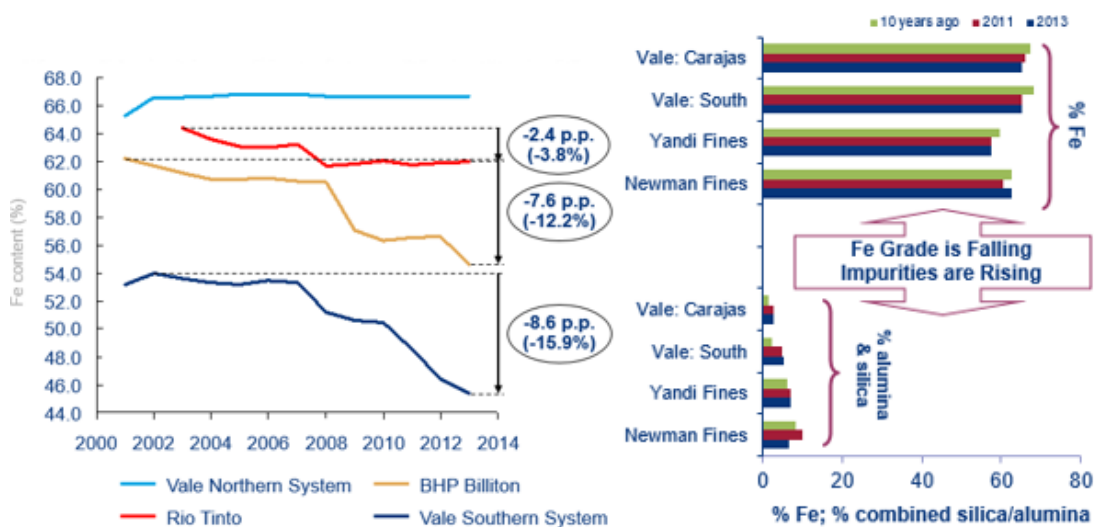


Figura 1.3 Tendências de qualidade dos principais fornecedores. Fonte: (WOOD MACKENZIE, 2014).

Do lado da siderurgia, os impactos sobre os custos produtivos nas economias de escala desse setor, provenientes das mudanças nas características dos minérios ofertados, têm sido percebidos (CROMPTON e LESOURD, 2008). Desenvolvimentos tecnológicos para processar um maior volume desses minérios têm ganhado espaço, por exemplo, a substituição dos combustíveis fósseis por combustíveis de biomassa nas sinterizações poderia revigorar a utilização dessas plantas, levando em consideração também as pressões ambientais que têm ocorrido principalmente na Europa sobre essa rota de processamento de minérios finos (ZANDI et al, 2010).

Em sentido contrário à tendência descrita acima, um requisito indispensável para a economicidade e a produtividade dos processos siderúrgicos é a homogeneidade das características físicas, químicas e metalúrgicas das matérias-primas utilizadas nos reatores metalúrgicos (MONTES CANO e MILANEZ, 1987). Desta forma, há uma crescente demanda em todo o mundo por matérias-primas que apresentem tais características. Outro fator relevante para a indústria siderúrgica é referente à redução do consumo específico de combustível (coque ou carvão vegetal), obtido através de minérios de maior redutibilidade, associada ao aumento da produtividade de metal líquido (FONSECA, 2004). Estas são duas das mais importantes metas a serem atingidas em processos de redução de minério de ferro em altos-fornos.

Já em relação à aciaria elétrica existe atualmente a necessidade de se ampliar a utilização de materiais alternativos contendo ferro na forma metálica devido a uma indisponibilidade de sucata de alta qualidade no mercado. Tanto a produção de ferro-esponja está em ascensão como também a aplicação de ferro gusa neste processo produtivo (ARAÚJO, 2007). Ao mesmo tempo, os operadores de aciarias elétricas percebem a necessidade de não se limitarem ao setor de aços longos que, em geral, destinam-se a produtos de menor exigência em termos de especificações e, por conseguinte, de menor valor de mercado. Diante desse fato, esses produtores sentem-se desafiados a conquistar mais espaço no cenário mundial de aços planos de alta qualidade, atualmente dominado pelas siderúrgicas integradas (ARAÚJO, 2007).

A degradação do minério de ferro não está impactando somente a qualidade química, mas também sua granulometria, ele está se tornando mais fino. O mercado de minério de ferro está entrando em um período de alta oferta, conseqüentemente os fornecedores buscarão oferecer minérios de melhor qualidade para o mercado. Isso vai requerer etapas adicionais de beneficiamento para que o produto tenha um maior teor de ferro, como uma moagem mais intensa para alcançar o grau de liberação da ganga, produzindo assim mais ultrafinos.

Por volta de 2005 iniciou-se a deterioração da qualidade do minério de ferro para o processo de sinterização devido ao processo de exaustão das principais minas localizadas no estado de Minas Gerais, maiores produtores e fornecedores das usinas siderúrgicas integradas localizadas no sudeste do Brasil. Simultaneamente, se observa a diminuição da distribuição granulométrica e o aumento do teor de SiO_2 dos *sinter feeds*, ocasionando a elevação do teor de SiO_2 do sínter, como pode ser observado na figura 1.4. As conseqüências são a deterioração da produtividade das máquinas de sinterização nas siderúrgicas, conforme mostra a figura 1.5, demandando ações que aumentaram o custo pelo incremento no consumo de finos de coque e cal virgem, também o alto volume de escória no sínter, aumentando o volume de escória na produção de ferro gusa nos altos-fornos. Esse processo de deterioração do *sinter feed* continuou ano após ano, o que pode ser observado pelo aumento do volume de escória, como mostra a figura 1.6.

Como medida para a manutenção da produtividade do sinter em face da deterioração do *sinter feed*, vários desenvolvimentos têm sido feitos na etapa de aglomeração a frio da mistura de sinterização, como *Hybrid Pelletizing Sintering* (HPS), introdução da mistura intensiva e outros estudos em desenvolvimento. Para neutralizar o aumento do teor de SiO₂ nos *sinter feeds*, vários esforços tem sido feitos para viabilizar a utilização de *pellet feed* e concentrados na mistura a ser sinterizada.

Enquanto essa tecnologia não é implantada de forma definitiva, vários altos-fornos têm modificado a composição de sua carga metálica, diminuindo a participação de sinter e aumentando a de pelotas e/ou granulado, principalmente para controlar o volume de escória. Algumas siderúrgicas reduziram sua produção de sinter devido à má qualidade da matéria-prima e restrições de teor de SiO₂ que causa excesso de volume de escória, como mostrado na figura 1.6. Outro impacto catastrófico é o aumento no consumo de combustíveis redutores no alto-forno, como é mostrado na figura 1.7. Esse fenômeno é entendido pela relação direta entre o volume de escória e o aumento do consumo térmico do alto-forno (OLIVEIRA, 2015).

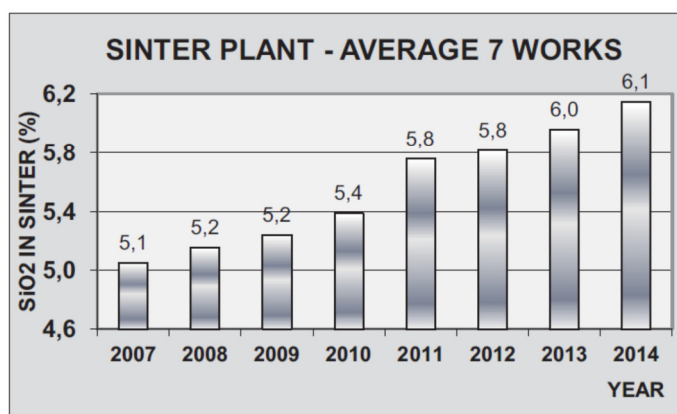


Figura 1.4 – Elevação do teor de SiO₂ do sinter alimentado nas siderúrgicas. Fonte: (OLIVEIRA, 2015).

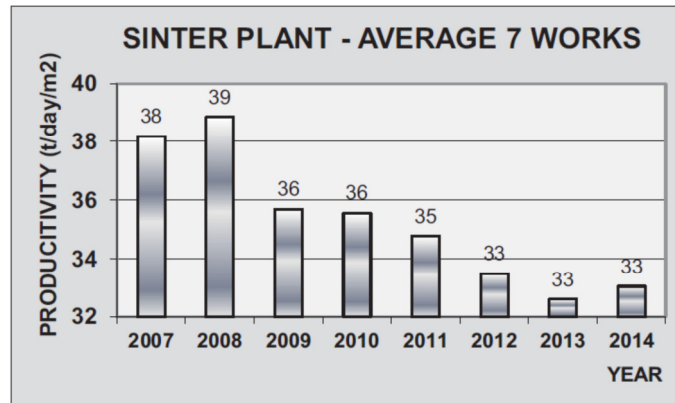


Figura 1.5 – Redução da produtividade das máquinas de sinterização. Fonte: (OLIVEIRA, 2015).

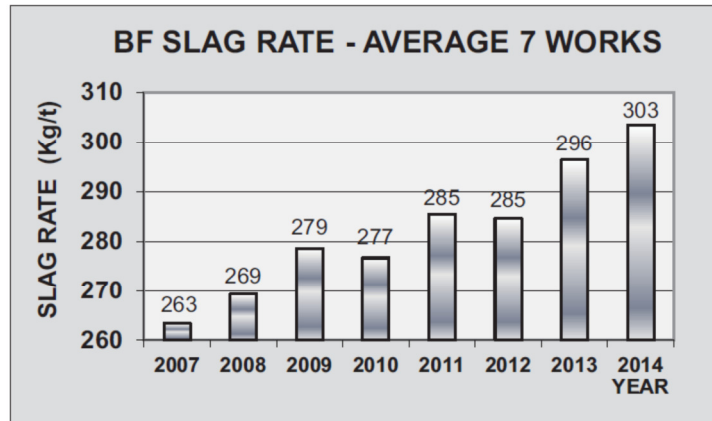


Figura 1.6 – Aumento do teor de escória nos altos-fornos. Fonte: (OLIVEIRA, 2015).

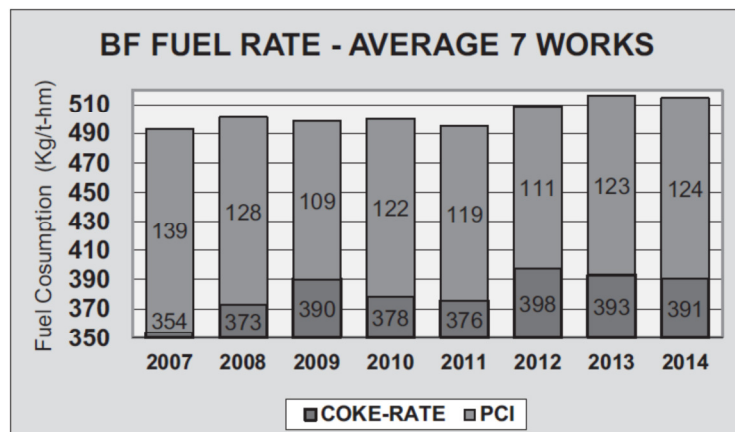


Figura 1.7 – Aumento do consumo de combustíveis redutores nos altos-fornos. Fonte: (OLIVEIRA, 2015).

Como é bem conhecida, a utilização de ultrafinos pode corrigir o teor de ferro, mas tem um impacto negativo na produtividade da máquina de sinterização. Novas tecnologias e métodos estão disponíveis para compensar esse efeito, como a utilização de

misturadores intensivos, HPS (“*Hybrid Pelletized Sinter*”) e novas práticas de utilização de cal de diferentes tipos, dosagem etc. (NOLDIN JR, 2015).

Ante a crescente dificuldade de se obter um único minério com uma qualidade adequada, quantidade suficiente e custo competitivo, o caminho adotado pelas siderúrgicas é a mistura de minérios, assim, a um ou mais produtos 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 outro lado, um determinado material, que possua um elevado percentual de superfinos que pode ser considerado prejudicial numa primeira análise, pode ser útil em outra situação (PEREIRA, 2004). Os estágios de evolução atuais das sinterizações e altos-fornos no mundo evidenciam sua adaptação à necessidade da utilização de matérias-primas com características cada vez mais distintas.

Com a entrada de minérios mais pobres e finos, pressões ambientais em ambas as pontas da cadeia produtiva, novas tecnologias para processamento de minérios e produção de aço, é certa uma alteração das tecnologias aplicadas na aglomeração de minérios. A necessidade de investimentos em pesquisa e o consequente desenvolvimento tecnológico mostram-se fundamentais para assegurar a competitividade das empresas mineradoras dedicadas à exportação de minérios de ferro (FERREIRA, 2002).

Diante desses desdobramentos, o mercado de *pellet feed* está atravessando um momento de discussões sobre o uso de ultrafinos na produção de sinter, que possui nível de maturidade diferente em cada uma das principais regiões produtoras de aço. A gradual deterioração na química (ganga ácida) e distribuição granulométrica (porcentagem da participação de ultrafinos) do *sinter feed* padrão (*Standard Sinter Feed* - SSF) existente está levando as usinas siderúrgicas a avaliar otimizações de processos em plantas de sinterização. Como parte desta discussão os custos produtivos e de investimento se tornam fundamentais (GAGGIATO, 2010).

No mercado transoceânico de minério de ferro, a Europa é a região que terá acesso mais duradouro e mais fácil ao *sinter feed* de alta qualidade. Além disso, o mercado siderúrgico na região atravessa um momento de maior dificuldade em relação a outros mercados e não existem incentivos para investimentos no processo de sinterização. Na Comunidade dos Estados Independentes (CEI) e na Ásia, as empresas já utilizam uma maior participação de concentrados e *pellet feed* para alimentar suas usinas de sinterização. Nas duas regiões ainda são facilitados os investimentos em instalações de novas sinterizações ou novos equipamentos para melhorar o desempenho. A demanda de aço vem aumentando a um ritmo mais rápido e não existem tantas restrições ambientais relacionadas à produção de sinter como na Europa.

Esta investigação contempla a avaliação em escala piloto no laboratório *Studien Gesellschaft für Eisenerz Aufbereitung-SGA*, na Alemanha, com *pellet feed* e *pellet screenings* da Samarco Mineração S/A, em misturas de sinterização típicas utilizadas por siderúrgicas da Ásia e Europa Ocidental em determinados níveis de substituição.

O *pellet feed* produzido na Samarco Mineração é o produto resultante do processo de filtragem, após o minério de ferro ser lavrado, britado, moído, deslamado, concentrado, transportado por mineroduto e espessado. O *pellet feed* excedente do processo de pelotização é comercializado para produtores de pelotas de minério de ferro e/ou sinter. O *pellet feed* tem como vantagem seu alto teor de ferro e baixa quantidade de ganga ácida quanto comparada com alguns *sinter feeds* do mercado.

O *pellet screenings* é o produto resultante da etapa de peneiramento das pelotas queimadas com tamanho inferior a 6,3mm. Comparado ao *sinter feed* natural, o *pellet screenings* apresenta as vantagens de ser um material com alto teor de ferro, baixa quantidade de ganga ácida, com baixa perda ao fogo, além de ter elementos fluxantes em sua composição química. O produto *pellet screenings* é comercializado para usinas siderúrgicas para ser misturado com outros minérios para correção química e granulométrica de misturas de sinterização.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral é avaliar em escala piloto o comportamento dos produtos *pellet feed* e *pellet screenings* no processo de sinterização em substituição de minérios em misturas típicas utilizadas por siderúrgicas da Europa Ocidental e Ásia.

O objetivo específico é avaliar os parâmetros de produção: produtividade média e o consumo específico de coque; análises químicas dos principais elementos; parâmetros de qualidade física: resistência ao tamboramento e índice de abrasão; parâmetros de qualidade metalúrgica: índice de degradação após redução a baixa temperatura e redutibilidade de cada sinter quando se usa *pellet feed* e *pellet screenings*.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nos últimos anos as áreas de preparação de matérias-primas das siderúrgicas integradas do mundo vêm acompanhando com atenção o empobrecimento da qualidade física e química das fontes de minério de ferro. Aliado a isso ocorre o crescimento da demanda dessas fontes principalmente devido ao crescimento da produção de aço especialmente na China, acarretando a utilização de minérios que até pouco tempo não eram classificados como tal. Essa situação impõe desafios à siderurgia mundial, que procura soluções para essa circunstância. Vários exemplos dessa busca podem ser vistos nas mais diversas regiões do mundo, feita por grupos siderúrgicos, universidades, centros de pesquisa e fornecedores de equipamentos.

3.1 Importância da granulação de finos no processo de sinterização

ERRIGO et al (1981) afirmaram que a etapa de granulação é básica 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 alvo do tratamento de 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 possui desse modo, uma distribuição de tamanho de partículas mais estreita e contém menos finos que o material original. Como resultado, o material oferece menor resistência à passagem dos gases, por essa razão as propriedades fluidodinâmicas 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), a inclinação dos eixos de rotação e a 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. Esse tratamento solidifica a água de umectação da mistura, dando aos grânulos resistência suficiente para que sejam submetidos ao ensaio de análise granulométrica. Para evitar o descongelamento prematuro da mistura congelada durante o peneiramento, o conjunto de peneiras é colocado em um contêiner de metal de parede dupla, que é mantido a baixa temperatura com o gelo colocado entre as paredes. O procedimento do teste é descrito resumidamente a seguir: um quilograma de amostra da mistura é colocado em uma bandeja de metal que é colocada na câmara fria a -20°C por 30 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. A determinação da distribuição granulométrica é feita pela pesagem das frações individuais retidas nas peneiras (4,76mm, 4,00mm, 3,36mm, 2,83mm, 2,38mm, 2,0mm, 1,41mm, 1,00mm, 0,50mm e fundo). Repetidos ensaios foram realizados e mostraram a boa reprodutibilidade do teste.

ROLLER (1982) mencionou que a distribuição granulométrica de *sinter feed* tem atraído 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 superfino na mistura a ser sinterizada, a microestrutura do núcleo das partículas e a umidade da mistura a ser granulada. MATSUMOTO et al (1988) discorreram sobre os efeitos do aumento na altura da camada a sinterizar na máquina de síter N°4 na usina de Mizushima, da Kawasaki Steel Corporation. A camada foi elevada de 530 para 730mm, levando ao aumento da qualidade do síter 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 5,2rpm 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 síter, o *shatter*

index aumentou de 90,8 para 92,4%, o RDI aumentou de 33,9 para 34,2% e o FeO foi reduzido de 7,9 para 7,1%.

FUJII et al (1990) comentaram 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, com capacidade de produção de 120t/h, equivalente a 20% do consumo de material da máquina de sinter. O misturador é um tambor com 1m de diâmetro e 2,8m de comprimento, 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 sinter. 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 sinter.

KAWAGUCHI et al (1990) discorreram 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 (*Reduction Degradation Index*) e a permeabilidade do leito de sinter, diminuir o consumo de coque e melhorar o tumble index e o RI (*Reduction Index*) 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 sinter.

DUTTA et al (1992) enfocaram 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 et al (1992) mencionaram que a estrutura de um grânulo de sinter é basicamente formado 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 finos de retorno de sinter, 11% de grânulos de fluxantes e 4% de grânulos de coque.

BENTES et al (1993) discutiram sobre a possibilidade de 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) afirmou 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 goethítico 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 goethíticos, 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 melhor distribuição 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) comentaram 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.

LOO et al (1996) discutiram 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 promove a selagem dos poros do minério e aumenta a disponibilidade de água para a adesão interpartículas.

LOO (1998) afirmou 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) mencionaram que a granulação é muito importante porque determina a produtividade e o desempenho do processo de sinterização.

LITSTER e WATERS (1988) relataram 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.

OBOSO et al (1998) relataram 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 à obtenção de 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 gerado conhecimento sobre o 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 aonde 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.

SAKAMOTO et al (1997) descreveram uma experiência realizada na planta de sinterização número 4 da NKK, em Fukuyama, que possui uma área de grelha de 400m². Essa planta possui dois misturadores, sendo o primeiro utilizado como granulador e o segundo para aplicar um *coating* de finos de coque. A figura 3.1 mostra o fluxo de processo da planta de sinterização número 4 de Fukuyama. A mistura de sinterização contendo *pellet feed*, *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 para formar a quasi-partícula foi a seguinte: finos de retorno 49,2%, concentrado 10,8%, *sinter feed* 40% e a essa mistura foram adicionados, calcário 15,7% e coque 1,7%. Para o *coating* da quasi-partícula foi adicionado 10% de *pellet feed* em relação da base de mistura de minérios e uma adição de coque 2,1%. Ocorreu uma melhoria das seguintes características de qualidade do sinter: índice de tamboramento, índice de redução e índice de degradação após redução.

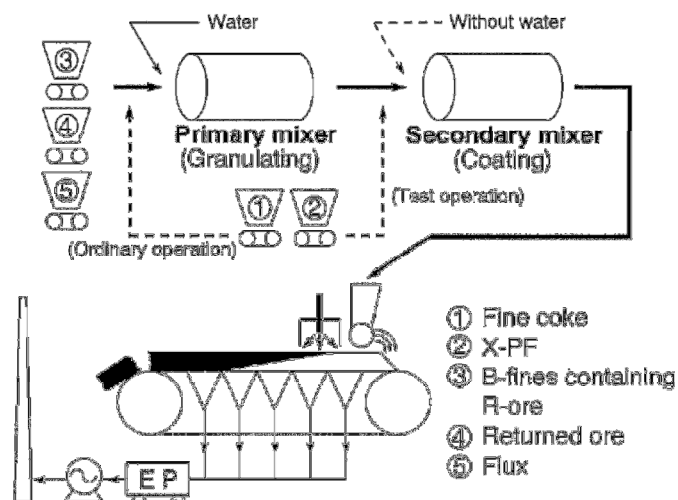


Figura 3.1 Fluxo de processo da planta de sinterização número 4 de Fukuyama. Fonte: (SAKAMOTO et al, 1997).

YANG e WITCHARD (1998) afirmaram 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 reduzem 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 goethítico são bons nucleantes, enquanto as superfícies lisas e uniformes do calcário, hematita especular etc. não são.

ZHANG et al (1998) relataram 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 dois pontos percentuais.

Em 1979, foram realizados no Maanshan Iron & Steel Design Institute testes piloto (JINGMING, 1980) 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) discorreram 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) mostraram 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) descreveu 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 aplicaram 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 à 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 usa 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 sínter de 16m^2 , onde os concentrados foram granulados em dois tipos de pequenas pelotas, uma com 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 mistura 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 significativamente todo o processo de sinterização para concentrados. 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 obter *lump* e pelotas devido a longas distâncias de transporte. Então, há longo tempo, a JiuQuan Iron and Steel Co. utiliza 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) relatou 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 CO₂, 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) descreveram o método de granulação seletiva instalado na máquina de sinter N°2 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 a linha convencional de sinterização, a porção inferior a 3mm é 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 exaustão 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) relataram 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 Al₂O₃ no sinter, melhorando suas características, utilizando finos com baixo teor de Al₂O₃, 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) relataram 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 consequente 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) descreveram 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 III.1.

Tabela III.1 Distribuição granulométrica da mistura antes e depois da modificações

Fonte: (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

Segundo SAKAMOTO (2002), cada vez mais no Japão serão utilizados finos de minério nas misturas de sinterização, devido à diminuição das reservas de *sinter feed*. Entretanto, 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.

Segundo FORMOSO et al (2003), a 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 nas 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 na Nippon Steel Corporation. Foi criado 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 mais difíceis de granular e não possuem um papel definido no processo de granulação. Foi estudada a boa formação da granulação de minérios de ferro ou de suas misturas, para isso foi determinado o índice de granulação, metodologia que está sendo aplicada pela ACERALIA. Foram testados 30 tipos de minério de ferro utilizados na sinterização da ACERALIA, classificados em quatro grupos de acordo com o seu índice de granulação. Após, misturas foram estudadas com esses grupos de minérios de forma a aumentar a produtividade, diminuir o consumo de combustível e elevar a qualidade do sinter. A produtividade foi elevada de 30 para $38\text{t/m}^2 \cdot 24\text{h}$, o consumo de coque foi reduzido de 50 para 34kg/t de sinter, o RDI($<3\text{mm}$) para 32%, *tumble index* ($>6,3\text{mm}$) entre 74 e 77% e a redutibilidade entre 69 e 80%.

SCHWALM e GERLACH (2003) relataram 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 (micropelotizado, 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 fizeram uma descrição geral do processo onde o fino granulado (micropelotizado) 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 dos pós das sinterizações e de outras etapas da fabricação do aço, sob a forma de granulados na mistura de sinterização, resultou em economia de energia e aumento da produtividade devido à melhoria da permeabilidade do leito de sínter em duas máquinas de sínter da China Steel.

No processo de granulação com tambores de pelotização, há silos individuais de finos de minério, aditivos, coque e de pós do processo de fabricação do aço. 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 2mm 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.

Discos de pelotização podem ser instalados como uma alternativa aos tambores de pelotização. 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 micropelotas adequadas ao processo de sinterização.

A partir desse trabalho, 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.

HARA et al (2011) relataram que o aumento da utilização de ultrafinos na sinterização, com o uso de *pellet feed* do Brasil e minério australiano, tem causado perda de

permeabilidade do leito de sinterização. Com isso há o decréscimo da produtividade das máquinas de sinter. Para fazer frente ao problema, a Sumitomo Metal Industries Ltd. desenvolveu estudos de laboratório para aperfeiçoar o processo de granulação da mistura a ser sinterizada. Um desenho esquemático do equipamento é apresentado na figura 3.2. Foi avaliado o tempo de residência, inclinação do tambor e a taxa de alimentação. Para cada tipo de mistura a ser sinterizada foram determinados parâmetros para se alcançar a melhor granulação para garantir a máxima permeabilidade do leito.

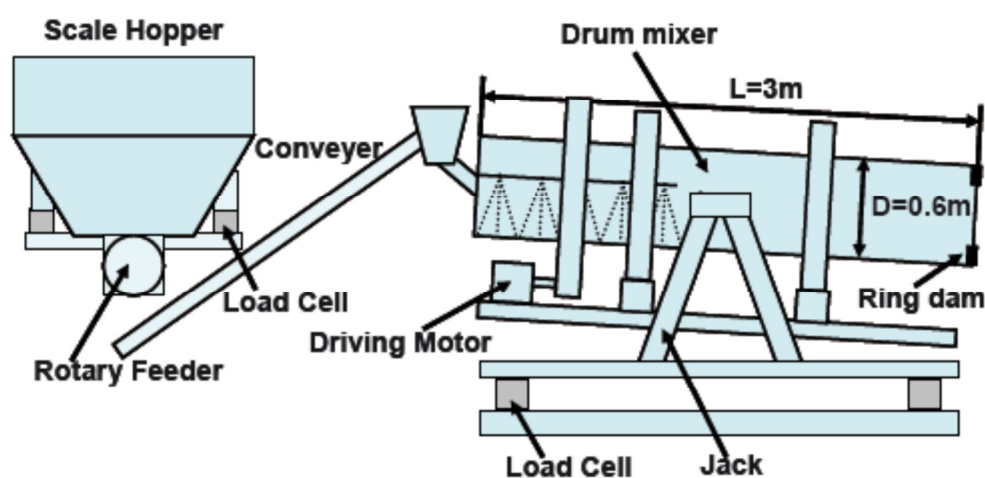


Figura 3.2 – Desenho esquemático do equipamento de granulação. Fonte: (HARA et al, 2011).

MIWA e KURIHARA (2011) relataram que no Japão os grandes grupos siderúrgicos também partiram para desenvolver processos de granulação de finos de minério de ferro e também expansões na área de sinterização. Destaca-se a JFE Steel Corp., que desenvolveu um novo processo de granulação para a mistura a ser sinterizada, conforme a figura 3.3. A nova tecnologia aumentou a produtividade das máquinas de sinter e a reutilizabilidade do sinter. O novo processo foi implantado nas quatro máquinas de sinter em West Japan Works, o que possibilitou o aumento da capacidade anual de 13.5 para 19 milhões de toneladas.

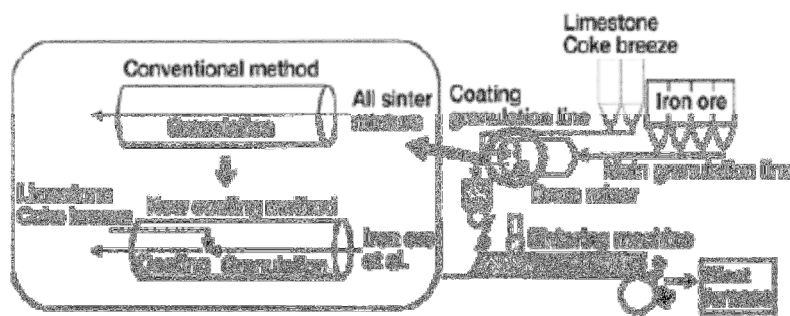


Figura 3.3 - Fluxo de processo das máquinas de sinterização da JFE em West Japan Works. Fonte: (MIWA e KURIHARA, 2011).

OYAMA et al (2005) descreveram um processo de granulação de finos desenvolvido pela JFE utilizando um tambor com adição de calcário e *coke breeze* na superfície das quasi-partículas. Esse processo aumentou a produtividade da máquina de sinterização número 2 da usina de Kurashiki. A maior permeabilidade do leito de sinter causou melhora na qualidade do sinter e nas características de redutibilidade e RDI. O sinter produzido foi testado por um mês no alto-forno dois da usina de Kurashiki com o mesmo blend de matérias-primas e condições de sopro. Como resultado houve uma diminuição no consumo de coque de 7kg/t de gusa e um aumento de eficiência do gás de topo em 1%, conforme tabela III.2 abaixo. Esse processo foi implantado em todas as máquinas de sinter da JFE West Japan Works.

Tabela III.2 Influência da granulação no processo de sinterização na operação do alto-forno dois da usina de Kurashiki (OYAMA et al, 2005)

	Conventional method	Coating method
Charging ratio of raw materials		
Sinter (mass%)	70	
Pellet (mass%)	10	
Lumpy ore (mass%)	20	
Slag rate (kg/t-hm)	282	
Productivity (t/d/m ³)	2.01	2.03
Reduction agent rate (kg/t-hm)	517	510
Blast temperature (°C)	980	
Blast moisture (g/Nm ³)	50	
O ₂ enrichment (vol %)	1.5	
CO gas utilization (vol %)	50.9	51.7
Shaft gas efficiency (vol %)	95.3	96.3

MAEDA et al (2005) relataram que com a delapidação das jazidas de hematita de alta qualidade da Austrália e com o aumento da participação de minério de ferro hidratado a

performance das sinterizações está em queda. Entretanto com a abundância de minério hidratado e devido a seu preço competitivo, faz-se necessário o desenvolvimento de sua maior participação nas misturas de sinterização. Sabe-se que a estrutura e a resistência das quase-partículas formadas por granulação de partículas finas e grossas de minério de ferro são grandemente influenciadas pela água absorvida pelo minério de ferro, molhabilidade das partículas de minério, umidade adicionada e a superfície do minério de ferro. Diante disso, a Kobe Steel decidiu realizar um estudo para determinar a adição ótima de umidade para a granulação de partículas finas e grossas e o ângulo de contato entre a água e o óxido de ferro. O estudo foi realizado para cinco diferentes tipos de minério de ferro, sendo três hematíticos e dois hidratados.

Segundo UMADEVI et al (2011), na Índia, a JSW Steel Limited desenvolveu estudo para determinar a influência de partículas finas na qualidade do síter, utilizando um tambor para granular a mistura antes da sinterização. Com a granulação das partículas finas verificou-se o aumento da produtividade e da qualidade do síter.

KHOSA e MANUEL (2007) relataram que o aumento da demanda e a diminuição das fontes de minérios de alta qualidade resultaram no aumento da diversidade de fontes de minério de ferro para a indústria do aço. Afirmaram que o minério de ferro fino antes de ser sinterizado tem que ser granulado. A pesquisa foi conduzida no CSIRO Minerals com sete tipos de minério, foram estudados os efeitos do tipo de minério e de sua distribuição granulométrica na granulação da mistura a sinterizar. Com os resultados foi construído um modelo no qual é possível, com as informações da composição do minério e de sua distribuição granulométrica, determinar a umidade ótima de granulação e a permeabilidade.

Segundo LÜNGEN et al (2011), na Europa, considerando os 27 países membros da Comunidade Europeia, a capacidade instalada de produção anual de síter, em 2010, era de 129 milhões de toneladas ano, sendo superada apenas pela China e seguida pela Rússia com 111 milhões de toneladas ano e Japão com 102 milhões de toneladas ano. Muitas melhorias foram realizadas nas sinterizações, destacando-se a pelotização prévia da mistura a ser sinterizada.

LÜNGEN et al (2015) comentaram que a futura disponibilidade de *sinter feed* vai desafiar os operadores das plantas de sinterização. Por razões de operação, os fornecedores de matérias-primas aumentarão a oferta de *pellet feed* e concentrados, que deverão ser processados para serem utilizados em substituição do *sinter feed* de granulometria adequada nas plantas de sinterização. Vinte e nove plantas de sinterização operavam na EU-15 em 2013, com uma área de sucção média de 288m². Oito plantas de sinterização possuíam uma área de sucção acima de 400m², a maior tinha 589m². A maior produtividade específica por máquina foi atingida com 59,5t de sinter por m² em 24 horas. Essa marca é o recorde mundial.

As plantas de sinterização europeias devem atender a rígidas normas ambientais, particularmente em relação a particulados, SO₂, NO_x e dioxinas no gás de exaustão.

TAKAMATSU et al (2012) afirmaram que a qualidade do minério australiano tem se modificado de maneira marcante durante os últimos anos devido ao balanço de oferta e demanda. A Hamersley, atualmente Rio Tinto, tem blendado o minério Marandoo de Marra Mamba com o minério hematítico de Brockman desde 1994 e iniciou o embarque do minério West Angelas em 2002, que foi o primeiro minério não blendado de Marra Mamba. Recentemente, em particular, quantidades consideráveis de minério de alto teor de P de Brockman foram misturados com Marra Mamba e outros minérios de baixo P. Todas essas atividades são evidências das últimas rápidas mudanças nas condições naturais das fontes de minério de ferro, o que trouxe um efeito adverso nas operações das siderúrgicas com o aumento de minério limonítico e de granulação fina dos minérios australianos. O aumento de minério fino com péssimas propriedades de granulação reduziu a produtividade das sinterizações requerendo a introdução de aglomerantes orgânicos para melhorar a granulação dos minérios e posteriormente um processo foi desenvolvido para transformar esse minério em minipelotas resistentes utilizando-se aglomerantes. O processo desenvolvido é chamado SPEX II, foi colocado em operação comercial na usina de Yawata em 2008, sendo uma tecnologia efetiva para a utilização de minérios de baixa qualidade. A figura 3.4 apresenta o fluxo desse processo.

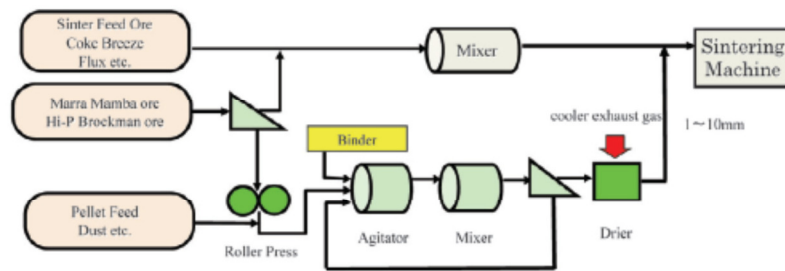


Figura 3.4 – Fluxo do processo SPEX II. Fonte: (TAKAMATSU et al, 2012).

ELLIS et al (2007) comentaram que a granulação de finos de minério de ferro é um processo intrincado e sensível às súbitas mudanças das condições de operação e variáveis associadas ao minério de ferro como, distribuição granulométrica, mineralogia e porosidade. A adição de água é outra variável que, em conjunto com a porosidade do minério de ferro e do nível de absorção de água, determina a quantidade de água disponível para a adesão interpartículas.

CORES et al (2012) afirmaram que a etapa de granulação é de importância fundamental para o processo de sinterização de minério de ferro, uma vez que a permeabilidade e o fluxo de gases através do leito de sinterização, a velocidade da frente de chama e o perfil de temperatura versus o tempo determinam de modo importante os parâmetros de processo e por consequência a produtividade da planta de sinterização. Os primeiros estudos sobre a estrutura de minérios granulados foram realizados por pesquisadores na Nippon Steel Corporation, que criaram o termo *quasi-particle*. A *quasi-particle* é formada por um núcleo com partícula $>0,7\text{mm}$ e finos aderentes $<0,2\text{mm}$. A adesão dos finos no núcleo é altamente dependente da umidade disponível para a granulação. Outros fatores são a forma da partícula e suas propriedades de superfície.

GAN et al (2015) comentaram que a etapa de granulação é de suma importância no processo de sinterização de minério de ferro. Durante esse estágio, partículas finas se aderem às partículas mais grossas ou as partículas finas se aglomeram formando partículas de tamanho apropriado. Uma granulação efetiva influencia diretamente a permeabilidade do leito e o fluxo de gases através do leito de sinterização. Com o aumento da permeabilidade, o fluxo de gases aumenta, há um acréscimo na velocidade de sinterização, há uma redução no consumo dos combustíveis e a taxa de transferência

de calor gás-sólido é aumentada, o que leva ao aumento da produtividade e a um menor consumo de energia.

A eficiência da granulação depende principalmente de três fatores: condições operacionais dos tambores misturadores (velocidade de rotação, dimensões do tambor, taxa de alimentação), umidade da mistura a ser sinterizada e características do minério de ferro.

Os autores analisaram 13 tipos de minérios com diferentes análises químicas e superfície específica da fração -0,5mm. Esses minérios foram misturados em diferentes proporções e testes de sinterização foram realizados.

A figura 3.5 mostra a influência da superfície específica na granulação das partículas aderentes. É claro, que com o aumento da superfície específica, há um decréscimo na fração de grãos com -1,0mm, a média do diâmetro aumenta gradualmente e a diferença de pressão diminui. O fator de forma se aproxima de um na medida em que a superfície específica aumenta. A razão principal é que as partículas aderentes com maior superfície específica formam grânulos com uma superfície mais lisa, o que resulta no aumento do fator de forma. Quando a superfície específica das partículas aderentes ultrapassa 1.000cm²/g, o diâmetro médio e a permeabilidade do leito de sinterização aumentam ligeiramente.

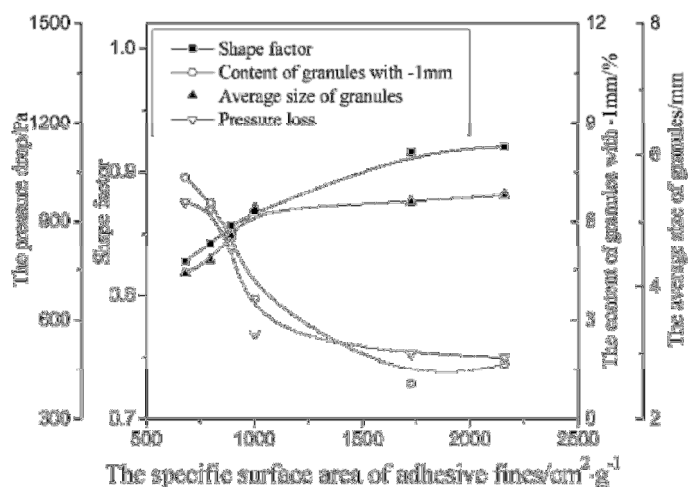


Figura 3.5 – Efeitos da superfície específica das partículas aderentes na granulação. Fonte: (GAN et al, 2015).

Entretanto, a figura 3.6 mostra que a proporção de 40-50% de partículas aderentes com superfície específica superior a $1.000\text{cm}^2/\text{g}$, conduz ao crescimento dos grãos, o que contribui para o atingimento de uma melhor permeabilidade do leito de sinterização e alta produtividade da máquina de sínter.

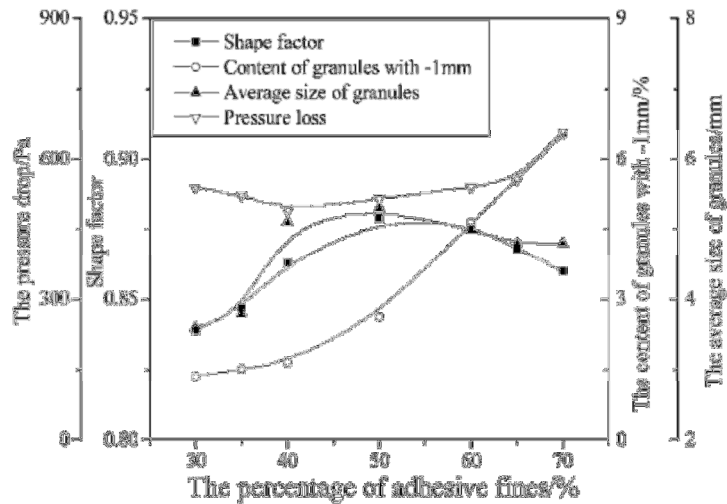


Figura 3.6 – Efeitos da proporção das partículas aderentes na granulação. Fonte: (GAN et al, 2015).

MAO et al (2013) estudaram quatro tipos de minérios de ferro e afirmaram que a propriedade de granulação dos minérios é influenciada por sua capacidade de reter água e a morfologia de sua superfície no que se refere a sua forma e rugosidade. A figura 3.7 mostra a forma e rugosidade dos minérios. Nota-se que os minérios A e B são extremamente rugosos e com uma forma mais irregular ao contrário dos minérios C e D.

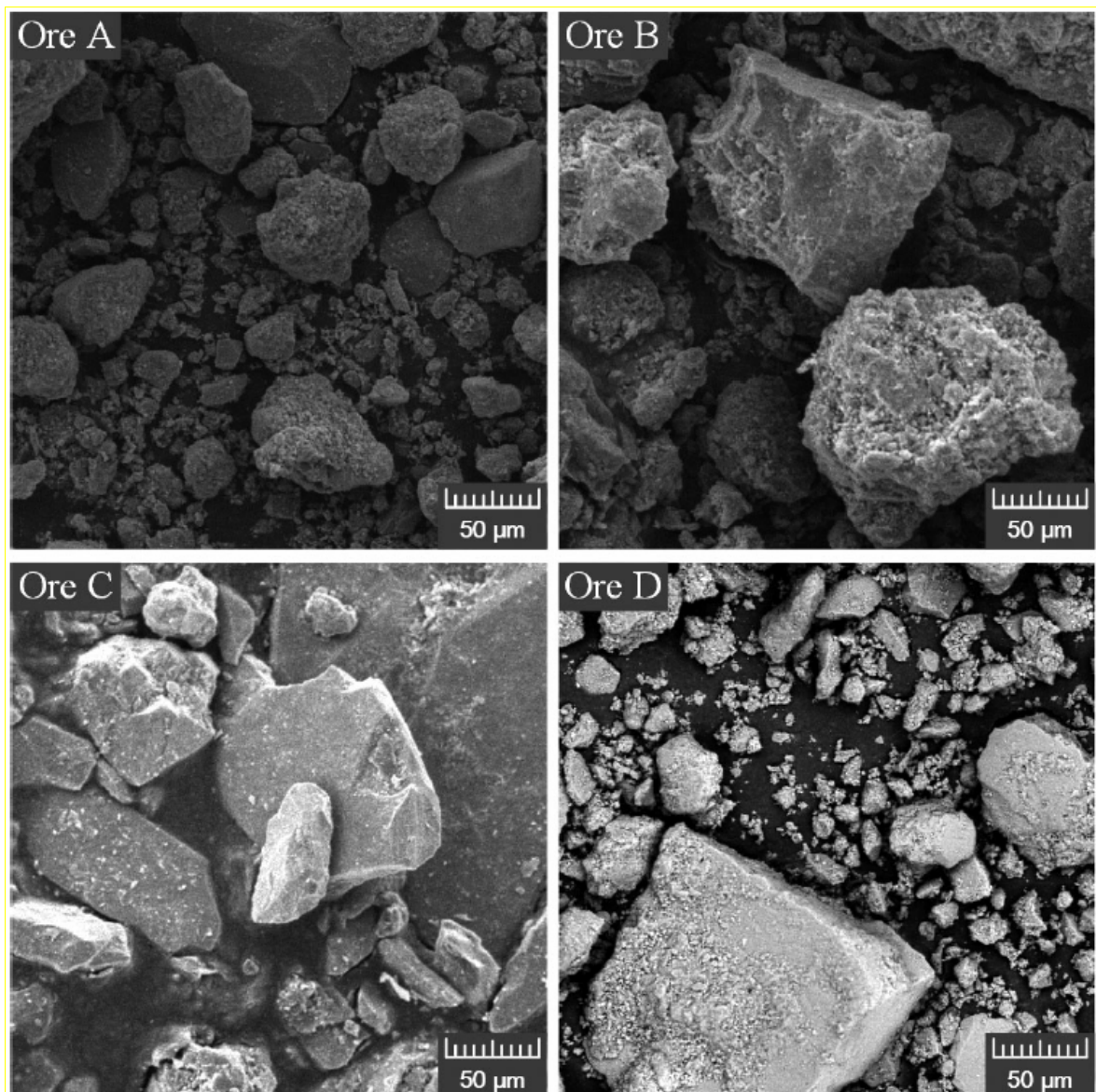


Figura 3.7 – Micrografia dos minérios estudados. Fonte: (MAO et al, 2013).

Os experimentos de granulação foram realizados em um misturador rotativo de laboratório por um tempo de 4 minutos com adição de diferentes dosagens de água. O misturador tem um diâmetro de 416mm e um comprimento de 940mm. Os grânulos gerados foram analisados em um aparelho de medição de permeabilidade com diâmetro de 210mm e altura de 300mm. A permeabilidade em JPU (*Japanese Permeability Unit*) foi determinada utilizando-se a equação:

$$JPU = \frac{Q}{A} \left(\frac{H}{\Delta P} \right)^{0.6},$$

Onde Q é a taxa do fluxo de ar em m^3/min , A é a área da seção transversal do leito em m^2 , H é a altura do leito em mm e ΔP é a diferença de pressão do leito em mmH_2O . A figura 3.8 mostra os resultados dos experimentos com cada tipo de minério, onde a permeabilidade do leito apresenta uma relação linear com a massa adicionada de cada minério. A permeabilidade melhora com o aumento da fração dos minérios A e B na mistura, enquanto que com os minérios C e D ocorre o contrário. Uma maior quantidade de minérios C e D na mistura causa uma piora da permeabilidade do leito.

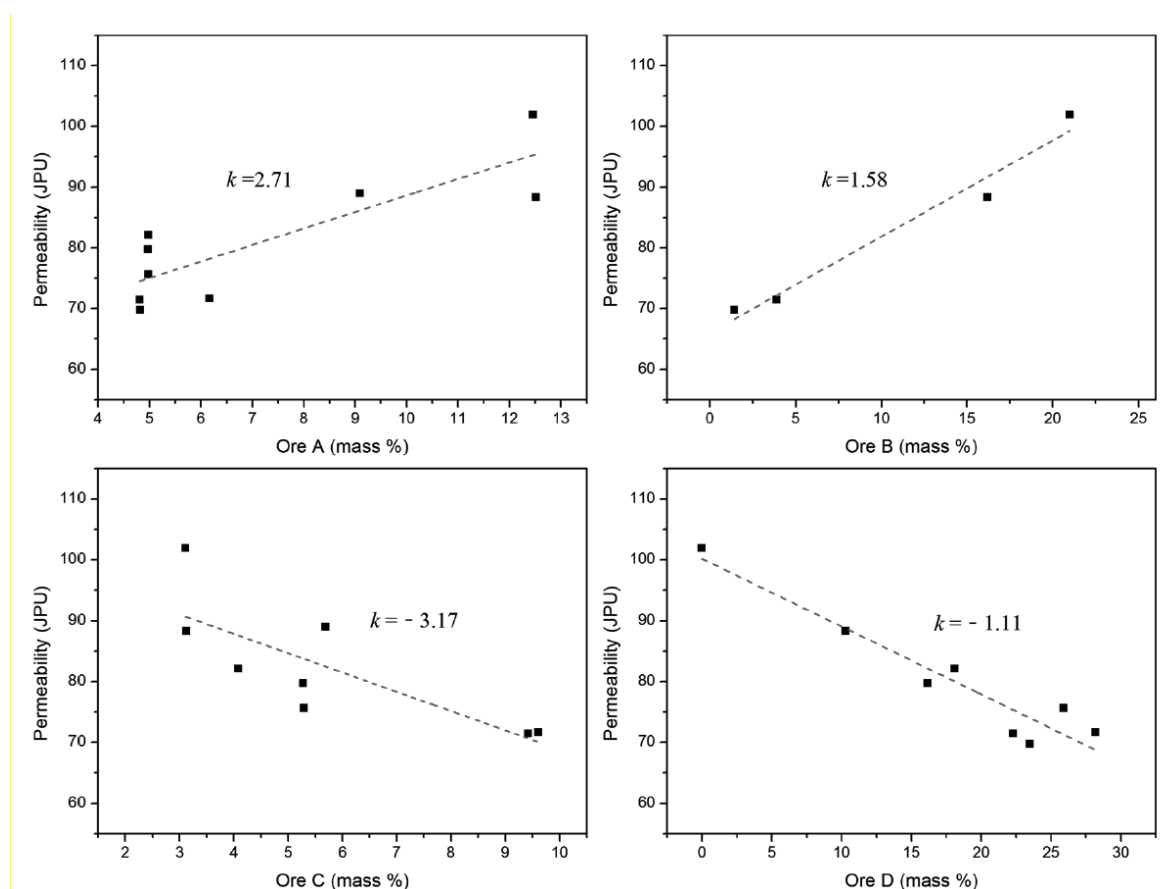


Figura 3.8 – Permeabilidade do leito de grânulos versus a quantidade dos minérios estudados. Fonte: (MAO et al, 2013).

NAITO et al (2015) traçaram um panorama do desenvolvimento do processo de sinterização no Japão. Mencionaram que em 1958 a Fuji Iron and Steel Muroram Works operou utilizando 100% de sinter na carga do alto-forno e a Sumitomo Metal Industries operou utilizando uma carga de 100% sinter auto-fluxante. Devido à utilização do sinter auto-fluxante houve um decréscimo no *coke rate* e aumento da produtividade do alto-

forno. Diante disso todas as companhias passaram a operar utilizando sinter com alta basicidade. Com isso toda carga de calcário utilizada no alto-forno passou a ser dosada no sinter. Como resultado, a carga direta de calcário no alto-forno foi eliminada.

Com a maior utilização de sinter nos altos-fornos, métodos para avaliar sua qualidade foram aplicados no Japão. A figura 3.9 mostra mais detalhes dessa história.

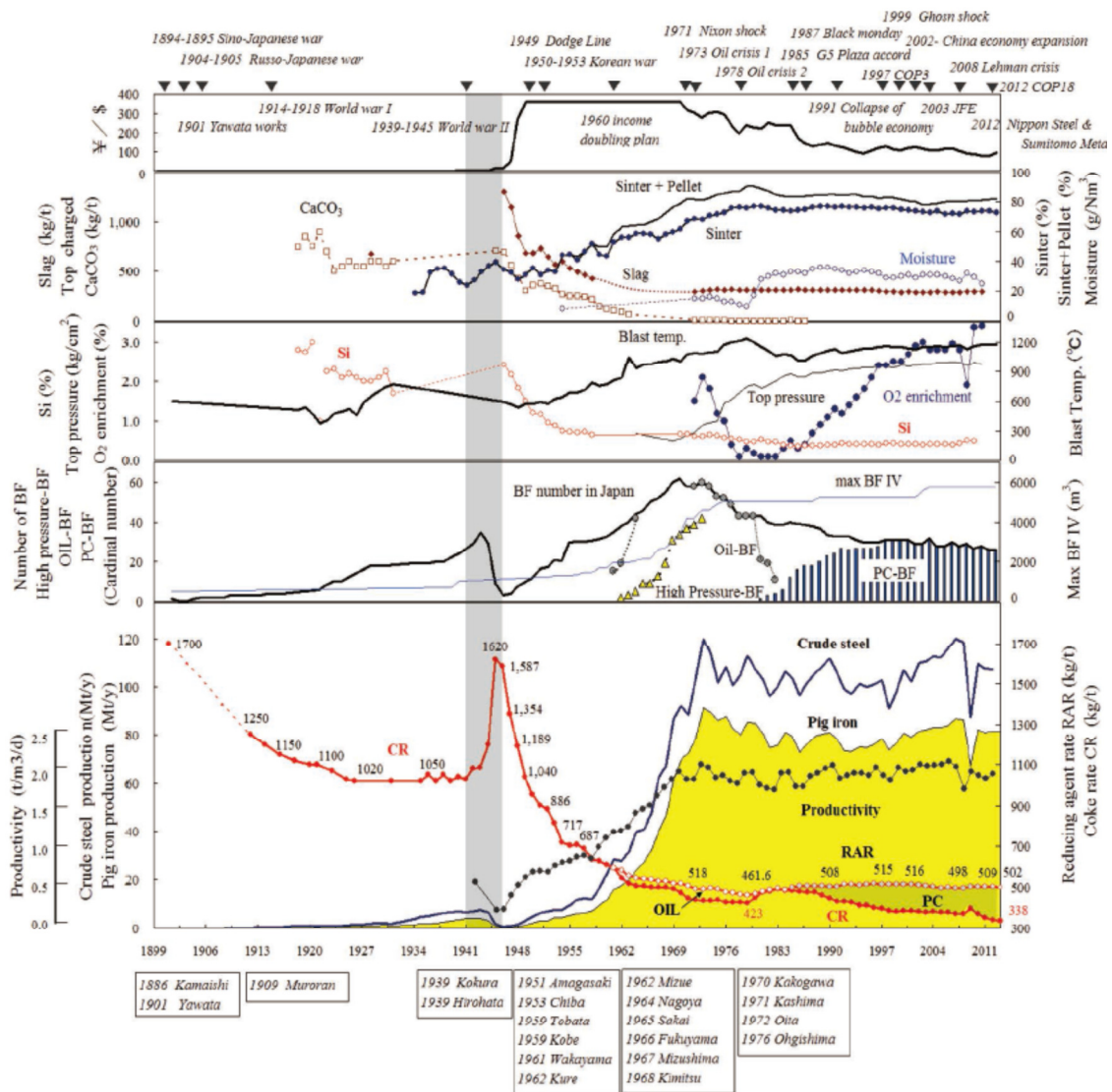


Figura 3.9 – Fases da evolução da tecnologia siderúrgica do Japão. Fonte: (NAITO et al, 2015).

Várias tecnologias foram desenvolvidas para melhorar a qualidade do sinter e sua produtividade no processo de redução, como resultado foi possível o aumento da participação de minério pisolítico, com alto teor de água combinada, que em 2000

representou 36,4% do minério importado e no caso da Nippon Steel chegar a 53%. A figura 3.10 mostra essa tendência. Em 2002, as siderúrgicas começaram a importar o minério Marra Mamba, que possui um alto teor de finos, e todas as companhias focaram seus esforços em tecnologias de aglomeração. Essas incluíram técnicas para utilização de aglomerantes orgânicos para melhorar a pelletização de minérios finos.

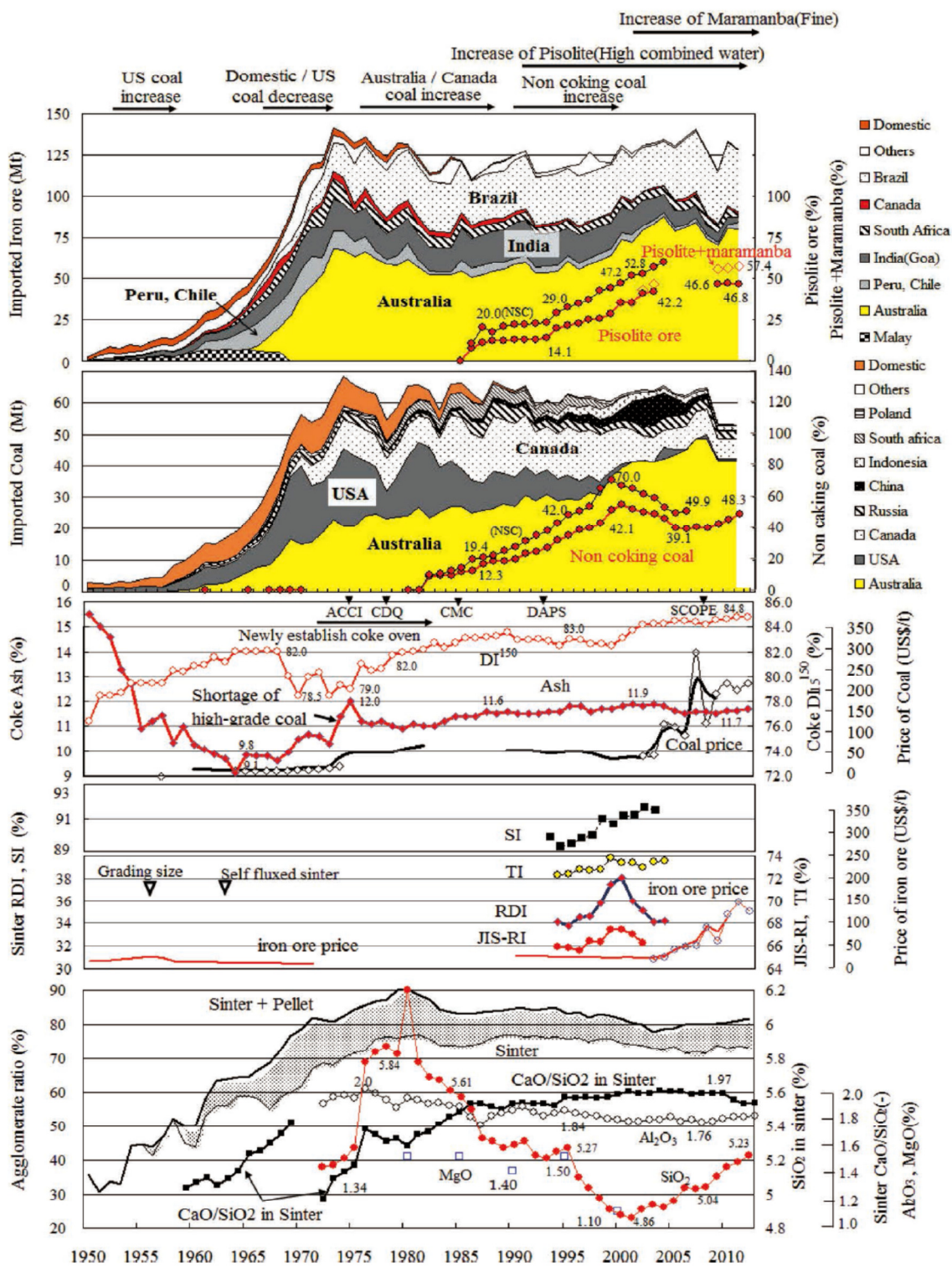


Figura 3.10 – Transição das matérias-primas importadas e da composição e qualidade da carga dos altos-fornos do Japão. Fonte: (NAITO et al, 2015).

No campo da sinterização continua havendo oportunidades de melhoria e é necessária perseverança para atingir essa meta.

Enquanto isso, devido ao rápido crescimento da demanda da siderurgia chinesa, as condições das reservas de minério de ferro têm rapidamente se tornado voláteis, tanto em termos de quantidade e qualidade e, por essa razão, é imperativo o desenvolvimento de novas metodologias de aglomeração de minérios para fazer frente à volatilidade dos preços e mudanças acentuadas na qualidade.

3.2 Processo HPS (*Hybrid Pelletized Sinter*)

NIWA et al (1993) relataram que para possibilitar a utilização de ultrafinos com baixo teor de ganga foi desenvolvido na NKK o processo HPS (*Hybrid Pelletized Sinter Process*) que foi instalado na sinterização nº5 da usina de Fukuyama, com capacidade de produção de 6Mt/ano, 550m² de grelha e produtividade de 1,38t/m².h., em novembro de 1988. A figura 3.11 abaixo mostra o fluxo do processo.

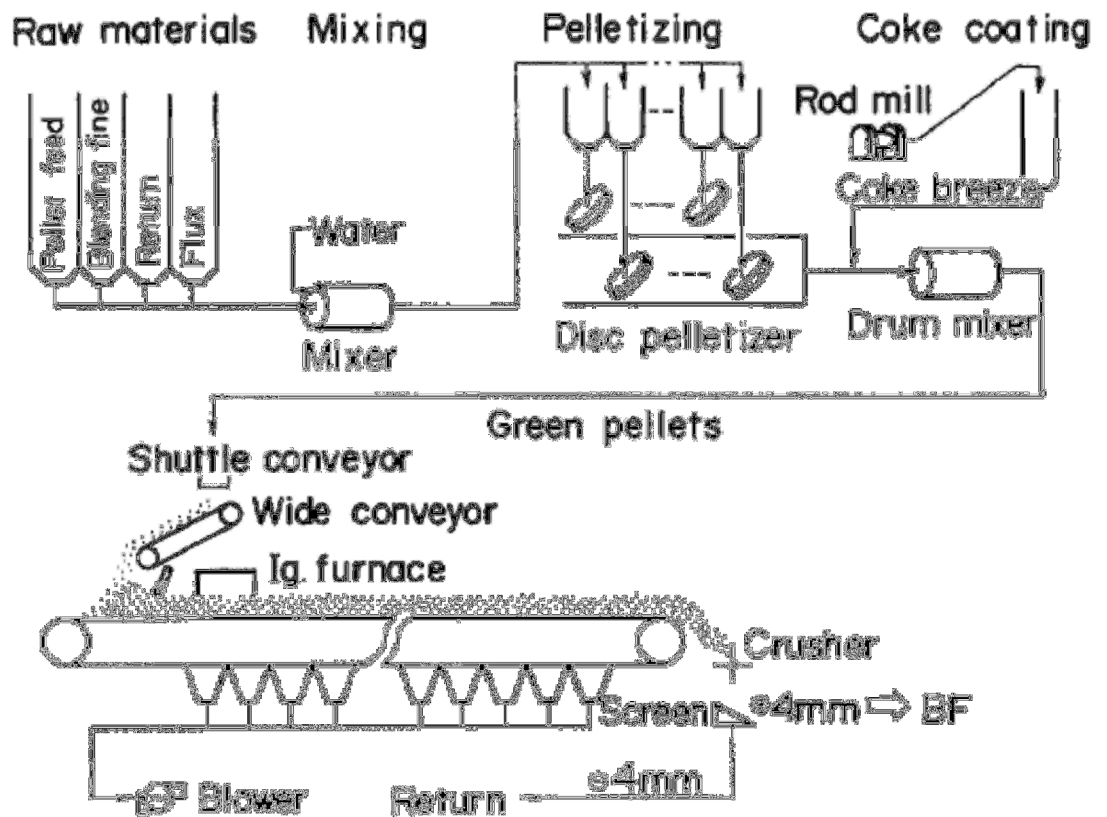


Figura 3.11 – Fluxo de processo da máquina de sinter N°5 da NKK em Fukuiama Steel Works com HPS. Fonte: (NIWA et al, 1993).

Com o HPS foi possível produzir um sinter com 4,7% de sílica e 60% de finos incluindo *pellet feed* com uma produtividade de 1,8t/m²/h. O sinter produzido tem alta redutibilidade (RI>70%) e baixa degradação após redução (RDI<40%). O alto-forno operando com grande quantidade de sinter do processo HPS apresentou diminuição no volume de escória de 18kg/t de gusa, consumo de combustível de 12,5kg/t de gusa, aumento na produtividade de gusa de 2,08t/m³/dia para 2,21t/m³/dia e na produção diária de 9.700t para 10.300t, devido ao baixo teor de ganga dos minerais e à alta redutibilidade do sinter HPS, como pode ser visto na tabela III.3.

Tabela III.3 – Comparação dos resultados operacionais do alto-forno N°5 da NKK em Fukuiama Steel Works antes e depois da utilização de sinter HPS (NIWA et al, 1993)

Items	Before use of HPS	After use of HPS
Mixing ratio (%)		
Lumpy ore	20	20
Pellet	2	2
Sinter	78	23
HPS	—	55
Hot metal (t/d)	9 700	10 300
Productivity (t/m ³ /d)	2.08	2.21
Coke ratio (kg/t)	517.5	505.0
Blast temperature (°C)	1050	1050
Moisture (g/Nm ³)	55	55
Slag ratio (kg/t)	327	309

KUROSAWA et al (1989) relataram que, na NKK, os custos de minério de ferro, calcário e cal atingem aproximadamente 80% do custo do sinter. Conseqüentemente, reduzir o custo do sinter será possível com a utilização de superfinos de minério de ferro de baixo custo. Entretanto, uma utilização excessiva de superfinos 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 Sinter*), na sua sinterização número 5 de Fukuyama, em 1988, com pré-granulados de superfinos 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 superfinos pode ser utilizada, a pré-granulação é feita em discos de pelotização e subsequentemente 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 feed*. O índice de redutibilidade baseado na norma JIS 7215 está consistentemente acima de 65%. O retorno de finos anterior de 300kg/t foi reduzido para 150kg/t a 200kg/t. O consumo de energia foi reduzido para 300.000kcal/t sinter.

NIWA et al (1990) compararam 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 foi reduzido de 44,5% para 43,5%.

Com a comprovação da superioridade do HPS, as cargas dos altos-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.

OKOCHI et al (2000) comentaram que atingiu-se 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 sínter (30% de sínter HPS e 70% de sínter convencional), 13% de pelotas e 10% de minério granulado e a nova carga 75% de sínter (100% de sínter HPS), 15% de pelotas e 10% de minério granulado. O sínter 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.

O processo HPS (*Hybrid Pelletized Sinter*) também foi discutido por SAKAI et al (2001). O processo é um misto de sinterização e pelletização, que permite a utilização de *pellet feed* em máquinas de sínter com ganhos de produtividade e qualidade. A usina da antiga Belgo Mineira de João Monlevade instalou em 2002 esse processo, que só existia em operação na usina de Fukuyama, da NKK.

O Iron Ore Manual (2003) mostra que a tecnologia *Hybrid Pelletized Sinter* (HPS) tem um custo menor que o sínter 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 pelletização 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 espessura de 1mm. Depois as pelotas são carregadas na máquina de sínter do mesmo modo que em uma máquina de pelletização. A ignição, sinterização e o tratamento do sínter 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 5mm a 10mm, a permeabilidade do leito é bem superior em comparação com a sinterização convencional e o consumo de coke breeze pode ser reduzido. Com isso, o rendimento do sínter é melhorado. A forma do sínter do HPS não exerce fatores adversos na carga de matérias-primas do alto-forno. O processo HPS fornece ao sínter uma excelente qualidade macroestrutural, 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*.

OKAZAKI et al (2006) relataram que o processo minipelota comercialmente aplicado em 1987 na Fukuyama Works da JFE na época NKK foi a tecnologia que permitiu o

aumento da utilização do minério de ferro de Marra Mamba. Esse processo aumentou a taxa de utilização de Marra Mamba na mistura de sinterização em 10% em massa continuamente na máquina de sinterização número 4 em Fukuyama Works. Em 1988 o processo HPS (*Hybrid Pelletized Sinter*) foi implantado também na máquina de sinterização número 5, possibilitando o aumento da utilização do minério de Marra Mamba em 15% em massa na mistura de sinterização.

3.3. Utilização de misturadores intensivos

PAMMER et al (2002) relataram que a produção de um sínter 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/SiO_2 da mistura para sinterização. O tamanho de grão da partícula é um parâmetro importante. Investigações mostram que o consumo de combustível da máquina de sínter e o teor de FeO do sínter aumentam quando há o aumento da proporção de partículas com tamanho de grão $< 0,1\text{mm}$ e $> 8\text{mm}$. O tamanho de grão máximo para os aditivos deve ser limitado a aproximadamente 2mm, quando os alvos são a resistência do sínter, a redutibilidade e a porosidade. Uma alta e uniforme permeabilidade permite um aumento da altura do leito da máquina de sínter com redução do consumo de combustível.

A produção de um sínter homogêneo sempre começa nos leitos de blendagem e continua nos silos de estocagem e de dosagem. Especial atenção deve ser dada ao projeto dessas instalações para prevenir a indesejável segregação de material. Para resultados ideais da proporção de insumos, o sistema de dosagem e pesagem dos silos de estocagem deve ser controlado por computador em tempo real. Devido à limitação do sistema convencional de misturadores e tambores granuladores, especialmente com respeito a uniformidade da distribuição dos aditivos e combustíveis com tamanho de grão $< 2\text{mm}$, as seguintes soluções são disponíveis:

.Sistema de pás com autolimpeza para misturadores e tambores convencionais, aplicados com sucesso na planta de sinterização da Voest Alpine Stahl em Linz/Áustria.

.Substituição dos tambores de mistura convencionais por misturadores intensivos, estado-da-arte de misturadores para a produção de uma mistura de sinterização com ótima homogeneidade e permeabilidade.

A primeira instalação do mundo foi na planta de sinterização da Voestalpine Stahl, em Donawitz/Áustria. A figura 3.12 mostra o primeiro misturador intensivo instalado em Donawitz. Como resultado, a planta de Donawitz aumentou sua produtividade em aproximadamente 10%, houve aumento da qualidade do síter em respeito à resistência e homogeneidade e diminuição do consumo de coque no alto-forno em aproximadamente 20kg/t de gusa.

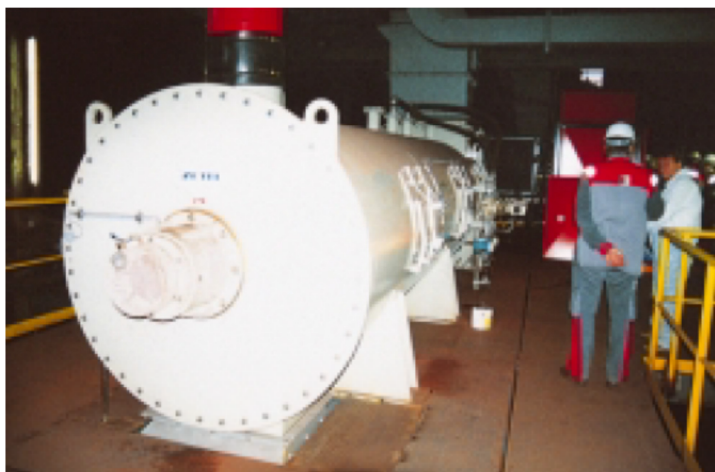


Figura 3.12 – Primeiro misturador intensivo do mundo instalado na planta de sinterização da Voestalpine Donawitz . Fonte: (PAMMER et al, 2002).

KIN e PARK (2011) relataram que, com o dramático aumento da produção de aço, as fontes de matérias-primas de alta qualidade estão se exaurindo, especialmente o *sinter feed*, que está se tornando mais fino e com a composição química com mais impurezas. Para alcançar o volume de produção de síter com alta qualidade, como requerido pelos altos-fornos, utilizam-se cada vez mais minérios finos, para tanto a tecnologia de granulação teve que ser desenvolvida. Para suportar a granulação com partículas finas, a Posco, na Coréia, em sua usina de Pohang, construiu uma unidade para granular o material fino antes de ser processado na máquina de síter, como mostrado na figura 3.13.

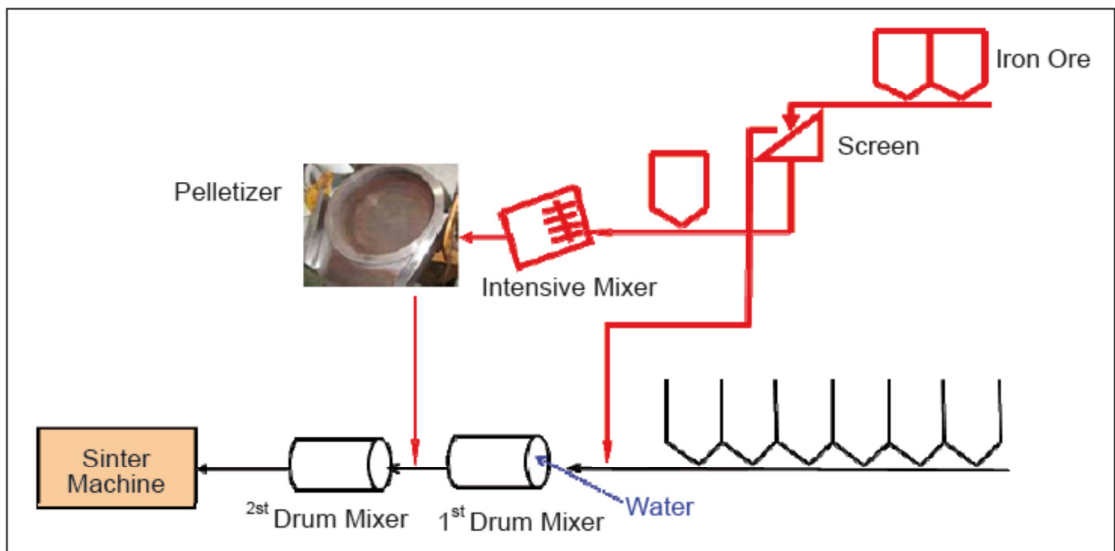


Figura 3.13 – Layout da unidade de granulação instalada na usina de Pohang, da Posco.
Fonte: (KIN e PARK, 2011).

HSEIEH (2011) realizou experimentos de sinterização, comparando a mistura e a granulação convencional com um misturador de alta intensidade conectado a um tambor. Mostrou que a granulação pode ser aumentada. Com materiais finos utilizadas na China Steel, em sua planta de Kaohsiung, foi possível aumentar a produtividade e reduzir o consumo de coque.

OYAMA et al (2009) comentaram sobre o contínuo desafio das siderúrgicas japonesas que, por questões geográficas e econômicas, não contam com o *sinter feed* de alta qualidade da América do Sul disponível para as siderurgias européia e da América do Norte. A siderurgia japonesa é forçada a desenvolver tecnologia para sinterizar cada vez mais minérios australianos, altamente hidratados, porosos e com distribuição granulométrica cada vez mais fina. Para tanto desenvolveram um processo com a utilização de misturadores de alta velocidade. Após teste em laboratório, foi montado um circuito na planta de sinterização número 4 de Fukuyama na JFE em West Japan Works, conforme mostrado na figura 3.14.

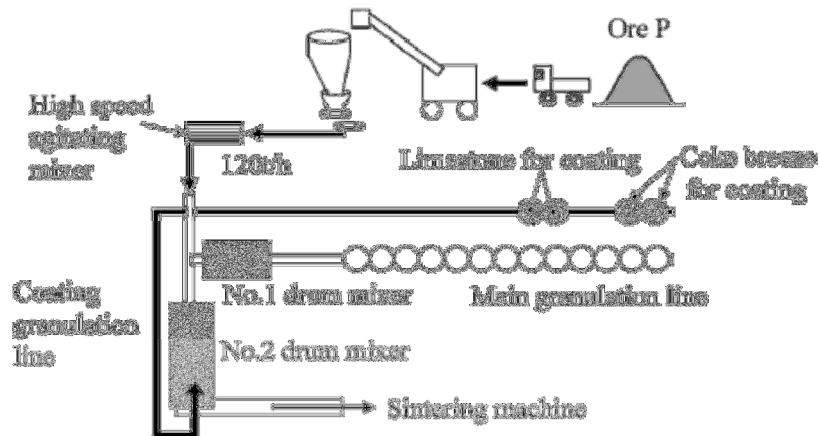


Figura 3.14 – Circuito montado na planta de sinterização N°4 em Fukuyama. Fonte: (OYAMA et al, 2009).

Os resultados operacionais foram excelentes, como o aumento da produtividade, por conta da melhoria da permeabilidade do leito, conforme mostrado na figura 3.15.

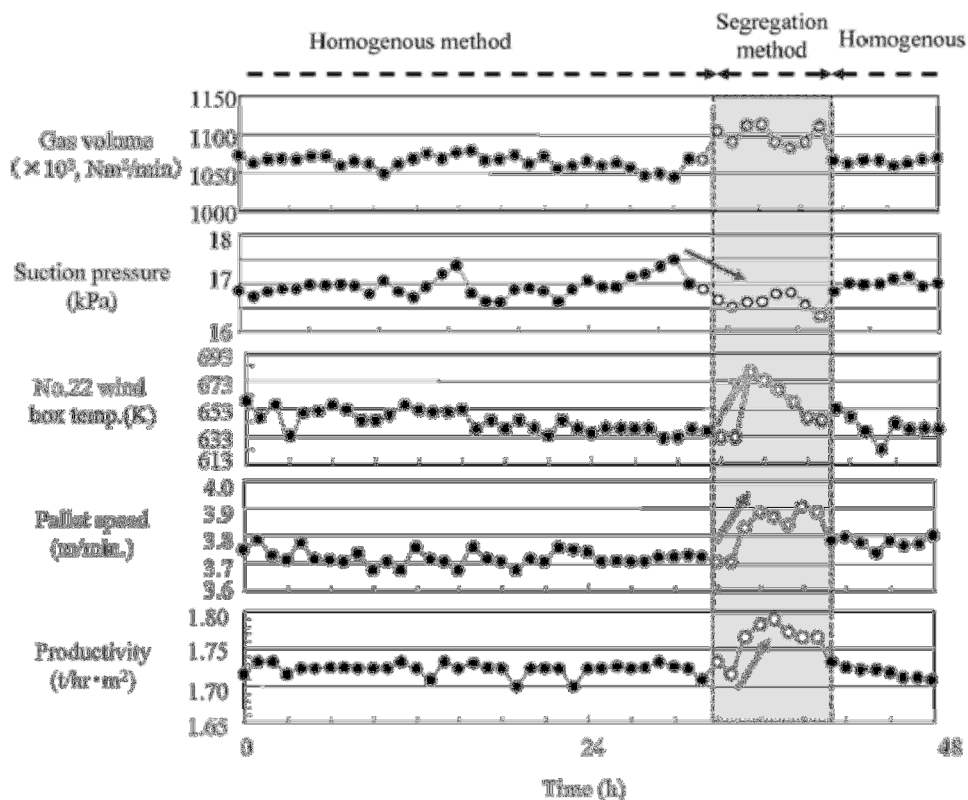


Figura 3.15 – Efeitos da granulação nos resultados operacionais na planta de sinterização N°4 em Fukuyama. Fonte: (OYAMA et al, 2009).

Ocorreu também melhoria na qualidade do sinter conforme resultados de tamboramento e redutibilidade, mostrados na figura 3.16.

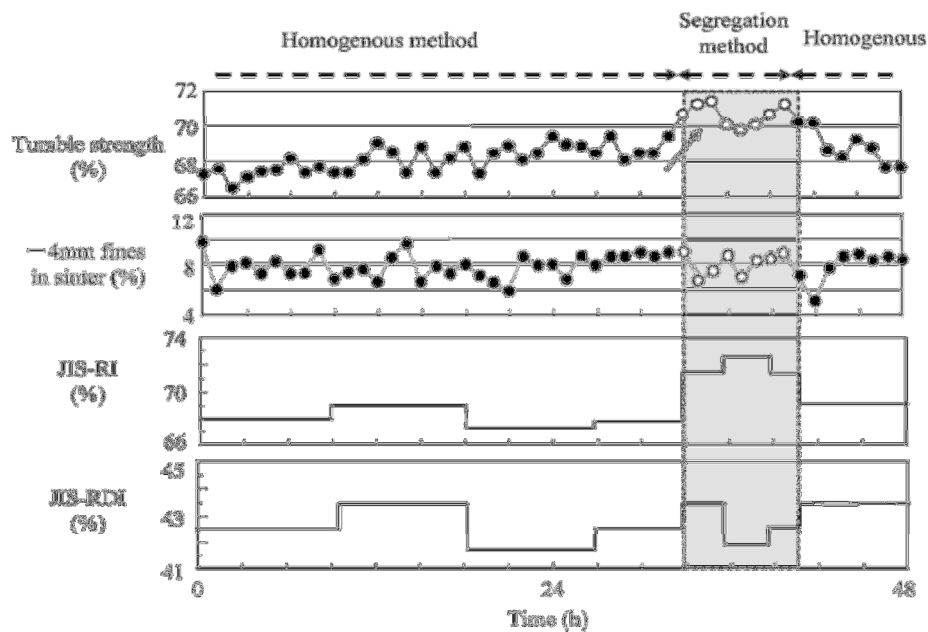


Figura 3.16 – Efeitos da granulação nos resultados de qualidade do sinter na planta de sinterização N°4 em Fukuyama. Fonte: (OYAMA et al, 2009).

MATSUMURA et al (2009) relataram que a Kobe Steel, para permitir a utilização de partículas ultrafinas de minério de ferro em seu processo de sinterização, partiu para estudar a influência da umidade na granulação e a utilização de um misturador agitador de alta velocidade seguido de tambor de mistura. Foram estudados seis tipos de minério, um australiano hematítico, um sul americano hematítico, dois australianos pisolíticos e dois australianos hidratados. Após o estudo, o processo foi projetado de maneira que o material fino é processado primeiro em um misturador agitador de alta velocidade e depois é misturado com o material mais grosso. A planta de sinterização da Kobe da usina da Kakogawa recebeu essa modificação, conforme mostra a figura 3.17.

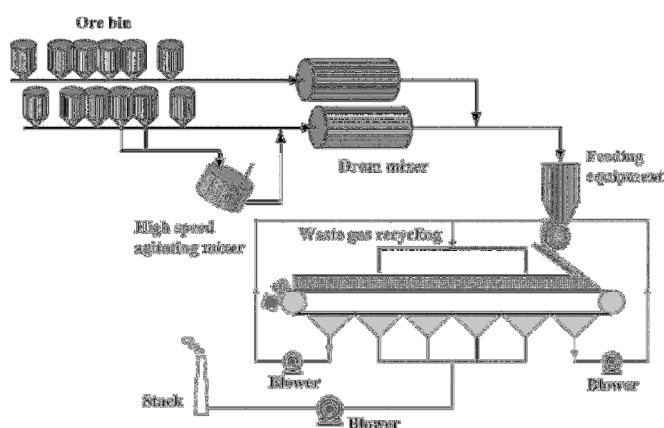


Figura 3.17 – Diagrama esquemático da planta de sinterização da Kobe em Kakogawa.
Fonte: (MATSUMURA et al, 2009).

YONGZHI e JUN (2011) relataram que na China, segundo estimativas de 2009, existiam cerca de 500 máquinas de sínter perfazendo um total de 53.800m² e uma capacidade de produção acima de 600Mt/ano. O grande desafio é de manter a produtividade das máquinas de sínter com a qualidade requerida pelos altos-fornos com o uso cada vez mais intenso de ultrafinos nas misturas de sinterização. Muito tem se investido no sentido de processar materiais finos. Seguindo essa linha, a Universidade Centro Sul desenvolveu o processo chamado “*Composite Agglomeration Process-CAP*”, que consiste em dividir a matéria-prima em dois grupos, onde a parte ultrafina é pelletizada antes de ser misturada à outra parte mais grossa. O processo foi aplicado com sucesso na máquina de sinterização de 265m² da Boutuo Iron & Steel Company desde junho de 2009, permitindo que até 35% de concentrado local seja utilizado.

YONGZHI (2015) comentou que o sínter continua sendo o maior constituinte de carga metálica dos altos-fornos na China. A proporção de sínter é de 70% na média. A produção de sínter foi de aproximadamente 800Mt em 2014. A qualidade do sínter tem sido aprimorada e os índices de sinterização foram melhoradas com alargamento das máquinas de sinterização e aplicação de várias melhorias tecnológicas. Uma delas foi a tecnologia de aumento da profundidade do leito de sinterização. A altura do leito de sinterização que normalmente atingia até 600mm foi elevado para 900mm na máquina de sinterização nº3 com 360m² da Magang Iron and Steel Co., o que proporcionou uma redução na taxa de combustível sólido de 5,84kg/t, 9,26kWh/t de consumo elétrico e

0,24kg/t no consumo de energia de ignição, quando comparado com a altura anterior do leito de 700mm.

O custo do sinter reduziu de maneira significativa com o crescente aumento na utilização de minérios mais “econômicos”. Vários métodos foram utilizados para superar os problemas causados pela utilização de minérios mais baratos, incluindo mistura intensiva, diminuindo a variação das faixas de umidade, conteúdo de carbono na mistura de sinterização e granulação em separado para minérios de ferro especiais.

NEPPER et al (2011) discutiram a utilização de finos de minério de ferro como *pellet feed* na sinterização aumentando o teor de ferro do sinter e diminuindo a quantidade de ganga, levando a uma diminuição do consumo de energia no alto-forno. O uso direto de grandes quantidades de finos na mistura de sinterização, sem nenhum pré-tratamento ou processo de modificação, pode causar uma drástica queda na produtividade devido à redução da permeabilidade do leito da máquina de sinterização. Em vários projetos nos recentes anos o material fino tinha que ser micropelotizado em um processo separado e depois adicionado ao restante da mistura a ser sinterizada. A Outotec mudou esse conceito padrão de mistura nas plantas de sinterização e trocou os tradicionais tambores de mistura e granulação por misturadores de alta intensidade, como apresentado nas figuras 3.18 e 3.19.



Figura 3.18 – Misturador intensivo. Fonte: (NEPPER et al, 2011).

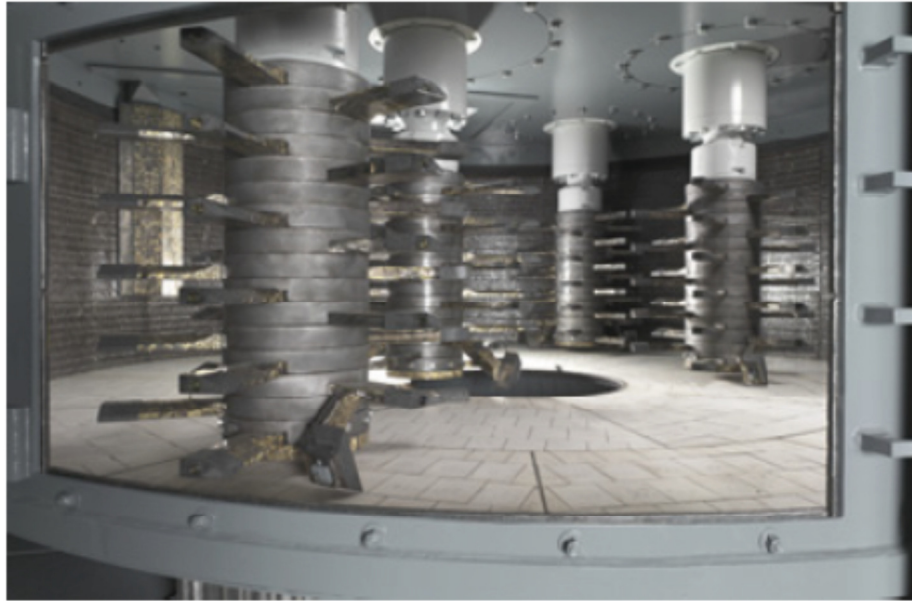


Figura 3.19 – Interior do misturador intensivo. Fonte: (NEPPER et al, 2011).

Para chegar a essa solução, a Outotec realizou um extenso programa de testes para a utilização de *pellet feed* no processo de sinterização. Os testes sugeriram a utilização de misturador de alta intensidade e granulador combinados com melhorias no lay-out da planta de sinterização, como apresentado na figura 3.20.

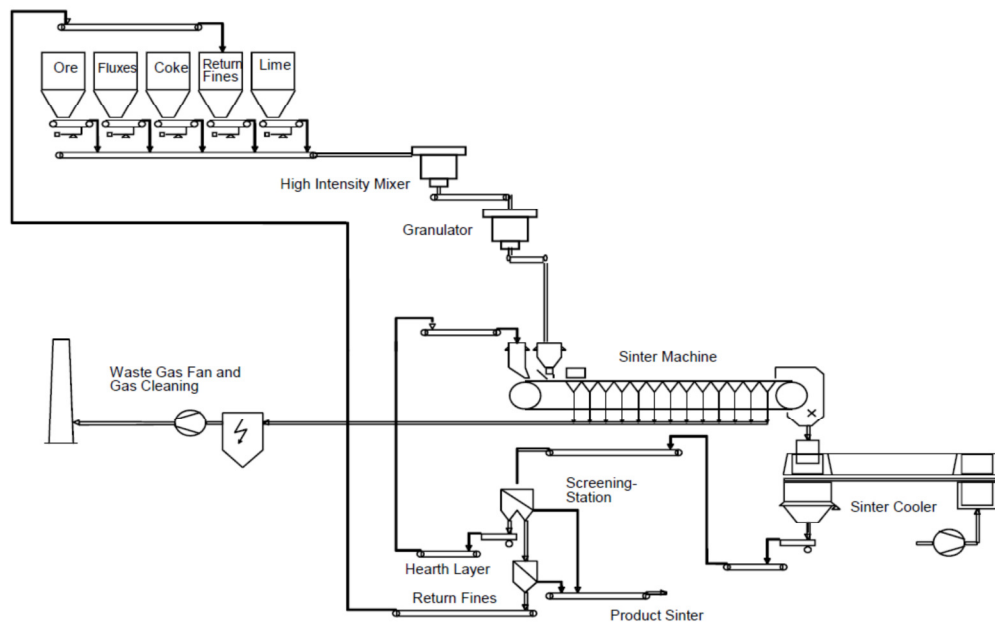


Figura 3.20 - Layout da planta de sinterização com misturadores intensivos. Fonte: (NEPPER et al, 2011).

Outro aspecto que deve ser levado em consideração é o cuidado no transporte e na alimentação do material granulado até a máquina. É possível se produzir sinter com alta participação de finos de minério sem perda de produtividade e qualidade. Para cada tipo de minério de ferro devem-se ajustar os parâmetros granulométricos do combustível sólido. O *sinter feed* convencional testado apresentou $d_{50}=1.2$ a 2.5mm e o *sinter feed* fino $d_{50}=150\mu\text{m}$. A distribuição granulométrica é apresentada na figura 3.21. O tempo de retenção no misturador é de aproximadamente um minuto e cerca de 80 a 90 % da água requerida no processo é adicionada nesse ponto. A primeira planta projetada pela Outotec com essa configuração entrou em operação em 2010.

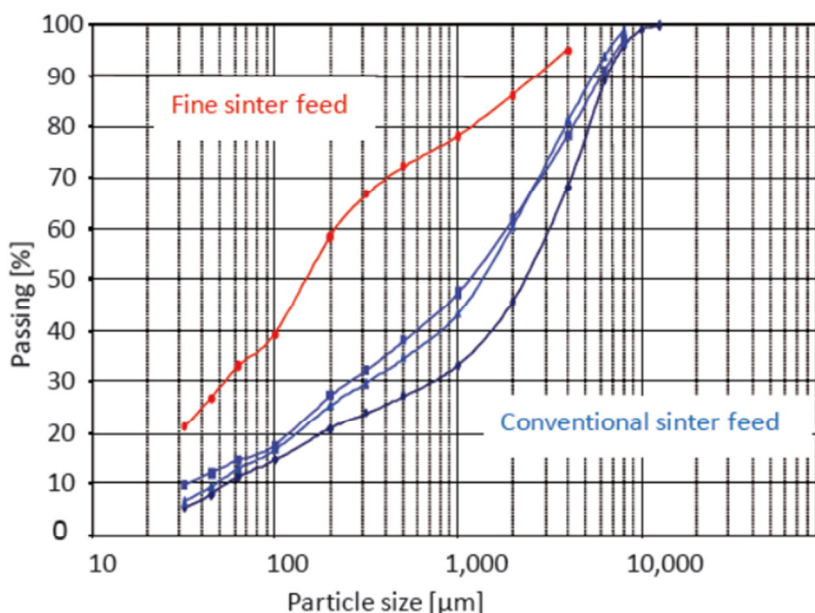


Figura 3.21 - Distribuição granulométrica dos materiais. Fonte: (NEPPER et al, 2011).

BURCHART-KOROL et al (2012) relataram que o conceito de mistura e granulação com misturador intensivo é a nova solução para a preparação de misturas de sinterização. De acordo com esse novo conceito para preparação dos materiais da mistura, um só equipamento é utilizado para garantir a total homogeneização e granulação dos componentes da mistura a ser sinterizada em um único processo. Examinando a literatura há indicações de várias plantas de sinterização no Japão, Alemanha e Áustria que conduzem pesquisas na tecnologia de preparação de mistura aplicando novos métodos de mistura e granulação utilizando misturadores intensivos.

Pesquisa conduzida no Japão confirma também que a mistura e a granulação influenciam na permeabilidade e na produtividade do processo de sinterização de minério de ferro. Na planta de sinterização de Kokura, da Sumitomo Metal Industry, vários conceitos de mistura foram comparados e os melhores resultados dessa pesquisa foram alcançados quando foram aplicados misturadores intensivos.

Segundo REIDESCHLAEGGER et al (2013), uma das tendências globais é o constante desafio dos produtores de aço em relação ao empobrecimento dos minérios de ferro. Os minérios de ferro produzidos diretamente das minas não possuem mais a mesma pureza do passado, em especial a sílica que requer processamento posterior para ser removida. Com isso, uma grande quantidade de minério de ferro deverá ser processada e concentrada resultando em uma quantidade significativa de *pellet feed* disponível no mercado. Entretanto, as sinterizações da maioria das siderúrgicas não estão preparadas para aglomerar minérios de ferro com proporções crescentes de finos, o que causa uma preocupação aos operadores quanto ao impacto desses ultrafinos na mistura de sinterização. Após anos de desenvolvimento e com várias referências de operação industrial, a Siemens VAI trouxe para o mercado o *Intensive Mixing and Granulation System* (IMGS), o qual é capaz de processar de maneira eficiente *pellet feed* nas plantas de sinterização. O IMGS compreende um sistema de silos dosadores, uma unidade de mistura intensiva, um granulador ou um tambor granulador convencional. Um possível fluxo de processo é mostrado na figura 3.22. Diferentes matérias-primas são estocadas separadamente em silos e são dosadas com precisão em uma correia transportadora em camadas. Modificações na composição química do sinter produzido são facilmente feitas por ajuste automático da dosagem das matérias-primas de acordo com a composição desejada para o sinter. A matéria-prima é extraída dos silos de dosagem e transferida para o misturador intensivo onde ela é completamente homogeneizada. Após a saída do misturador intensivo, ela é transportada para o granulador onde é granulada de acordo com os requerimentos de permeabilidade antes de ser carregada na máquina de sinterização.

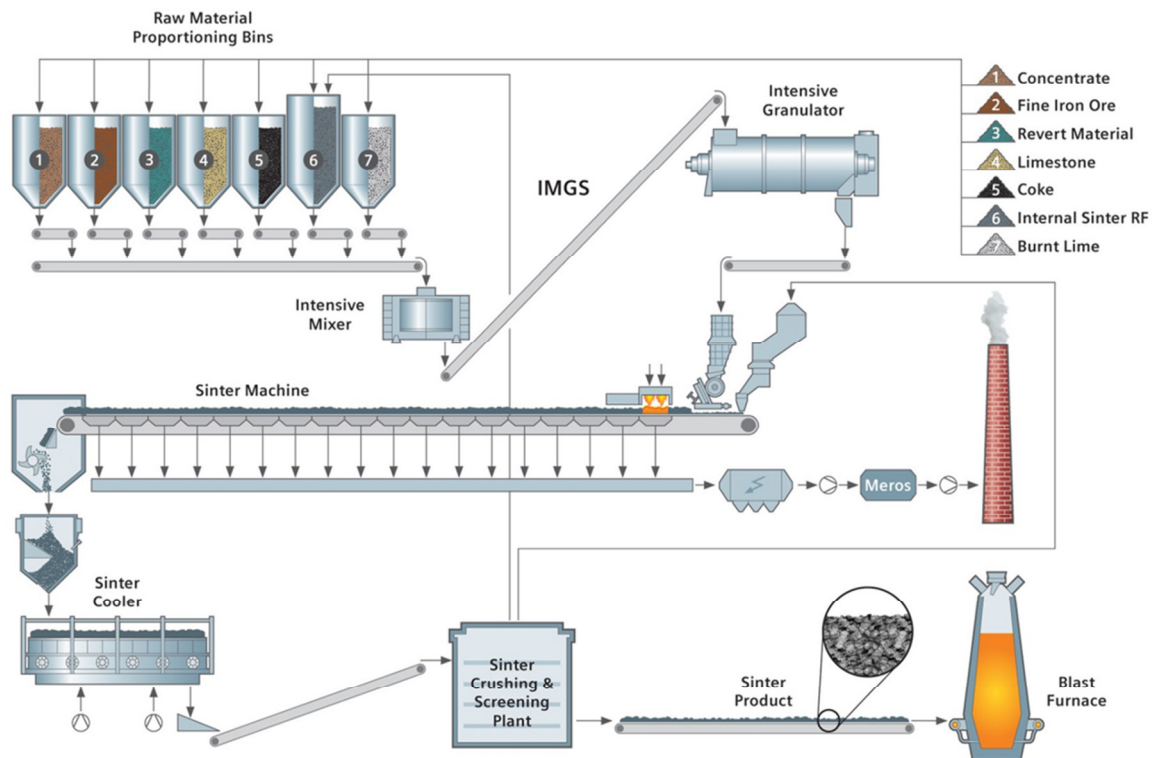


Figura 3.22 - Fluxo de processo com mistura intensiva e sistema de granulação com misturador intensivo e granulador horizontal. Fonte: (REIDESCHLAEGGER et al, 2013).

Exaustivas investigações foram realizadas utilizando diferentes arranjos e tipos de equipamentos de mistura e granulação. Uma grande gama de minérios de ferro com diferentes distribuições granulométricas, inclusive até 100% de *pellet feed*, foram sistematicamente testados. Depois das etapas de mistura e granulação, o material foi sinterizado em uma planta piloto para avaliar seu desempenho no processo de sinterização. O foco das investigações na etapa de mistura foi obter elevada homogeneidade da mistura a ser sinterizada, enquanto o principal desafio no passo de granulação era maximizar a permeabilidade da mistura a ser sinterizada. Materiais grossos e ultrafinos foram comparados. Foi constatado que uma alta homogeneidade pode ser alcançada com um misturador intensivo em comparação a um misturador de tambor convencional. Adicionalmente, um resultado superior de homogeneidade é alcançado com um curto tempo de residência utilizando-se o misturador intensivo. A figura 3.23 mostra que a alta homogeneidade, que significa baixo coeficiente de variação, é alcançada muito cedo pelo misturador intensivo em comparação com o misturador a tambor convencional. O misturador intensivo introduz alta energia com

suas ferramentas de mistura diretamente nas matérias-primas a serem misturadas, alcançando uma perfeita distribuição de todas as matérias-primas da mistura a ser sinterizada e promovendo um íntimo contato entre o minério de ferro e os agentes fluxantes.

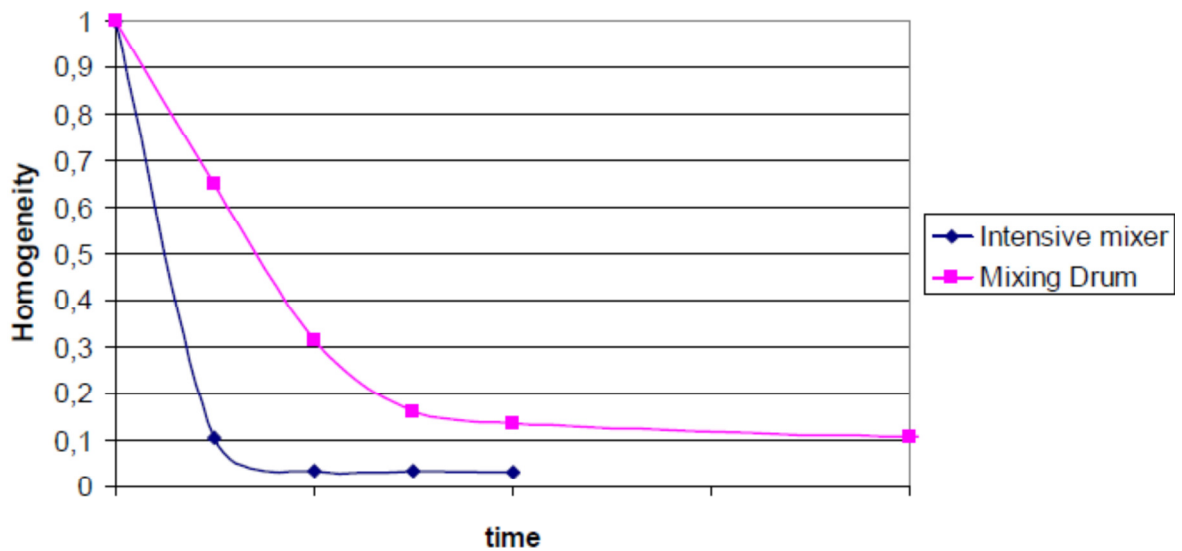


Figura 3.23 - Diferença de homogeneidade durante o tempo entre o misturador intensivo e o misturador de tambor convencional. Fonte: (REIDESCHLAEGER et al, 2013).

A figura 3.24 mostra a intensidade do movimento das matérias-primas no interior do misturador intensivo.



Figura 3.24 - Intensidade do movimento das matérias primas no interior do misturador intensivo. Fonte: (REIDESCHLAEGER et al, 2013).

A figura 3.25 mostra o princípio de funcionamento do misturador intensivo. O misturador de tambor convencional utiliza somente a força da gravidade para a

distribuição e mistura das matérias-primas, o que resulta em uma baixa eficiência de mistura. Portanto, a homogeneidade da mistura é substancialmente maior quando se utiliza o misturador intensivo.

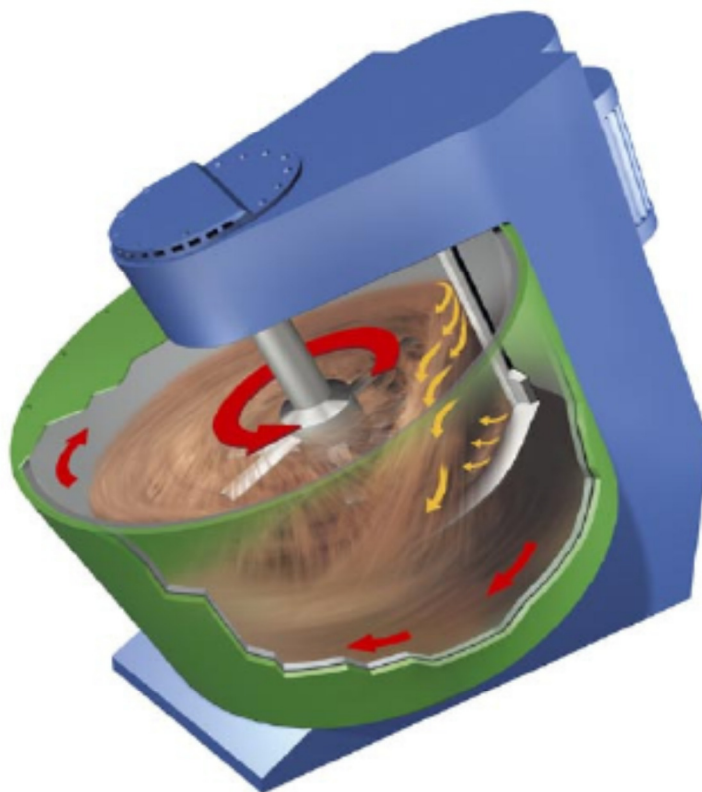


Figura 3.25 - Princípio de funcionamento do misturador intensivo. Fonte: (REIDESCHLAEGER et al, 2013).

Diferentes misturas de material foram investigadas na etapa de granulação. Isso foi determinante para um controle cuidadoso para as adições de água na mistura de materiais e, em particular, na porção de água injetada dentro do misturador e granulador que é decisiva para uma perfeita granulação e para garantir um elevado grau de permeabilidade. O alvo a ser atingido nos testes de granulação é obter boa permeabilidade com a menor quantidade possível de água. Quando elevadas proporções de minério de ferro fino são utilizadas na mistura a ser sinterizada, a quantidade de cal virgem adicionada na mistura a ser sinterizada aumenta conseqüentemente.

A granulação em um granulador intensivo oferece um número de vantagens quando comparada com um granulador de tambor convencional. Por exemplo, grandes quantidades de materiais ultrafinos podem ser processadas sem efeitos adversos no

processo de granulação. A autolimpeza das paredes internas do granulador intensivo é convenientemente efetuada pela rotação dos braços. A figura 3.26 mostra o interior de um granulador intensivo. Adicionalmente, a velocidade de rotação das ferramentas de granulação pode ser ajustada no granulador intensivo, ao contrário do tambor granulador convencional que tem somente o controle da velocidade de rotação. O tempo de residência e o comportamento da granulação são ajustados pelo nível de carga do equipamento.

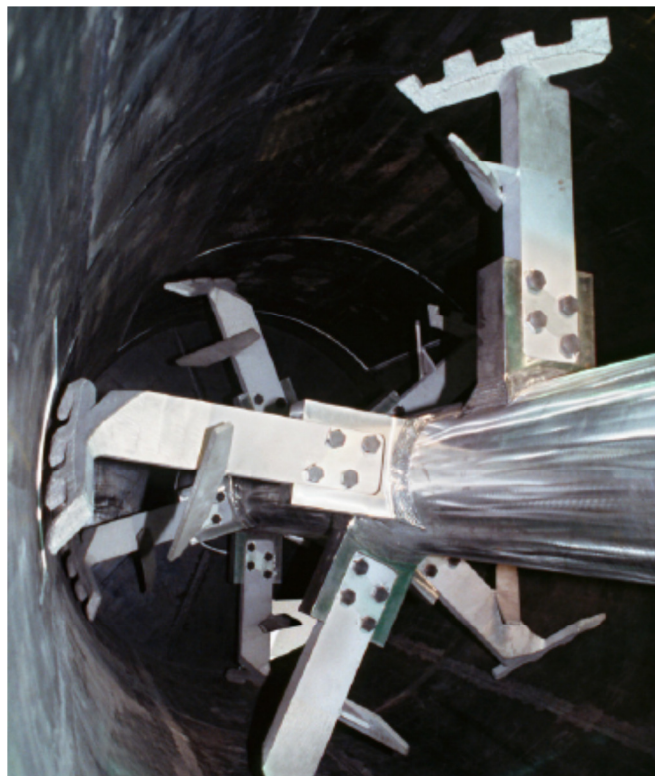


Figura 3.26 - Interior de um granulador intensivo. Fonte: (REIDESCHLAEGGER et al, 2013).

Diferentes distribuições de tamanho de grão de misturas de sinterização utilizando diferentes equipamentos de granulação são mostradas na figura 3.27.

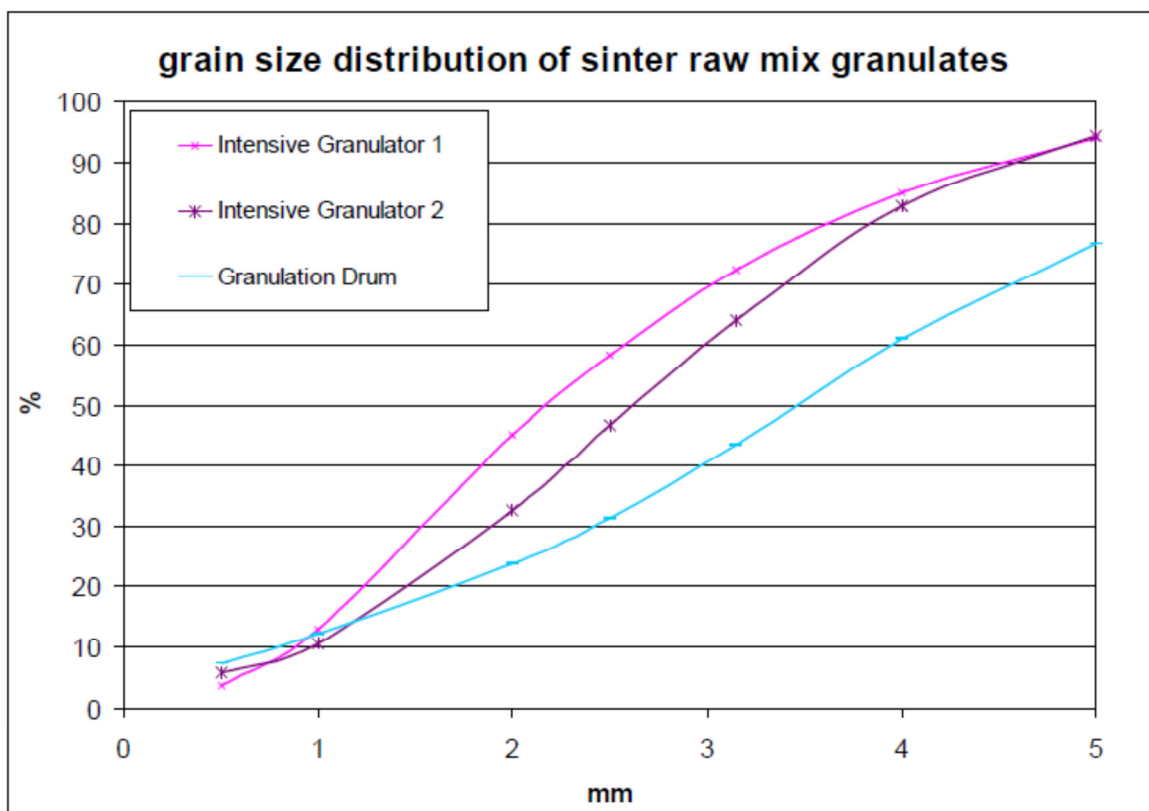


Figura 3.27 - Curvas de distribuição granulométrica (% passante acumulada), com a utilização de granulador convencional e intensivo. Fonte: (REIDESCHLAEGER et al, 2013).

Testes de permeabilidade a frio foram realizados, utilizando-se um equipamento especial com quantidades definidas de misturas a serem sinterizadas, que foram submetidas a diferencial de pressão para certa altura de material. A figura 3.28 ilustra um desenho esquemático do aparato de medição de permeabilidade. Os resultados foram mensurados, comparados e analisados, utilizando-se um sistema computacional on line. Foi possível observar uma relação direta entre o comportamento na granulação, permeabilidade e a produtividade da máquina de sinterização. Foi possível ainda mostrar que uma excelente permeabilidade pode ser alcançada tanto para materiais grossos quanto para ultrafinos quando se utiliza uma unidade granuladora.

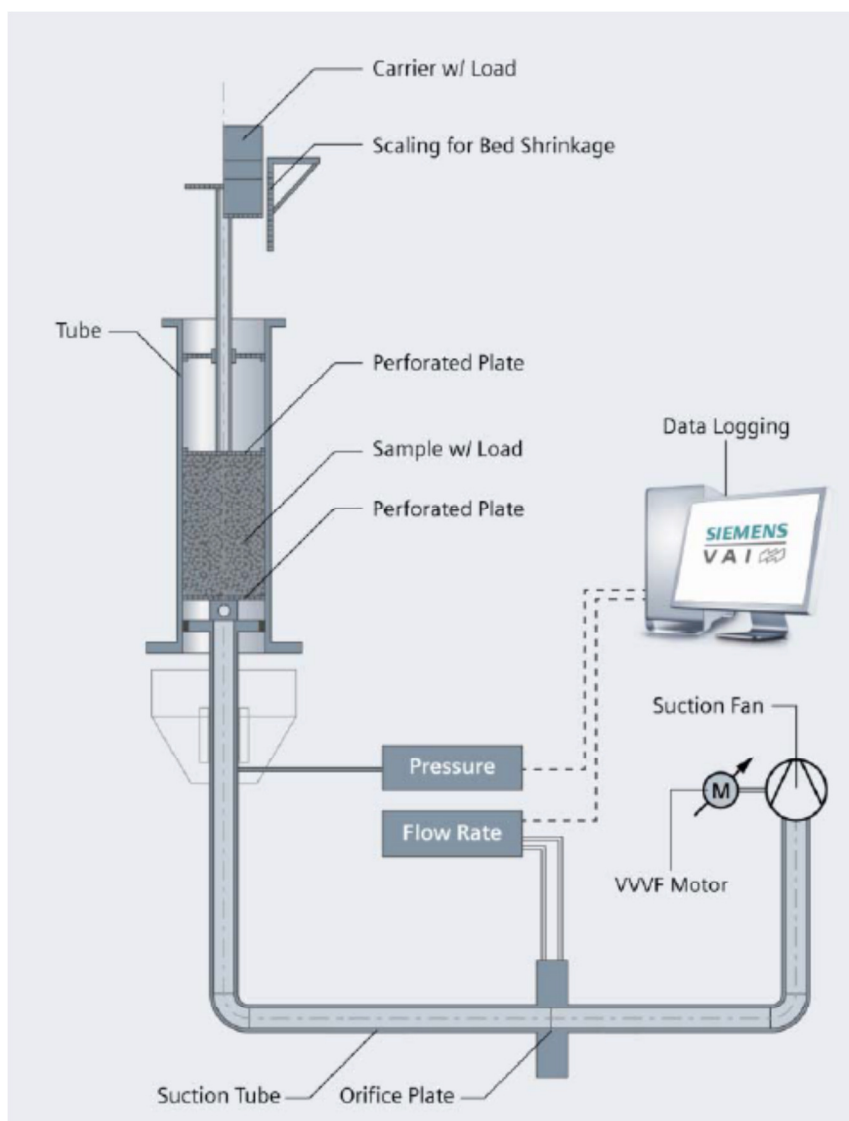


Figura 3.28 - Desenho esquemático do aparato de medição de permeabilidade. Fonte: (REIDESCHLAEGGER et al, 2013).

Testes piloto de sinterização foram realizados com diferentes misturas de material grosso e material ultrafino chegando a 100% de *pellet feed* na mistura a ser sinterizada. Foram utilizadas diferentes combinações de equipamentos nas etapas de mistura e granulação. Foi demonstrado que com várias combinações com misturadores intensivos e granuladores foi possível produzir sinter com alta qualidade e produtividade utilizando-se até 80% de *pellet feed* na mistura de sinterização. Também foi possível produzir sinter com 100% de *pellet feed*, mas com baixo nível de produtividade. Todos esses resultados dependem muito da característica própria de cada minério de ferro.

A primeira instalação a usar mistura e granulação intensiva foi a planta de sinterização da Voestalpine Stahl Donawitz, na Áustria, em 1998. A tabela III.4 mostra instalações de sinterização em funcionamento e em implantação.

Tabela III.4 – Instalações com misturadores e granuladores intensivos. Fonte: (REIDESCHLAEGER et al, 2013)

Instalação	Área de sinterização	Configuração	Utilização de ultrafino
Voestalpine Stahl Donawitz GmbH, Austria:1998	120m ²	Misturador e granulador intensivos integrados.	Não
Dragon Steel Corporation, Sinterização n ^o 1, Taiwan:2009	248m ²	Misturador intensivo e tambor granulador	Sim
Usiminas S/A, Ipatinga, Sinterizações n ^o 1 e 2, Brasil:2011	90 e 180m ²	Misturador intensivo e tambor granulador	Sim
Usiminas S/A, Cubatão, Sinterizações n ^o 3, Brasil:2012	268m ²	Misturador intensivo e tambor granulador	Sim
Dragon Steel Corporation, Sinterização n ^o 2, Taiwan:2012	387m ²	Misturador intensivo e tambor granulador	Sim
National Mineral Development Corporation(NMDC)Lda.,India;Previsão:2014	460m ²	Misturador intensivo e granulador intensivo	Não
Jindal Steel & Power Limited (JSPL), India;Previsão:2014	490m ²	Misturador intensivo e granulador intensivo	Sim

Os principais benefícios em se adotar a mistura e a granulação intensiva são: (i) não há necessidade de pátios de homogeneização de matérias-primas nem da utilização de silos de mistura; (ii) aumento de flexibilidade na escolha de matérias-primas; (iii) aumento da homogeneidade da mistura a ser sinterizada; (iv) redução do consumo de combustível sólido, devido a melhor distribuição do componente energético na mistura; (v) excelentes resultados de sinterização mesmo com alta participação de ultrafinos na mistura; (vi) granulação com aumento da permeabilidade do leito; (vii) reutilização

econômica de lamas, pós, carepa e outros materiais oriundos do processo de fabricação do aço; (viii) redução do consumo de energia elétrica, mesmo trabalhando com altura do leito alta e produção de sinter de qualidade estável, proporcionando alto desempenho de operação dos altos-fornos.

A proposta de utilização da tecnologia de mistura intensiva e granulação é aumentar a eficiência econômica e ambiental do processo de sinterização. A nova tecnologia de preparação da mistura a ser sinterizada permite evitar a utilização de pátios de estocagem e blendagem para os componentes da mistura e aumentar o grau de homogeneidade e a permeabilidade da mistura de sinterização, assim como a eficiência do processo. A aplicação do misturador também permite o decréscimo do consumo de energia e do combustível, assim como a diminuição do custo de produção com a mistura de sinterização. O misturador intensivo também pode ser utilizado na preparação de material reciclado da indústria de ferro e aço.

Segundo SILVA e HONORATO (2013), com a redução dos principais corpos de hematita, os itabiritos ganham espaço nas operações de lavra das mineradoras. Com isso a qualidade química (teor de sílica) do *sinter feed* é afetada drasticamente de maneira negativa. Logo, as siderúrgicas são obrigadas a consumir esse minério e absorver as elevações de custo de produção. No caso das mineradoras se torna um caso paradoxal, já que para melhorar a composição química do minério é necessária a redução de sua granulometria, visto que a liberação do quartzo da partícula de hematita no itabirito ocorre numa faixa granulométrica menor que a do *sinter feed*.

A piora da qualidade química dos minérios de ferro pode ser evidenciada na figura 3.29, que mostra a evolução do teor de sílica no sinter da USIMINAS, Usina de Ipatinga, nos últimos anos.

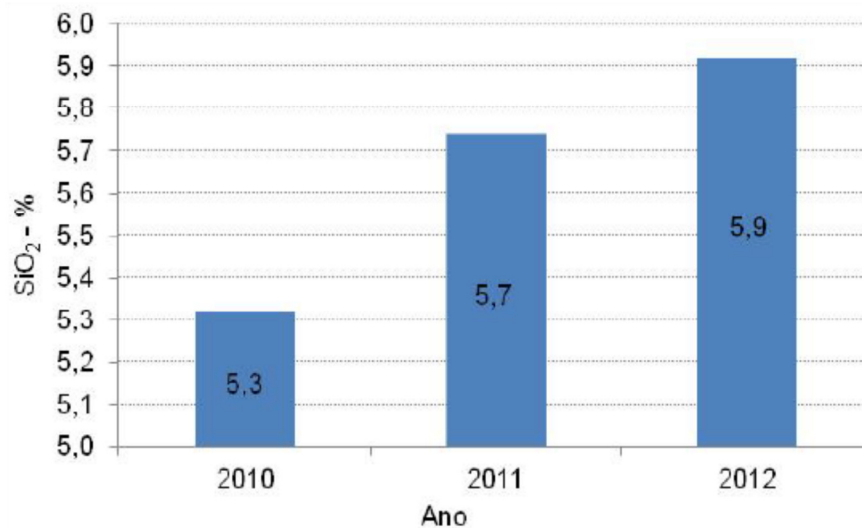


Figura 3.29 – Comportamento da sílica no sinter da Usiminas – Usina de Ipatinga.

Fonte: (SILVA e HONORATO, 2013).

Para reduzir o efeito da menor granulometria do minério no sinter foi introduzido o misturador intensivo na sinterização da Usiminas – Usinas de Ipatinga e Cubatão. Na figura 3.30 é mostrado o novo layout da Planta de Sinterização 1 e 2 da Usiminas, Usina de Ipatinga, com a adição do misturador intensivo.

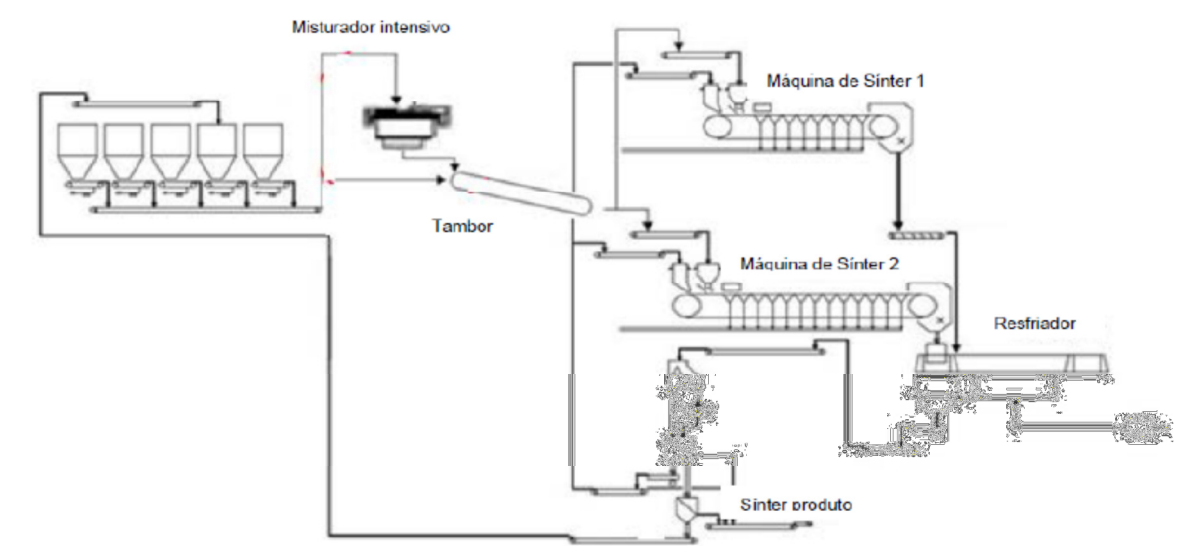


Figura 3.30 – Layout da Sinterização 1 e 2 da Usiminas – Usina de Ipatinga. Fonte: (SILVA e HONORATO, 2013).

O misturador intensivo foi colocado em operação em dezembro de 2011 e desde então não foi possível usar *pellet feed* adequado ao processo devido a sua indisponibilidade no mercado e na Mineração Usiminas (MUSA). Devido a essa condição, tem sido usado o minério de ferro do tipo *pellet coarse*, caracterizado como um produto intermediário entre o *sinter feed* e o *pellet feed*.

Testes de sinterização com diversos tipos de *pellet feed* e similares foram conduzidos em escala piloto no Centro de Tecnologia da Usiminas, visando avaliar o seu comportamento no processo de sinterização, considerando o misturador intensivo.

São apresentados dois casos. No primeiro caso é mostrado o comportamento de uma mistura com concentrado em relação à mistura com *pellet coarse* (Caso A). No segundo caso é mostrado o comportamento de duas misturas com *pellet feed* em relação à mistura com *pellet coarse* (Caso B).

O processo foi iniciado pela homogeneização da mistura no misturador intensivo, com posterior aglomeração no tambor e, finalmente, carregamento na panela piloto de sinterização. A tabela III.5 mostra as características da panela e parâmetros do processo.

Tabela III.5 - Características da panela e parâmetros do processo

Parâmetros	Caso A	Caso B
Altura da camada	500 mm	
Diâmetro da panela	300 mm	
Relação ar/COG (<i>Coke Oven Gas</i>)	5,2	
Altura do <i>bedding</i>	30 mm	
Massa do <i>bedding</i>	3 kg	
Tempo de ignição	1 min	
Depressão durante ignição	600 mmH ₂ O	
Depressão durante a queima	1600 mmH ₂ O	1100 mmH ₂ O
Tempo de residência (misturador intensivo)	1,4 min	1,0 min
Rotação do agitador (misturador intensivo)	180 RPM	390 RPM
Diâmetro do agitador (misturador intensivo)	350 mm	350 mm
Velocidade tangencial na ponta do agitador (misturador intensivo)	3,3 m/s	7,2 m/s
Tempo de residência (tambor)	8 min	8 min
Rotação do tambor	14 RPM	14 RPM
Adição da água	100% no misturador intensivo	80% no misturador intensivo e 20% no tambor
Umidade ótima	8,0%*	8,0%, 7,5% e 6,5%**

*(misturas A-I e A-II); **(misturas B-I, B-II e B-III, respectivamente).

Em termos de processo de sinterização, a substituição do *pellet coarse* por *pellet feed* elevou consideravelmente a produtividade, por outro lado houve redução do rendimento do sinter e da resistência mecânica, condição comum para sinterizações que buscam melhores produtividades.

O uso de minério de ferro fino, *pellet feed*, na sinterização será uma vertente nos próximos anos para a siderurgia mundial, exigindo alterações dos parâmetros de processo e inovação tecnológica para recuperar ou minimizar perda produtiva na sinterização.

A combinação da mistura intensiva com a adição de *pellet feed* na sinterização é uma das formas para se evitar perda de produtividade e elevação de *slag rate* nos altos-fornos, entretanto a resistência mecânica do sinter deverá ser menor que a do sinter produzido na forma convencional, exigindo esforços de pesquisa e desenvolvimento para melhoria do processo. Além disso, adequações dos sistemas de manuseio para movimentar o *pellet feed* desde a mina até as sinterizações serão necessárias.

KAMIJO et al (2013) comentaram que com o aumento da quantidade de minérios finos, como Marra Mamba da Austrália ou concentrados ultra finos do Brasil, na matéria-prima para o processo de sinterização houve uma diminuição da permeabilidade do leito de sinterização e do rendimento do sinter. O colapso dos vazios no leito de sinterização vai causar esse problema mesmo que o leito de sinterização seja composto de uma estrutura porosa. A técnica de pré-aglomeração foi desenvolvida e aplicada para esses tipos de minério fino. Recentemente, o controle da estrutura do leito incluindo o fator de empacotamento das partes tem sido discutido. Esse novo conceito foi chamado de MEBIOS (*Mosaic Embedding Iron Ore Sintering*). Para implantar essa técnica, a granulação de partículas grandes e densas utilizando o *sinter feed* usual ou minério concentrado se faz necessária. Para tanto, simulações matemáticas e testes de granulação com o minério Marra Mamba utilizando um disco pelletizador foram realizados. As influências do tamanho do disco pelletizador e do tempo de residência na granulação foram estudados. Após isso, essa técnica foi aplicada na prática na planta de sinterização nº5 da usina de Wakayama Steel Works da Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation.

Uma vista esquemática da estrutura do leito de sinterização da tecnologia MEBIOS é mostrada na figura 3.31. O propósito da tecnologia é de produzir um leito denso e com alta permeabilidade colocando partes densas e frouxas em uma mesma parte do leito. Por exemplo, pelotas cruas densas com diâmetro entre 5 a 15mm são colocadas no leito para criar partes de baixa densidade no entorno das pelotas cruas, criando um efeito parede, aumentando a permeabilidade do leito. Com o objetivo de granular as pelotas cruas, a seleção do equipamento de granulação e de seus parâmetros de operação são muito importantes.

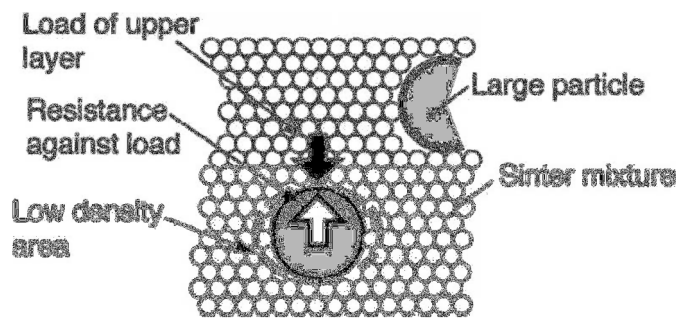


Figura 3.31 – Estrutura do leito com aplicação da tecnologia MEBIOS. Fonte: (KAMIJO et al, 2013).

Várias configurações foram testadas de acordo com os materiais a serem processados. O sistema de granulação separada “*P-type*” foi desenvolvido para personificar o conceito MEBIOS. A comparação do sistema de granulação separada “*P-type*” com o sistema convencional é ilustrada na figura 3.32. No sistema de granulação separada, a matéria-prima é dividida em dois grupos. A matéria-prima, que tem maior dificuldade de ser granulada que as outras devido a granulometria mais fina, por exemplo, é misturada com água em um misturador intensivo e depois granulada em um tambor granulador convencional em um sistema de granulação separada. Esse sistema foi denominado “*D-type*”. No caso do sistema “*P-type*” em vez de se utilizar o tambor granulador são utilizados discos de pelotização para aglomerar a matéria-prima de difícil aglomeração. As outras matérias-primas são aglomeradas em tambores misturadores. Depois ambas são misturadas e carregadas na máquina de sínter.

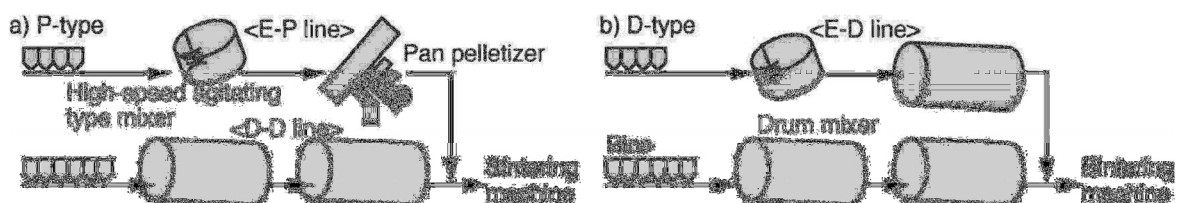


Figura 3.32 – Comparação dos sistemas de granulação. Fonte: (KAMIJO et al, 2013).

Com o objetivo de aumentar a produtividade de sinterização, uma nova linha com um reforço na etapa de granulação foi construída na planta de sinterização nº5 de Wakayama, onde o processo de granulação “*P-type*” foi instalado. A construção foi finalizada em 2009, e a planta entrou em operação comercial. Uma vista esquemática da planta de sinterização nº5 de Wakayama é apresentada na figura 3.33.

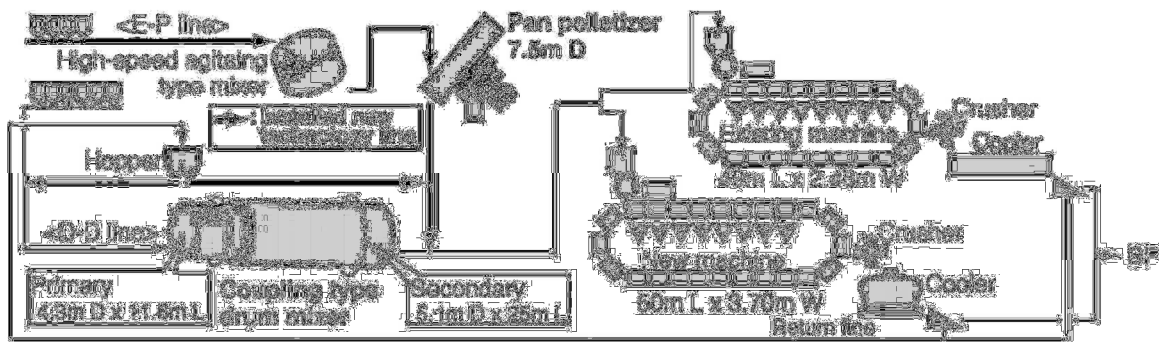


Figura 3-33 - Vista esquemática da planta de sinterização nº5 de Wakayama. Fonte: (KAMIJO et al, 2013).

Uma comparação entre a média das sinterizações japonesas em 2011 e a sinterização nº5 de Wakayama mostrou uma alta produtividade (1,41t/m²/h) e alta participação de *pellet feed* do Brasil na mistura (135kg/t de sínter) e menor consumo de energia (1.350MJ/t de sínter). A figura 3.34 mostra essas comparações.

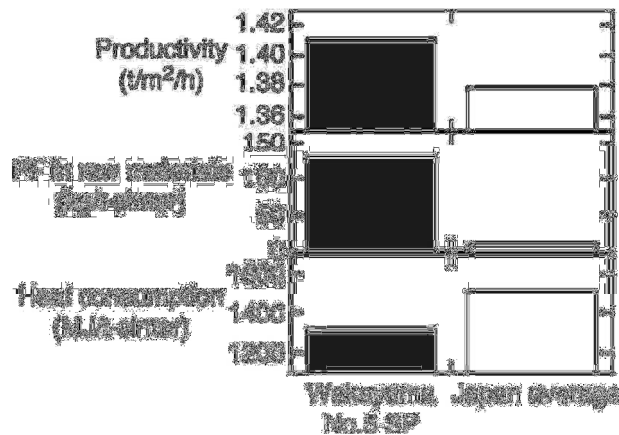


Figura 3.34 – Comparação entre a média das sinterizações do Japão em 2011 com a planta de sinterização nº5 de Wakayama . Fonte: (KAMIJO et al, 2013).

Segundo CSE (2012), a mistura intensiva e a tecnologia de nodulização ajudam na homogeneização das matérias-primas alimentadas no processo de sinterização. O misturador de alta intensidade e o misturador de tambor são utilizados para produzir minério de ferro granulado. Isso contribui de maneira significativa para a melhoria da eficiência energética e da produtividade, bem como na redução do enorme espaço requerido para pátios de estocagem e blendagem. Adicionalmente, essa tecnologia ajuda na reutilização de outros resíduos siderúrgicos da planta, por meio da homogeneização intensiva da mistura a ser sinterizada. Na Índia, as seguintes siderúrgicas adotaram a

tecnologia de mistura intensiva e tambor de nodulização: Vizag Steel, SAIL Rourkela, Tata Steel, JSW Steel e Neelachal Ispat. Em termos globais, várias plantas do mundo também adotaram essa prática: Wakayama Steel Works (sinter plant#4), Sumitomo Metal Industries, Voestalpine Donawitz e Dragon Steel Company.

LIMA et al (2014) realizaram experimentos para verificar o efeito do aumento da participação de minério de ferro ultrafino na sinterização, utilizando a tecnologia de mistura intensiva. Os experimentos foram realizados em escala piloto no laboratório da Arcelor Mittal Global R&D, em Maizières na França, e na planta de sinterização número 2 da usina siderúrgica da Arcelor Mittal em Gent na Bélgica.

No laboratório duas tecnologias de mistura intensiva foram testadas por meio de testes piloto de sinterização, a saber: misturador intensivo vertical e misturador intensivo horizontal, tipo braço de Netuno. Dois diferentes layouts foram propostos para cada caso: o misturador intensivo como etapa adicional, como na sinterização número 2 da Arcelor Mittal Gent, ou como substituto dos tambores de mistura e granulação.

Várias misturas de minérios foram testadas para avaliar o impacto do aumento da participação de materiais finos na sinterização, simulando a degradação da qualidade dos minérios a curto, médio e longo prazo. Foi determinado o desempenho de aglomerantes em cada cenário, cal virgem foi adicionada em diferentes níveis, ações comumente adotadas pelas plantas de sinterização para manter a produtividade quando da utilização de minério fino. Esse estudo ajudou a validar os cenários mais interessantes para a aplicação de cada tecnologia de misturador intensivo nas plantas de sinterização via a análise de custo de processamento.

A utilização dos misturadores intensivos permitiu o crescimento do tamanho e da resistência a quebra dos pseudo-grãos, especialmente quando a matéria-prima vai se tornando mais fina. A figura 3.35 mostra a relação entre o tamanho dos pseudo-grãos e o percentual de material fino na mistura a ser sinterizada.

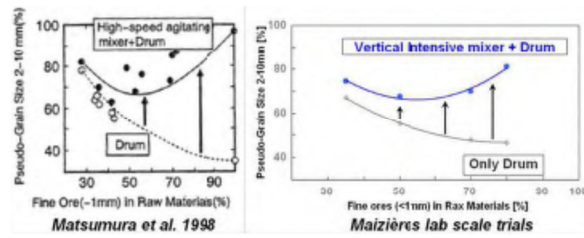


Figura 3.35 – Relação entre o tamanho dos pseudo-grãos e o percentual de material fino na mistura a ser sinterizada . Fonte: LIMA et al (2014).

Em relação ao desempenho da sinterização, a produtividade aumentou e foi medida entre +1% e +16% ou +0.5 a +4t/m².24h, quando utilizando um dos tipos de misturador intensivo como uma etapa adicional ou substituindo um dos tambores granuladores convencionais. Esse resultado é fortemente conectado com o tamanho das partículas da mistura inicial e do aglomerante contido com os altos ganhos com misturas grossas e finas. Em adição, o consumo de combustível se manteve praticamente constante e a resistência a frio do sinter aumentou quando o misturador intensivo horizontal foi utilizado. Foi também observado que a eficiência dos agentes aglomerantes foi melhorada com dosagens intermediárias. O tempo total de granulação e também os ajustes dos misturadores intensivos possuem notável impacto nesses resultados. A figura 3.36 mostra o efeito do misturador intensivo e da dosagem de aglomerante na produtividade da planta piloto.

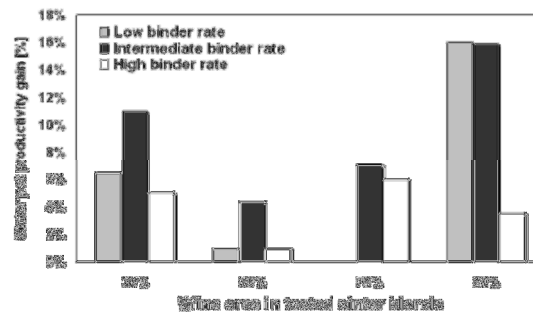


Figura 3.36 – Efeito do misturador intensivo e da dosagem de aglomerante na produtividade da planta piloto. Fonte: LIMA et al (2014).

A planta de sinterização número 2 da usina de Gent foi equipada com um misturador intensivo vertical antes do tambor granulador, o que aumenta o tempo para a granulação. O misturador tem uma capacidade nominal de 1.000t/h. Esse equipamento foi projetado para ser capaz de processar todo o fluxo de materiais que entram na

máquina de sinterização. Com o objetivo de aumentar a granulação, numerosas campanhas de testes foram realizadas onde o desempenho e os cenários mais interessantes foram identificados, e apontados os melhores parâmetros de operação do misturador intensivo para maximizar a desempenho da sinterização. Vários fatores como absorção de água dos pseudo-grãos, dosagem dos aglomerantes e seu ponto de adição, quantidade de minério ultrafino na mistura, velocidade dos rotores do misturador intensivo, velocidade da panela do misturador intensivo, taxa de alimentação e adição de água nos tambores granuladores, foram notados.

Comparações entre a nova configuração com misturadores intensivos e tambores granuladores com a situação inicial só com tambores com o mesmo nível de umidade revelaram um aumento de +0,55mm na capacidade de granulação. A figura 3.37 mostra esse ganho.

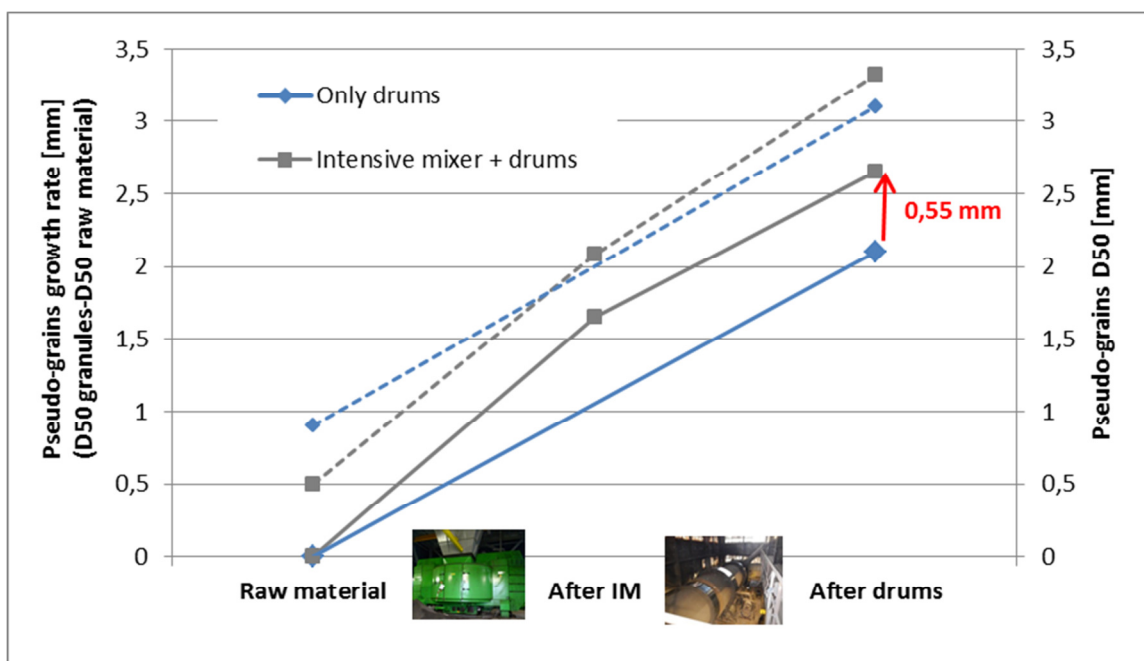


Figura 3.37 - - Aumento da capacidade de granulação. Fonte: LIMA et al (2014).

Foram observados resultados positivos na produtividade da máquina de sínter (+1t/m².24h ou +3,5%) e quanto ao retorno de finos (-10kg/t) em diferentes campanhas com o conteúdo desafiador de 40% de minério fino na mistura a ser sinterizada. Nenhum impacto na resistência a frio do sínter foi notada e apenas um pequeno aumento no consumo de combustível foi observado.

Misturadores intensivos verticais ou horizontais, sozinhos ou seguidos de tambores, permitem o aumento da produtividade e flexibilidade com o consumo de finos de minério de até 40%. Ajustes cuidadosos devem ser feitos na umidade, quantidade de aglomerantes e seu ponto de adição.

LUDIVINE et al (2014) relataram que, até 2012, a preparação de matérias-primas na sinterização número 2 da Arcelor Mittal Gent era realizada por um sistema convencional constituído de: um tambor para a mistura da matéria-prima seguido de um tambor nodulizador. Depois de uma campanha de testes de laboratório baseada na avaliação de diferentes tecnologias de granulação, tendo como objetivo elevar a participação de minérios de ferro ultrafinos, a Arcelor Mittal decidiu instalar um misturador intensivo vertical. A figura 3.38 mostra o fluxo de processo da instalação da sinterização número 2 da Arcelor Mittal Gent.

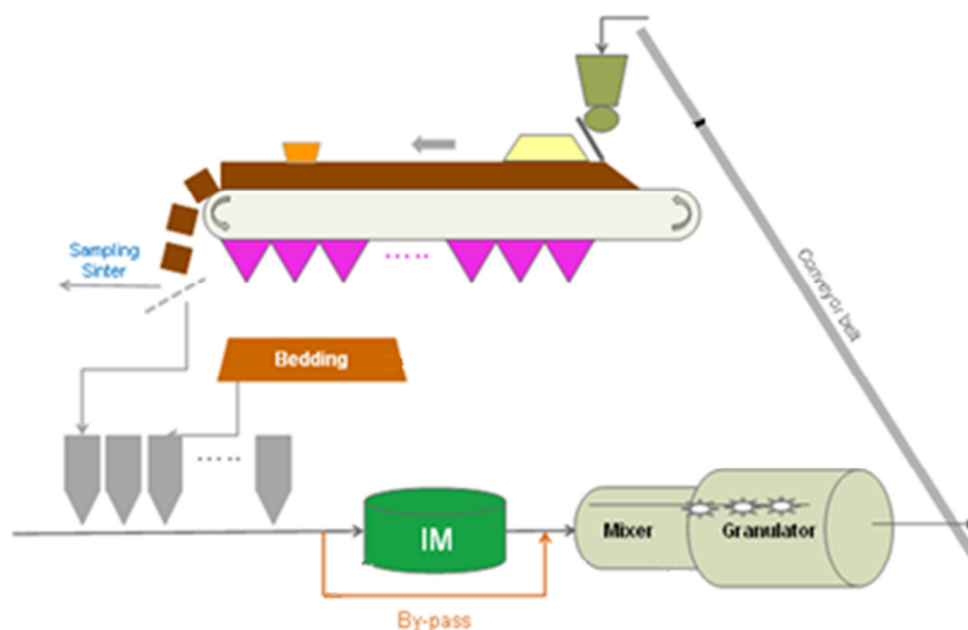


Figura 3.38 – Fluxo de processo da Sinterização número 2 da Arcelor Mittal Gent.

O misturador intensivo foi integrado antes dos tambores convencionais, dotado de um sistema de *by-pass*, com a precisa função de permitir a utilização na mistura a ser sinterizada de materiais ultrafinos. Esse sistema é capaz de processar toda a demanda de mistura da máquina de sinterização. Assim é possível operar a máquina de sínter com o sistema convencional composto do tambor de mistura e tambor granulador com ou sem o misturador intensivo no circuito. Isso permite avaliar o rendimento com as duas opções de mistura e em caso de manutenção ou problemas de funcionamento do misturador intensivo a produção não sofrerá interrupções. A figura 3.39 apresenta um desenho esquemático do *layout* da instalação do misturador intensivo e a figura 3.40 mostra uma fotografia da instalação.

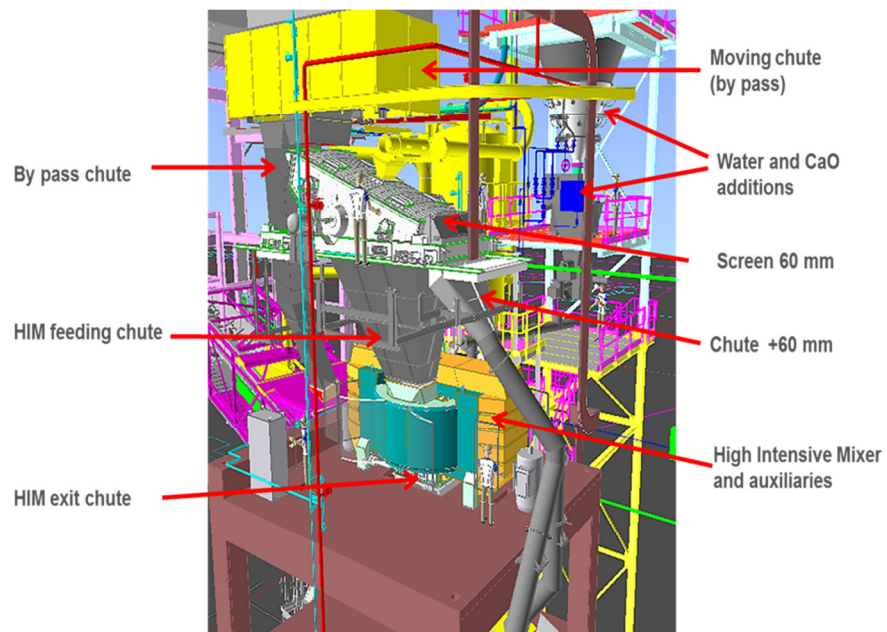


Figura 3.39 – Desenho esquemático do layout da instalação do misturador intensivo da Sinterização número 2 da Arcelor Mittal Gent. Fonte: LUDIVINE et al (2014).



Figura 3.40 – Fotografia da instalação da Sinterização número 2 da Arcelor Mittal Gent. Fonte: LUDIVINE et al (2014).

O misturador intensivo instalado tem a capacidade nominal de 1.000t/h e as principais especificações são: um rotor com 0,8m de diâmetro, com velocidade máxima de rotação de 180rpm, equipado com inversor de frequência. Outro rotor com 1m de diâmetro, com velocidade máxima de rotação de 143rpm é equipado com inversor de frequência.

A panela tem 3,3m de diâmetro, com um volume útil de 7,2m³, velocidade de rotação máxima de 8,8rpm é equipada com inversor de frequência. A figura 3.41 mostra uma fotografia do interior do misturador intensivo.



Figura 3.41– Fotografia do interior do misturador intensivo da Sinterização número 2 da Arcelor Mittal Gent. Fonte: LUDIVINE et al (2014).

Após a integração do misturador intensivo ao processo de sinterização, uma campanha de testes foi realizada com os seguintes objetivos: otimização dos ajustes dos parâmetros do misturador intensivo baseando-se na eficiência de granulação, buscando o ponto ótimo da operação dos tambores convencionais, estudo do impacto do misturador intensivo em relação à distribuição de tamanho da partícula, da segregação da mistura e ponto de carregamento da mistura a ser sinterizada, avaliação do desempenho do misturador intensivo quando carregado com até 40% de ultrafinos na mistura a ser sinterizada, verificação da quantidade de cal virgem e umidade da mistura com diferentes quantidades de ultrafinos.

A instalação do misturador intensivo promoveu o aumento da produtividade e da flexibilidade quando há o acréscimo de minério de ferro ultrafino na mistura de sinterização.

3.4 Tecnologias chinesas de aglomeração

CRU (2013) relatou visitas realizadas a produtores de aço da China, para conhecer a utilização da tecnologia de pré-aglomeração de finos de minério de ferro pelas siderúrgicas chinesas e seu impacto no futuro do mercado de minério de ferro. Ficou comprovado que o número de siderúrgicas com processo de pré-aglomeração era maior do que se pensava. Tradicionalmente, no ocidente, os tipos de minério de ferro são classificados em três categorias, *pellet feed*, *sinter feed* e *lump*. Essas categorias são determinadas pelo tamanho do grão, o qual é usualmente medido pela fração D80 do minério. A fração D80 mede o tamanho de malha no qual 80% do material é passante. Conseqüentemente, quando um minério é dito ter tamanho de grão 75 μ m, por exemplo, isso significa que 80% do material são mais finos que 75 μ m. De acordo com esse padrão a definição tradicional para esses produtos é: *lump*(>6,3mm), *sinter feed*(<6,3mm>150 μ m) e *pellet feed*(<75 μ m).

Sinter feed e *pellet feed* requerem aglomeração, como sinter ou pelotas, antes de serem carregados no alto-forno, enquanto o *lump* pode ser carregado diretamente. Esses limites de tamanho são determinados por restrições de cada processo. A utilização de material abaixo de 150 μ m no processo de sinterização causa distúrbios no fluxo de ar através do leito de sinter, o qual é importante para garantir que todo material foi sinterizado. O processo de pelletização se mostra mais efetivo utilizando material de grão fino por volta de 40 μ m, com minérios com grãos maiores o pelletamento não é efetivo, afetando a resistência estrutural das pelotas. O minério situado entre >75 μ m e <150 μ m é chamado de concentrado, especialmente na China, e pode ser utilizado tanto na sinterização como na pelletização, entretanto processamento adicional é requerido.

Muitas minerações estão produzindo minérios concentrados devido à queda da qualidade dos minérios *in-situ*, requerendo processamento para que o minério atinja um teor de ferro que seja comercialmente atrativo. Isso significa que as siderúrgicas devem aplicar alguma forma de processamento antes dos processos de sinterização e pelletização.

Há duas opções para processar um concentrado de minério de ferro. A primeira é moer o material até um tamanho de grão adequado para a pelotização. Quase todas plantas de pelotização possuem um sistema de moagem para adequar o tamanho do minério de ferro ao processo de pelotização. Entretanto, a moagem pode ser relativamente cara, dependendo do custo local de energia elétrica, que representa um grande componente de seu custo. Adicionalmente, a energia requerida para a moagem de materiais cada vez mais finos não segue um padrão linear, conforme pode ser visto na figura 3.42. O que ocorre na China, é que se torna muito dispendioso moer um concentrado grosso para ser transformado em pelotas.

Energy consumption increases sharply once grind size falls below 90 μ

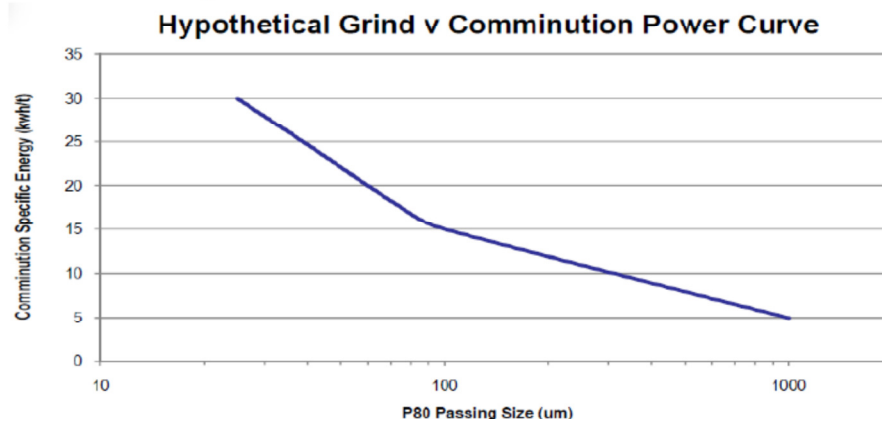


Figura 3.42 – Consumo de energia específico de acordo com o grau de moagem. Fonte: (CRU 2013).

O processo alternativo disponível para as siderúrgicas é comprar o concentrado de minério de ferro e pré-aglomerar esse material com o objetivo de aumentar o tamanho do grão, tornando esse material susceptível ao processo de sinterização. A pesquisa feita pelo CRU sugere que a utilização de pré-aglomeração na China é relativamente difundida, permitindo que uma quantidade próxima a 40% de material <150 μ m seja utilizada no processo de sinterização. Por meio de discussões com contatos na China, O CRU entendeu que aproximadamente 80% das siderúrgicas chinesas possuem alguma forma de realizar a pré-aglomeração em minérios <50 μ m para serem utilizados na sinterização.

Isso resulta em uma grande flexibilidade operacional das siderúrgicas chinesas para comprar *pellet feed* ou concentrados de minério de ferro, conforme é mostrado na figura 3.43.

Processing options depend on grain size

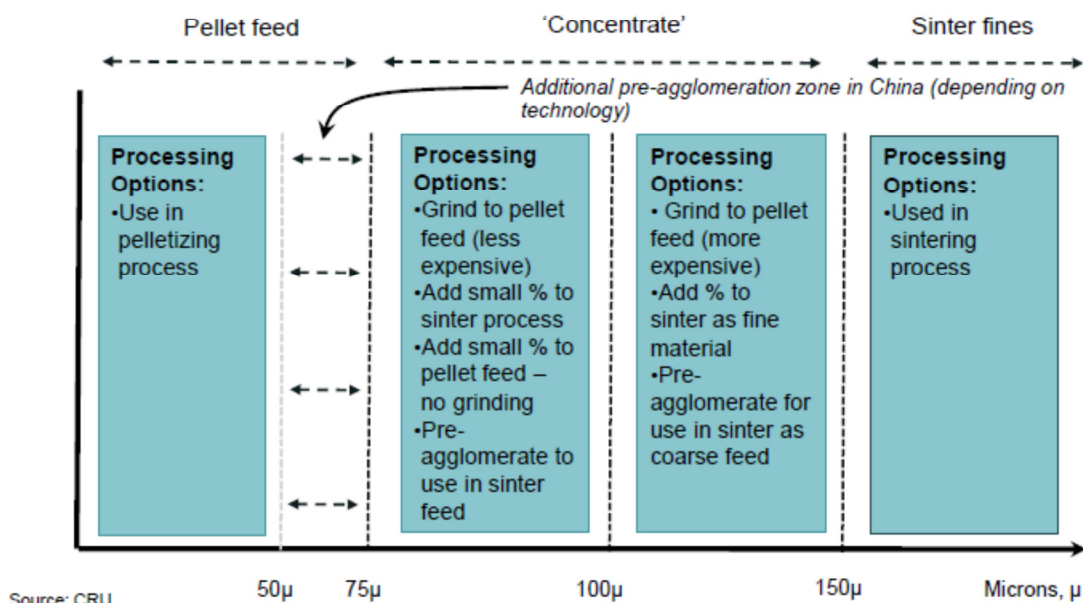


Figura 3.43 – Opções de processamento de acordo com tamanho do grão. Fonte: (CRU 2013).

A utilização da tecnologia de pré-aglomeração na China é em grande parte resultado das características do minério de ferro doméstico. A siderurgia chinesa foi estabelecida usando grande proporção de sinter na carga do alto-forno. A razão chave para isso é que as plantas de sinterização oferecem um alto grau de flexibilidade operacional, porque elas podem processar uma grande gama de minérios, rejeitos e retorno de finos do processo. Por outro lado, o processo de pelletização é mais efetivo quando utiliza uma só fonte de minério de ferro. A mineração de minério de ferro na China está estruturada em diferentes pequenas minerações que alimentam centrais de beneficiamento, onde o minério é concentrado e distribuído para as siderúrgicas. Logo, os produtos de minério de ferro doméstico chinês sempre contem uma mistura de diferentes fontes, o que limita sua utilização no processo de pelletização, mesmo depois do processo de cominuição. Outra razão é que o capital empregado para construção de uma sinterização é menor do que aquele requerido para uma pelletização e sua capacidade de processo é maior. Por

essa razão, existe um grande volume de sinterizações na China, enquanto a capacidade das pelletizações só começou a aumentar recentemente.

O minério de ferro doméstico chinês tem um baixo teor de ferro in-situ, quando comparado com os encontrados nas maiores áreas de mineração do mundo, além de sua contínua queda de teor de ferro, onde a média do teor de ferro in-situ é em torno de 20%. Isso tem resultado em um beneficiamento adicional para produzir um concentrado com um teor de ferro alto o suficiente para ser carregado em um alto-forno. Na prática, é necessário cominuir o minério para aumentar sua área específica e permitir sua concentração, mas isso resulta em um produto muito fino. Desse modo, o volume de material com grão fino na China vem aumentando na mesma velocidade com que o teor de ferro in-situ vem caindo nas minerações chinesas. Desse modo, a siderurgia chinesa é incentivada a desenvolver a tecnologia de pré-aglomeração, tornando-se mais flexível para a utilização de minérios importados e locais.

Em geral, a maioria das siderúrgicas chinesas vai empregar alguma forma de processo de pré-aglomeração na mistura antes da sinterização. No ocidente, por enquanto, tipicamente só há um estágio de mistura antes da sinterização para garantir que o minério de ferro, os agentes fluxantes e o retorno da sinterização sejam combinados de forma homogênea. Entretanto, na China regulamentações do governo determinam que devam existir no mínimo dois estágios de mistura antes da máquina de sinterização. Não é incomum se encontrar três ou quatro estágios de mistura em algumas siderúrgicas. A mistura adicional assegura que o material fino seja propriamente misturado ao *sinter feed*.

Essa forma de pré-aglomeração está presente em até 80% das siderúrgicas da China. O processo é relativamente simples e envolve um circuito de tambores de mistura através do qual o minério de ferro, *sinter feed* e finos (concentrado e *pellet feed*) são passados. Retorno de sinterização, material reciclado da usina, material fluxante e água são depois adicionados. O material de granulação fina se aglomera e forma micropelotas, as quais depois são expostas ao vapor fornecido pelos gases aproveitados da máquina de sinterização, o qual ajuda no aumento da resistência das micro pelotas. Essas micro

pelotas são então adicionadas ao leito a ser sinterizado. Cada estágio subsequente ajuda a aumentar a homogeneidade e a integrar o material fino na mistura. O número de estágios de mistura depende da proporção de minério de ferro doméstico e importado. Com maior proporção de minério de ferro doméstico mais estágios de mistura são requeridos.

Em complemento à adição de estágios de mistura, cerca de 45% das siderúrgicas chinesas entendem que terão em breve instalado o processo tecnológico de pré-aglomeração, chamado de “*mini-pelletized sinter*” (MPS). Essa tecnologia é utilizada para produzir pelotas cruas de minério de ferro de granulação fina, efetivamente aumentando o tamanho da partícula do minério de ferro de granulação fina, que depois é adicionada no leito da máquina de sinter. O minério de ferro de granulação fina é misturado com agentes fluxantes e aglomerantes, discos de pelotização são utilizados para transformar a mistura homogeneizada em pelotas cruas. Mas, diferentemente do processo de pelotização, essas pelotas não são endurecidas. As pelotas cruas recebem um recobrimento com uma fina camada de carbono antes de serem adicionadas na mistura que será distribuída no leito de sinterização. Portanto, esse processo permite a utilização direta de minério de ferro com granulação fina. Sem dúvida alguma, o minério de ferro de granulação fina tende a ter melhor característica de pelotização que um minério de ferro com granulação grossa. Logo, minérios de ferro finos com tamanho $-50\mu\text{m}$ poderão ser utilizados para produzir sinter em certas circunstâncias.

A utilização da tecnologia de pré-aglomeração tem um significativo potencial de aplicações para os produtores de minério de ferro que suprem o mercado transoceânico. Provavelmente o mais importante deles é o potencial mercado no qual os projetos de *pellet feed* não estarão restritos apenas às siderúrgicas que possuem pelotizações, esses projetos vão competir também no mercado de finos para sinterização. Devido ao fato que o consumo de sinter na China é bem maior que o consumo de pelotas, isso vai refletir no tamanho do mercado, para projetos de *pellet feed* que serão provavelmente ampliados. Mais estudos de mercado serão necessários, para que se estabeleça o tamanho exato do mercado de ultrafinos para sinterização. Portanto, os produtores e os

novos projetos não deverão focar somente o mercado tradicional de *pellet feed*, quando forem comercializar com a China.

A figura 3.44 compara o tamanho de grão e o teor de ferro de grandes projetos de *pellet feed* que estão previstos para essa década. Pode ser visto que alguns desses projetos estão planejando disponibilizar produtos com tamanho de grão menor que 50 μ m e teor de ferro entre 68-69%, incluindo os projetos australianos de magnetita.

Pellet feed projects: Fe content vs D80

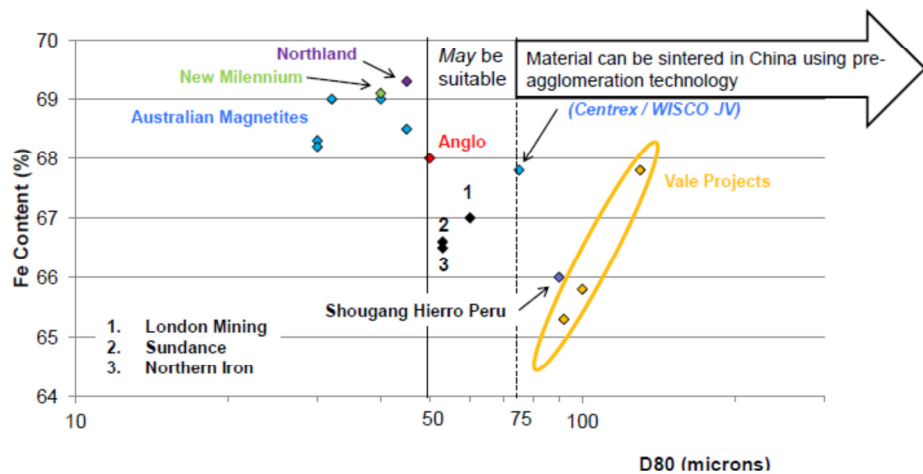


Figura 3.44 – Comparação entre tamanho de grão e teor de ferro de vários projetos. Fonte: (CRU 2013).

Em resumo:

A tecnologia de pré-aglomeração permite que minérios de granulação fina sejam utilizados nos processos de sinterização.

A tecnologia de pré-aglomeração foi desenvolvida devido às características do minério doméstico chinês, o qual vem se tornando fino à medida que o seu teor de ferro vem caindo, e ao desejo de continuar a utilizar a capacidade de sinterização existente consumindo minério doméstico.

De uma forma simplista, a tecnologia envolve a instalação entre um a três estágios de mistura antes da máquina de sínter. O MPS é um processo de pré-aglomeração mais

complexo porque envolve a produção de pelotas cruas que são adicionadas na mistura de sinterização. Cerca de 45% das siderúrgicas chinesas, entendem que deverão ter o processo MPS em suas sinterizações.

A utilização da tecnologia de pré-aglomeração pelas siderúrgicas chinesas tem implicações potenciais para os produtores de minério de ferro, que poderão ofertar um grau de flexibilidade, considerando-se a relação entre o tamanho de grão e o teor de ferro e esse será o *trade-off* a ser considerado pelos projetos de *pellet feed*.

Pode-se constatar que o processo de sinterização é dinâmico e busca adequar-se às necessidades para processar minérios de ferro mais finos e de características químicas mais pobres. Daí surge uma oportunidade da Samarco Mineração S/A oferecer ao mercado siderúrgico os produtos *pellet feed* e *pellet screenings*, ambos de alto teor de ferro e baixos teores de contaminantes, proporcionando a produção de um sinter de baixa ganga e excelentes características metalúrgicas, contribuindo para a redução da energia consumida no alto-forno ou propiciando a utilização de minérios de ferro mais pobres na mistura a ser sinterizada.

3.5 Produção mundial de sinter

A tabela III.6 mostra a capacidade das principais plantas de sinterização do mundo com produção superior a 1.000.000t/ano.

Tabela III.6 – Capacidade nominal das principais plantas de sinterização do mundo em 2014, as plantas que possuem misturador intensivo estão assinaladas com (*). Wood Mackenzie (2014)

País	Empresa	Localização	Capacidade (x1.000t/ano)
África do Sul	Arcelor Mittal	Newcastle (*)	2.200
África do Sul	Arcelor Mittal	Vanderbijlpark	1.790
Alemanha	Rogesa	Dillingen	5.000
Alemanha	Arcelor	Eisenhüttenstadt	2.800
Alemanha	HKM	Huckingen	6.000
Alemanha	Salzgitter AG	Salzgitter	2.500
Alemanha	Arcelor Mittal	Bremen	2.800
Alemanha	Thyssen Krupp Stahl	Duisburg	12.300
Argélia	Arcelor Mittal	El Hadjar	3.100
Argentina	Ternium Siderar	Ramallo	1.460
Austrália	Bluescope Steel	Port Kembla	5.200
Austria	Voest Alpine Stahl	Donawitz (*)	1.400
Austria	Voest Alpine Stahl	Linz	2.800
Bélgica	Arcelor Mittal	Ghent (*)	7.200
Bósnia	Arcelor Mittal	Zenica	1.800
Brasil	Gerdau Açominas	Ouro Branco	6.750
Brasil	Arcelor Mittal Monlevade	Monlevade	1.750
Brasil	Usiminas Cubatão	Cubatão (*)	5.060
Brasil	CSN	Volta Redonda	5.770
Brasil	Arcelor Mittal Tubarão	Serra	6.500
Brasil	Usiminas Ipatinga	Ipatinga (*)	6.100
Brasil	CSA	Sepetiba (*)	5.700
Brasil	Cosipar	Barcarena	2.300

País	Empresa	Localização	Capacidade (x1.000t/ano)
Bulgária	Kremikovtzi	Sofia	3.000
China	Anshan I & S	Anshan	12.200
China	Anshan I & S	Bayuquan	9.340
China	Boashan I & S	Baoshan	18.000
China	Baotou I & S	Baotou	5.800
China	Benxi I & S	Benxi	9.600
China	Zhongtian Changzhou	Changzhou	3.000
China	Chongqing	Chongshou	10.950
China	Fujian I&S	Sanming	2.250
China	Qingdao	Qingdao	3.300
China	Shagang Group	Zhangjiagang	21.500
China	Shandong Laiwusteel	Laiwu	2.300
China	Xuanhua I&S	Xuanhua	7.200
China	Wisco Echeng I&S	Ezhou	3.235
China	Baosteel Stainless Steel	Shanghai	5.500
China	Tangshan Guofeng	Fegnan Tangshan	2.500
China	Hengyang Valin	Hengyang	1.400
China	Tianjin Tiantie Metallurgy	Shenxian	8.800
China	Shougang I & S	Shijingshan	5.800
China	Tianjin I & S	Tianjin	2.800
China	Wisco	Kunming	9.100
China	Weifang I & S	Weifang	2.500
China	Henan Jiyuan I & S	Jiyuan	1.000
China	Fangda Special Steel	Nanchang	3.650
China	Chengdo I & S	Chengdo	3.600
China	Shandong Steel	Jinan	9.900
China	Baosteel Bayi	Urunqi	8.400
China	Pangang	Xichang	7.600
China	Anyang I & S Group	Anyang	13.740
China	Shougang Shuicheng I & S	Liupanshui	5.230
China	Shougang I & S	Changzhi	3.350

País	Empresa	Localização	Capacidade (x1.000t/ano)
China	Jiuquan I & S	Jiayuguan	5.240
China	Xingtai I & S	Xingtai	1.800
China	Taiyuan Linfen	Linfen	4.690
China	Hunan Valin	Loudi	1.380
China	Hunan Valin	Xiangtan	5.180
China	Xinyu I & S	Xinyu	16.100
China	Tangshan I & S	Tangshan	7.700
China	Taiyuan I & S	Taiyuan	4.690
China	Panzhuhua I & S	Dukou	10.600
China	Kunming I & S	Kunming	2.500
China	Wuhan I & S Co.	Wuhan	17.700
China	Hangang	Handan	7.000
China	Handan I & S	Handan	13.260
China	Baosteel	Nanjing	14.170
China	Jiangsu Steel	Huaijin	1.800
China	Jiangsu Group	Jinfeng	17.200
China	Rizhao I & S	Rizhao	20.200
China	Laiwu Steel	Laiwu	2.300
China	Nanjing I & S	Nanjing	7.200
China	Shaoguan I & S	Qujiang	3.700
China	Jinan I & S	Jinan	3.000
China	Echeng I & S	Ezhou	1.410
China	Shuicheng I & S	Liupanshui	2.400
China	Tiantie	She County	3.600
China	Changzhou	Changzhou	3.000
China	Hebei Jinxi I & S	Santuning	4.800
China	Minmetal Yinkou	Yingkou	3.600
China	Ningbo I & S	Ningbo	4.300
China	Shougang Jingtang	Caofedian Island	11.000
China	Sichuan Desheng I & S	Leshan	2.000
China	Shanxi Haixin I & S	Wenxi	6.300

País	Empresa	Localização	Capacidade (x1.000t/ano)
China	Hebei Jingye Group	Nandian	6.200
China	Shaanxi Longmen I & S	Hancheng	4.000
China	Qinhuandao Shouquin	Qinhuangdao	3.000
China	Tangshan Sonnting I & S	Qian'an	2.200
China	Zenith Steel	Changzhou	3.600
China	Heilongjiang Jianlong I & S	Shuangyashan	1.800
China	Ningbo I & S	Ningbo	4.300
Coréia do Sul	Posco	Gwangyang	31.900
Coréia do Sul	Posco	Pohang	15.610
Coréia do Sul	Hyundai Steel	Dangjin B	10.800
Egito	Egyptian I&S	Helwan	3.950
Eslováquia	US Steel Kosice	Kosice	4.200
Espanha	Arcelor Mittal	Gijon	6.000
Estados Unidos	Arcelor Mittal	Burns Harbor	2.260
Estados Unidos	Severstal	Sparrows Point	3.100
Estados Unidos	Arcelor Mittal	Indiana Harbor W	1.100
Estados Unidos	Arcelor Mittal	Indiana Harbor E	1.100
Estados Unidos	US Steel	Gary	2.180
Filipinas	Philippine Sinter Corp.	Cagayan de Oro	5.550
Finlândia	Rautaruukki OY	Raahe	2.790
França	Arcelor Mittal	Dunkerque	9.600
França	Saint-Gobain Pam	Dieulouard	1.500
França	Arcelor Mittal	Florange	5.000
França	Arcelor Mittal	Fos-sur-Mer	6.800
Holanda	Tata Corus	IJMuiden	4.400
Hungria	ISD Dunaferr ZRT	Dunaujvaros	1.000
India	SAIL	Bokaro (*)	6.200
Índia	Rashtriya Ispat	Visakhapatnam	8.860
Índia	SAIL	Bhilai (*)	12.030
Índia	SAIL	Durgapur	3.000
Índia	SAIL	Rourkela (*)	6.900

País	Empresa	Localização	Capacidade (x1.000t/ano)
Índia	Tata Steel	Jamshedpur (*)	7.520
Índia	SAIL	Burnpur	3.880
Índia	JSW Steel Ltd	Dolvi	2.240
Índia	Tata Steel	Kalinganagar	5.750
Índia	JSW Steel	Toranagallu (*)	10.400
Índia	Jindal S & P	Raigarh	2.300
Índia	Bhushan P & S	Sambalpuri	3.450
Índia	JSW Southern I & S	Salem	1.195
Índia	Neelachal Ispat	Duburi	1.600
Índia	Jindal Steel & Power	Patratu (*)	5.000
Índia	Bhushan Steel	Meramandali	3.760
Indonésia	PT Krakatau-Posco	Cilegon	4.960
Iran	Esfahan Steel	Esfahan	3.400
Itália	Ilva Spa	Taranto	11.000
Kazaquistão	Arcelor Mittal	Temirtau	7.200
Japão	JFE Steel Corporation	Chiba	2.450
Japão	JFE Steel Corporation	Mizushima	13.000
Japão	Kobe Steel	Kakogawa	5.640
Japão	Nippon Steel & Sumitomo	Kimitsu (*)	13.340
Japão	Nippon Steel & Sumitomo	Nagoya	10.060
Japão	Nippon Steel & Sumitomo	Oita (*)	13.700
Japão	Nippon Steel & Sumitomo	Yawata (*)	4.980
Japão	Nippon Steel & Sumitomo	Muroran	3.180
Japão	Nisshin Steel	Kure (*)	5.290
Japão	JFE Steel Corporation	Fukuyama	14.500
Japão	JFE Steel Corporation	Keihin	5.300
Japão	Nippon Steel & Sumitomo	Kashima (*)	10.900
Japão	Nippon Steel & Sumitomo	Wakayama (*)	4.930
Japão	Nippon Steel & Sumitomo	Kokura	2.300
Malásia	Lion	Banting	2.800
México	AHMSA	Monclova	2.200

País	Empresa	Localização	Capacidade (x1.000t/ano)
Paquistão	Pakistan Steel	Bin Qasim	1.850
Polônia	Arcelor Mittal	Krakow	1.950
Polônia	Arcelor Mittal	Dabrowa Gornicza	8.100
Reino Unido	Tata Corus	Port Talbot	4.600
Reino Unido	Tata Corus	Teesside	3.500
Reino Unido	Tata Corus	Scunthorpe	5.500
República Tcheca	Arcelor Mittal	Ostrava	3.720
República Tcheca	Arcelor Mittal	Trinec	2.700
Romênia	Arcelor Mittal	Galati	3.000
Rússia	Mechel	Chelyabinsk	6.700
Rússia	Servestal	Cherepovets	9.080
Rússia	Novokuznetsky	Novokuznetsk	3.400
Rússia	Novolipetsk	Lipetzk	14.600
Rússia	Magnitogorsk	Magnitogorsk	10.500
Rússia	Nishniy	Nishniy Tagil	2.100
Rússia	Ural Steel	Novotroizk	3.500
Rússia	Tulachermet	Tula	2.300
Rússia	Zapadno-Sibirsky	Novokuznetsk	8.250
Rússia	Evráz Nishniy Tagil	Nishniy Tagil	2.100
Rússia	Evráz ZSMK	Novokuz Netsk	8.020
Sérvia	US Steel Serbia	Smederevo	2.300
Slováquia	U.S.Steel Kosice S.R.O.	Kosice	4.200
Taiwan	China Steel	Kaohsiung	14.620
Taiwan	Dragon Steel	Taichung (*)	6.400
Turquia	Eregli Demir	Eregli	1.550
Turquia	Iskenderun Demir	Iskenderun	5.950
Turquia	Karabuek Demir	Karabuek	3.300
Ucrânia	Azovstal	Mariupol	1.050
Ucrânia	Dneprovsky	Dneprozerzhinsk	5.600
Ucrânia	Yenakiyevsky	Yenakiyevo	2.100
Ucrânia	Alchevsky	Alchevsk	5.400

País	Empresa	Localização	Capacidade (x1.000t/ano)
Ucrânia	Makeevsky	Makeeva	5.400
Ucrânia	Ilych M.Z.	Mariupol	12.000
Ucrânia	Arcelor Mittal Kryviyrih	Kryviyrih	11.940
Ucrânia	Zaporizhstal	Zaporozhje	5.650
Zimbabue	Zisco Steel	Redcliff	1.800

Como pode ser observado na tabela III.6 acima, grande parcela da indústria siderúrgica mundial que adota a rota alto-forno é altamente dependente da carga direta de sinter. Pode-se notar um movimento pioneiro da siderurgia japonesa no sentido de se adaptar às novas qualidades oferecidas pelo mercado mineral para o *sinter feed*. Por sua localização geográfica, o Japão sempre foi inovador na utilização de matérias-primas. Observa-se também esse movimento em Taiwan, na Europa liderado pela Arcelor Mittal, na Índia para viabilizar os minérios locais e no Brasil na tentativa das siderúrgicas operarem com matérias de menor custo.

O processo de sinterização continua sendo estudado por técnicos e pesquisadores 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 do sinter, para avaliar o desempenho no processo de sinterização dos dois produtos da Samarco: *pellet feed* e *pellet screenings* foram realizados no *Studiengesellschaft für Eisenerzaufbereitung* (SGA) em *Liebenburg-Othfresen*, Alemanha. Para conhecer as necessidades dos mercados atendidos pela Samarco, os dois produtos foram testados em misturas de sinterização referência da Europa Ocidental e da Ásia.

O *pellet feed* é o produto resultante do processo de filtragem, após o minério de ferro ser lavado, britado, moído, deslamado, 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 peneiramento das pelotas nas usinas de pelletização, com granulometria abaixo de 6,3mm, tendo passado por todo o processo de pelletização. 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. O *pellet screenings* é vendido para produtores de sinter.

Os produtos *pellet feed* e *pellet screenings* para os experimentos foram coletados diretamente no pátio de estocagem da Samarco.

Foi adotado o seguinte planejamento básico:

- o fornecimento das matérias-primas para o estudo foi de responsabilidade do SGA, excetuando-se os produtos *pellet feed* e *pellet screenings* da Samarco;
- a definição das misturas base de sinterização foi de responsabilidade do SGA e Samarco, tendo como critério básico a semelhança de desempenho com as misturas industriais de sinterização praticadas na Europa Ocidental e na Ásia;

- os produtos da Samarco foram avaliados individualmente, em substituição parcial aos minérios constituintes das misturas;
- os parâmetros de qualidade visados para o sinter foram equivalentes aos praticados nas indústrias siderúrgicas de cada região estudada;
- as condições experimentais seguiram o padrão do laboratório de sinterização do SGA;
- os parâmetros de qualidade do sinter avaliados foram: composição química, análise granulométrica, *tumbler index* (ISO 3271:2007), para as duas regiões. E os ensaios metalúrgicos para a Europa Ocidental: *reduction test* (ISO 4695:2007) e *static desintegration* (ISO 4696-1) e para a Ásia: *reduction test* (ISO 7215:2007) e *static desintegration* (ISO 4696-2:2007).

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. Os produtos *pellet feed* e *pellet screenings* foram secos em estufa, visando uma condição adequada de manuseio e mistura. No caso do *pellet feed*, aglomerados que estavam presentes no material úmido e permaneceram, após a secagem, foram desagregados, antes da preparação das misturas.

Todas as matérias-primas utilizadas nas etapas deste estudo foram previamente homogêneas e, posteriormente, amostradas conforme a norma ISO 3082:2009 – *Sampling and sample preparation procedures*, para a realização das caracterizações química e granulométrica, respectivamente, nos laboratórios de química analítica e de sinterização piloto do SGA. A figura 4.1 mostra uma visão geral da área de preparação das matérias-primas.



Figura 4.1 – Visão geral da área de preparação das matérias-primas no laboratório do SGA.

4.1.1 Avaliação do *pellet feed* Samarco em uma mistura de sinterização da Europa Ocidental

A avaliação de desempenho do produto *pellet feed* quanto à sinterabilidade foi realizada utilizando-se, como referência, uma mistura de sinterização constituída por quatro diferentes minérios de ferro e finos de retorno. A escolha dessa mistura baseou-se no *blend* de minérios utilizados pela maioria das siderúrgicas da Europa Ocidental. O minério A é um *sinter feed* originário da região Norte do Brasil, o minério B é um *sinter feed* originário da região Sudeste do Brasil, o minério C é um concentrado originário do Canadá e o minério D é um concentrado originário da Maurítânia.

A tabela IV.1 mostra as propriedades químicas e físicas dos minérios constituintes das misturas de sinterização da Europa Ocidental. A tabela IV.2 mostra as propriedades químicas e físicas dos aditivos utilizados nas misturas de sinterização da Europa Ocidental e a figura 4.2 mostra um gráfico com a distribuição granulométrica dos minérios constituintes das misturas da Europa Ocidental.

Tabela IV.1 - Propriedades químicas e físicas dos minérios constituintes das misturas da Europa Ocidental

Designação		Minério A	Minério B	Finos de retorno	Minério C	Minério D	Pellet feed Samarco
		7227/1 E 12561	7227/2 E 12559	7356/4	6489 E 10885	7356/3	7356/1 E 13568
Umidade	[%]	3,8	2,7	0,6	0,9	2,5	10,3
Análise química							
Fe _{tot}	[%]	65,32	63,79	56,01	65,64	65,36	65,83
FeO	[%]	0,20	0,76	7,86	11,26	26,88	0,92
SiO ₂	[%]	2,42	5,47	5,33	4,39	7,26	1,65
Al ₂ O ₃	[%]	1,14	0,78	1,44	0,18	0,55	0,38
CaO	[%]	0,06	0,34	11,95	0,45	0,41	0,13
MgO	[%]	0,07	0,17	0,65	0,47	0,55	0,03
P	[%]	0,016	0,047	0,031	0,006	0,013	0,051
S	[%]	0,005	0,005	0,032	0,007	0,023	0,004
Na ₂ O	[%]	0,030	0,004	0,019	<0,005	0,051	0,015
K ₂ O	[%]	0,025	0,015	0,050	<0,005	0,081	0,007
Mn	[%]	0,670	0,150	0,460	0,132	0,030	0,130
TiO ₂	[%]	0,056	0,059	0,084	0,036	0,170	0,033
V	[%]	0,004	0,005	0,005	0,004	0,002	0,002
P.P.C.	[%]	1,82	1,69	0,53	1,64	0,38	3,43
Granulometria							
+10 mm	[%]	0,6 / 0,6	1,6 / 1,6	0,0 / 0,0	0,0 / 0,0	0,1 / 0,1	0,0 / 0,0
+8 mm	[%]	7,6 / 8,2	5,0 / 6,6	0,3 / 0,3	0,0 / 0,0	0,0 / 0,1	0,0 / 0,0
+6,3 mm	[%]	3,4 / 11,6	5,9 / 12,5	10,2 / 10,5	0,0 / 0,0	0,1 / 0,2	0,0 / 0,0
+5,0 mm	[%]	5,1 / 16,7	6,5 / 19,0	27,3 / 37,8	0,0 / 0,0	0,1 / 0,3	0,0 / 0,0
+4,0 mm	[%]	1,1 / 17,8	2,1 / 21,1	13,5 / 51,3	0,0 / 0,0	0,0 / 0,3	0,0 / 0,0
+3,15 mm	[%]	7,4 / 25,2	7,0 / 28,1	12,7 / 64,0	0,0 / 0,0	0,1 / 0,4	0,0 / 0,0
+2,5 mm	[%]	9,5 / 34,7	8,0 / 36,1	14,6 / 78,6	0,1 / 0,1	1,1 / 1,5	0,0 / 0,0
+1,0 mm	[%]	12,3 / 47,0	8,2 / 44,3	9,7 / 88,3	2,1 / 2,2	7,3 / 8,8	0,1 / 0,1
+0,5 mm	[%]	7,6 / 54,6	5,2 / 49,5	4,8 / 93,1	5,4 / 7,6	13,6 / 22,4	0,1 / 0,2
+0,315 mm	[%]	7,1 / 61,7	3,1 / 52,6	2,2 / 95,3	13,9 / 21,5	14,0 / 36,4	0,0 / 0,2
+0,200 mm	[%]	5,9 / 67,6	5,1 / 57,7	1,5 / 96,8	21,9 / 43,4	14,8 / 51,2	0,2 / 0,4
+0,160 mm	[%]	2,9 / 70,5	3,6 / 61,3	0,0 / 96,8	0,0 / 43,4	0,0 / 51,2	0,1 / 0,5
+0,100 mm	[%]	4,6 / 75,1	7,5 / 68,8	1,4 / 98,2	37,1 / 80,5	19,2 / 70,4	0,7 / 1,2
+0,063 mm	[%]	3,0 / 78,1	0,6 / 69,4	0,4 / 98,6	14,3 / 94,8	9,4 / 79,8	4,0 / 5,2
+0,040 mm	[%]	1,7 / 79,8	16,7 / 86,1	0,3 / 98,9	3,4 / 98,2	6,1 / 85,9	11,0 / 16,2
+0,025 mm	[%]	2,5 / 82,3	4,6 / 90,7	0,2 / 99,1	0,6 / 98,8	4,3 / 90,2	19,9 / 36,1
+0 mm	[%]	17,7 / 100,0	9,3 / 100,0	0,9 / 100,0	1,2 / 100,0	9,8 / 100,0	63,9 / 100,0
D-80	[mm]	3,748	4,509	5,848	0,334	0,589	0,037
D-50	[mm]	0,800	0,470	4,098	0,149	0,209	0,020

Tabela IV.2 - Propriedades químicas e físicas dos aditivos utilizados nas misturas de sinterização da Europa Ocidental

Designação		Calcário	Olivina	Areia	Coque	Cal virgem	Cal hidratada
		V 6489 E 8381	7116/7 E 11859.7	7316/11 E 12218.6	7204/9 E 12442.9	E 13564	E 13565
Umidade	[%]	-	6,3	3,5	-	-	-
Análise química							
Fe _{tot}	[%]	0,25	6,25	1,02	1,32	0,25	0,17
FeO	[%]	0,15	5,31	0,82	-	<0,1	<0,1
SiO ₂	[%]	0,96	41,00	97,00	6,82	1,79	0,49
Al ₂ O ₃	[%]	0,20	0,61	0,40	3,36	0,29	0,20
CaO	[%]	54,90	0,43	0,28	0,95	94,70	73,80
MgO	[%]	0,50	47,50	0,14	0,20	1,16	0,76
P	[%]	0,003	0,002	0,005	0,037	0,005	0,003
S	[%]	0,020	0,014	0,020	0,700	0,052	0,027
Na ₂ O	[%]	0,010	0,030	0,020	0,170	0,060	0,040
K ₂ O	[%]	0,050	0,045	0,050	0,220	0,060	0,030
Mn	[%]	0,030	0,084	0,020	0,007	0,054	0,040
TiO ₂	[%]	0,010	0,013	0,030	0,160	0,013	0,010
V	[%]	<0,001	<0,001	0,004	0,007	<0,001	<0,001
P.P.C.	[%]	43,02	1,34	0,68	86,05	1,54	24,44
Granulometria							
+10 mm	[%]	0,0 / 0,0	0,0 / 0,0	0,0 / 0,0	1,1 / 1,1		
+8 mm	[%]	0,0 / 0,0	0,1 / 0,1	0,0 / 0,0	2,1 / 3,2		
+6,3 mm	[%]	0,0 / 0,0	0,4 / 0,5	0,0 / 0,0	4,9 / 8,1		
+5,0 mm	[%]	0,1 / 0,1	1,2 / 1,7	0,1 / 0,1	8,8 / 16,9		
+4,0 mm	[%]	0,2 / 0,3	1,2 / 2,9	0,1 / 0,2	8,1 / 25,0		
+3,15 mm	[%]	2,3 / 2,6	2,4 / 5,3	0,2 / 0,4	9,8 / 34,8		
+2,5 mm	[%]	21,3 / 23,9	4,1 / 9,4	0,2 / 0,6	15,6 / 50,4		
+1,0 mm	[%]	28,8 / 52,7	8,4 / 17,8	0,5 / 1,1	16,0 / 66,4		
+0,5 mm	[%]	15,4 / 68,1	7,3 / 25,1	25,6 / 26,7	9,4 / 75,8		
+0,315 mm	[%]	9,0 / 77,1	23,2 / 48,3	23,8 / 50,5	4,4 / 80,2		
+0,200 mm	[%]	6,2 / 83,3	14,6 / 62,9	16,8 / 67,3	4,0 / 84,2		
+0,160 mm	[%]	0,0 / 83,3	0,0 / 62,9	6,9 / 74,2	2,1 / 86,3		
+0,100 mm	[%]	4,8 / 88,1	17,3 / 80,2	10,1 / 84,3	3,8 / 90,1		
+0,063 mm	[%]	1,2 / 89,3	6,9 / 87,1	4,4 / 88,7	2,8 / 92,9		
+0,040 mm	[%]	0,5 / 89,8	4,0 / 91,1	2,9 / 91,6	2,1 / 95,0		
+0,025 mm	[%]	0,7 / 90,5	2,2 / 93,3	1,6 / 93,2	1,6 / 96,6		
+0 mm	[%]	9,5 / 100,0	6,7 / 100,0	6,8 / 100,0	3,4 / 100,0		
D-80	[mm]	2,618	0,851	0,631	4,619		
D-50	[mm]	1,142	0,301	0,319	2,518		

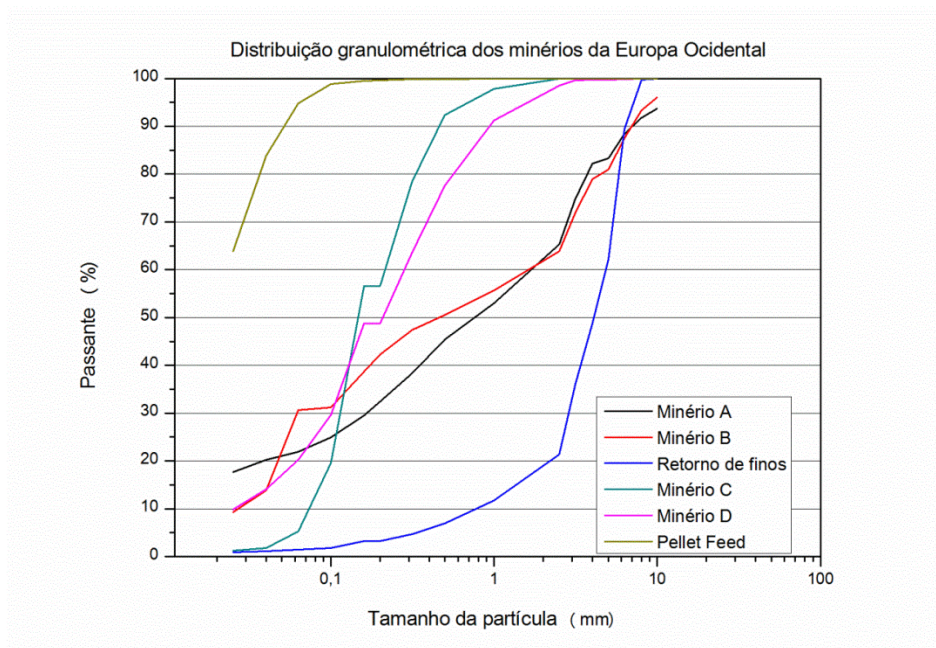


Figura 4.2 - Gráfico da distribuição granulométrica dos minérios constituintes das misturas da Europa Ocidental.

4.1.2 Avaliação do *pellet feed* Samarco em uma mistura de sinterização da Ásia

A avaliação de desempenho do produto *pellet feed* quanto à sinterabilidade foi realizada utilizando-se, como referência, uma mistura de sinterização constituída por seis diferentes tipos de minérios de ferro. A escolha dessa mistura baseou-se no blend de minérios utilizados pela maioria das siderúrgicas da Ásia. O minério E é um *sinter feed* originário da região Norte do Brasil, O minério F é um *sinter feed* originário da região Sudeste do Brasil, o minério G é um *sinter feed* originário da Austrália com alta perda por calcinação (PPC), o minério H é um *sinter feed* originário da Austrália, o minério I é um *sinter feed* originário da Austrália e o minério J é um concentrado originário do Canadá.

A tabela IV.3 mostra as propriedades químicas e físicas dos minérios constituintes das misturas de sinterização da Ásia. A tabela IV.4 mostra as propriedades químicas e físicas dos aditivos utilizados nas misturas de sinterização da Ásia e a figura 4.3 mostra um gráfico com a distribuição granulométrica dos minérios constituintes das misturas da Ásia.

Tabela IV.3 - Propriedades químicas e físicas dos minérios constituintes das misturas da Ásia

Designação		Minério G	Minério E	Minério F	Minério H	Minério I	Minério J	Pellet feed Samarco
SGA No.		6489	7227/1	7227/2	5785.2.b	6489	6493	7356/1
SGA E-No.		E 7365	E 12561	E 12559	E 3726	E 7334	E 6829	E 13568
Umidade	[%]	6,6	3,8	2,7	3,7	5,4	0,5	10,3
Análise química								
Fe _{tot}	[%]	57,93	65,32	63,79	61,82	62,69	66,93	65,83
FeO	[%]	0,23	0,20	0,76	0,27	0,35	1,42	0,92
SiO ₂	[%]	5,14	2,42	5,47	5,95	3,90	3,60	1,65
Al ₂ O ₃	[%]	1,35	1,14	0,78	2,43	2,20	0,30	0,38
CaO	[%]	0,07	0,06	0,34	0,07	0,05	0,07	0,13
MgO	[%]	0,08	0,07	0,17	0,07	0,22	0,04	0,03
P	[%]	0,041	0,016	0,047	0,066	0,065	0,013	0,051
S	[%]	0,011	0,005	0,005	0,017	0,013	0,002	0,004
Na ₂ O	[%]	0,011	0,030	0,004	0,025	0,008	0,007	0,015
K ₂ O	[%]	0,010	0,025	0,015	0,024	0,019	0,011	0,007
Mn	[%]	0,032	0,670	0,150	0,073	0,198	0,021	0,130
TiO ₂	[%]	0,058	0,056	0,059	0,115	0,108	0,180	0,033
V	[%]	0,004	0,004	0,005	0,003	0,003	0,005	0,002
P.P.C.	[%]	10,33	1,82	1,69	2,73	3,47	0,15	3,43
Granulometria								
+10 mm	[%]	1,1 / 1,1	0,6 / 0,6	1,6 / 1,6	0,0 / 0,0	0,0 / 0,0	0,0 / 0,0	0,0 / 0,0
+8 mm	[%]	2,9 / 4,0	7,6 / 8,2	5,0 / 6,6	0,1 / 0,1	0,2 / 0,2	0,0 / 0,0	0,0 / 0,0
+6,3 mm	[%]	5,3 / 9,3	3,4 / 11,6	5,9 / 12,5	1,8 / 1,9	0,8 / 1,0	0,1 / 0,1	0,0 / 0,0
+5,0 mm	[%]	5,8 / 15,1	5,1 / 16,7	6,5 / 19,0	7,1 / 9,0	4,4 / 5,4	0,0 / 0,1	0,0 / 0,0
+4,0 mm	[%]	4,2 / 19,3	1,1 / 17,8	2,1 / 21,1	6,9 / 15,9	3,7 / 9,1	0,0 / 0,1	0,0 / 0,0
+3,15 mm	[%]	6,6 / 25,9	7,4 / 25,2	7,0 / 28,1	8,1 / 24,0	7,5 / 16,6	0,1 / 0,2	0,0 / 0,0
+2,5 mm	[%]	12,8 / 38,7	9,5 / 34,7	8,0 / 36,1	12,5 / 36,5	14,2 / 30,8	0,0 / 0,2	0,0 / 0,0
+1,0 mm	[%]	20,5 / 59,2	12,3 / 47,0	8,2 / 44,3	14,3 / 50,8	19,2 / 50,0	5,1 / 5,3	0,1 / 0,1
+0,5 mm	[%]	10,5 / 69,7	7,6 / 54,6	5,2 / 49,5	9,2 / 60,0	11,1 / 61,1	26,7 / 32,0	0,1 / 0,2
+0,315 mm	[%]	6,5 / 76,2	7,1 / 61,7	3,1 / 52,6	5,8 / 65,8	6,1 / 67,2	26,4 / 58,4	0,0 / 0,2
+0,200 mm	[%]	4,9 / 81,1	5,9 / 67,6	5,1 / 57,7	5,3 / 71,1	5,0 / 72,2	22,2 / 80,6	0,2 / 0,4
+0,160 mm	[%]	0,0 / 81,1	2,9 / 70,5	3,6 / 61,3	0,0 / 71,1	0,0 / 72,2	0,0 / 80,6	0,1 / 0,5
+0,100 mm	[%]	4,8 / 85,9	4,6 / 75,1	7,5 / 68,8	6,8 / 77,9	6,5 / 78,7	14,7 / 95,3	0,7 / 1,2
+0,063 mm	[%]	2,4 / 88,3	3,0 / 78,1	0,6 / 69,4	4,1 / 82,0	2,9 / 81,6	2,9 / 98,2	4,0 / 5,2
+0,040 mm	[%]	1,7 / 90,0	1,7 / 79,8	16,7 / 86,1	2,8 / 84,8	0,7 / 82,3	0,6 / 98,8	11,0 / 16,2
+0,025 mm	[%]	1,2 / 91,2	2,5 / 82,3	4,6 / 90,7	2,1 / 86,9	3,7 / 86,0	0,1 / 98,9	19,9 / 36,1
+0 mm	[%]	8,8 / 100,0	17,7 / 100,0	9,3 / 100,0	13,1 / 100,0	14,0 / 100,0	1,1 / 100,0	63,9 / 100,0
D-80	[mm]	3,907	3,748	4,509	3,571	2,993	0,724	0,037
D-50	[mm]	1,671	0,800	0,470	1,082	1,001	0,374	0,020

Tabela IV.4 - Propriedades químicas e físicas dos aditivos utilizados nas misturas de sinterização da Ásia

Designação		Calcário	Olivina	Areia	Coque	Cal virgem	Cal hidratada
		V 6489 E 8381	7116/7 E 11859.7	7316/11 E 12218.6	7204/9 E 12442.9	E 13564	E 13565
Umidade	[%]	-	6,3	3,5	-	-	-
Análise química							
Fe _{tot}	[%]	0,25	6,25	1,02	1,32	0,25	0,17
FeO	[%]	0,15	5,31	0,82	-	<0,1	<0,1
SiO ₂	[%]	0,96	41,00	97,00	6,82	1,79	0,49
Al ₂ O ₃	[%]	0,20	0,61	0,40	3,36	0,29	0,20
CaO	[%]	54,90	0,43	0,28	0,95	94,70	73,80
MgO	[%]	0,50	47,50	0,14	0,20	1,16	0,76
P	[%]	0,003	0,002	0,005	0,037	0,005	0,003
S	[%]	0,020	0,014	0,020	0,700	0,052	0,027
Na ₂ O	[%]	0,010	0,030	0,020	0,170	0,060	0,040
K ₂ O	[%]	0,050	0,045	0,050	0,220	0,060	0,030
Mn	[%]	0,030	0,084	0,020	0,007	0,054	0,040
TiO ₂	[%]	0,010	0,013	0,030	0,160	0,013	0,010
V	[%]	<0,001	<0,001	0,004	0,007	<0,001	<0,001
P.P.C.	[%]	43,02	1,34	0,68	86,05	1,54	24,44
Granulometria							
+10 mm	[%]	0,0 / 0,0	0,0 / 0,0	0,0 / 0,0	1,1 / 1,1		
+8 mm	[%]	0,0 / 0,0	0,1 / 0,1	0,0 / 0,0	2,1 / 3,2		
+6,3 mm	[%]	0,0 / 0,0	0,4 / 0,5	0,0 / 0,0	4,9 / 8,1		
+5,0 mm	[%]	0,1 / 0,1	1,2 / 1,7	0,1 / 0,1	8,8 / 16,9		
+4,0 mm	[%]	0,2 / 0,3	1,2 / 2,9	0,1 / 0,2	8,1 / 25,0		
+3,15 mm	[%]	2,3 / 2,6	2,4 / 5,3	0,2 / 0,4	9,8 / 34,8		
+2,5 mm	[%]	21,3 / 23,9	4,1 / 9,4	0,2 / 0,6	15,6 / 50,4		
+1,0 mm	[%]	28,8 / 52,7	8,4 / 17,8	0,5 / 1,1	16,0 / 66,4		
+0,5 mm	[%]	15,4 / 68,1	7,3 / 25,1	25,6 / 26,7	9,4 / 75,8		
+0,315 mm	[%]	9,0 / 77,1	23,2 / 48,3	23,8 / 50,5	4,4 / 80,2		
+0,200 mm	[%]	6,2 / 83,3	14,6 / 62,9	16,8 / 67,3	4,0 / 84,2		
+0,160 mm	[%]	0,0 / 83,3	0,0 / 62,9	6,9 / 74,2	2,1 / 86,3		
+0,100 mm	[%]	4,8 / 88,1	17,3 / 80,2	10,1 / 84,3	3,8 / 90,1		
+0,063 mm	[%]	1,2 / 89,3	6,9 / 87,1	4,4 / 88,7	2,8 / 92,9		
+0,040 mm	[%]	0,5 / 89,8	4,0 / 91,1	2,9 / 91,6	2,1 / 95,0		
+0,025 mm	[%]	0,7 / 90,5	2,2 / 93,3	1,6 / 93,2	1,6 / 96,6		
+0 mm	[%]	9,5 / 100,0	6,7 / 100,0	6,8 / 100,0	3,4 / 100,0		
D-80	[mm]	2,618	0,851	0,631	4,619		
D-50	[mm]	1,142	0,301	0,319	2,518		

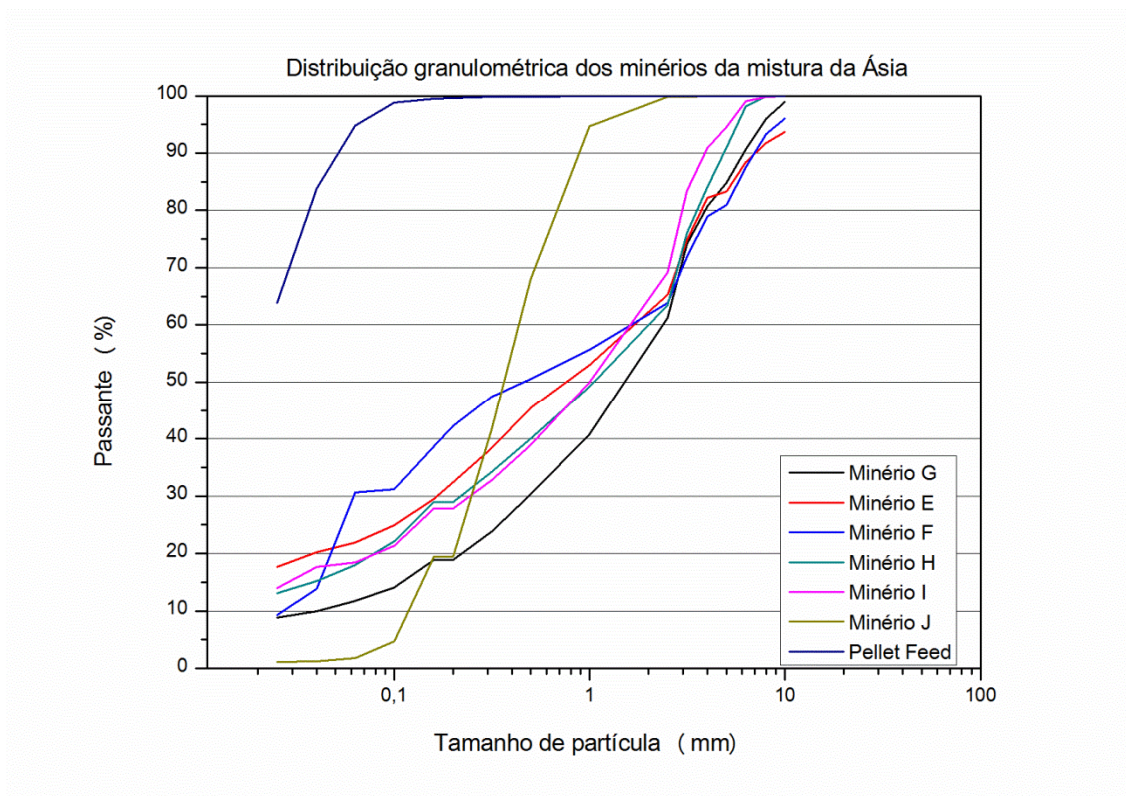


Figura 4.3 - Gráfico da distribuição granulométrica dos minérios constituintes das misturas da Ásia.

4.1.3 Avaliação do *pellet screenings* Samarco em uma mistura de sinterização da Europa

A avaliação de desempenho do produto *pellet screenings* quanto à sinterabilidade foi realizada utilizando-se, como referência, uma mistura de sinterização constituída por quatro diferentes minérios de ferro e retorno de finos. A escolha dessa mistura baseou-se no blend de minérios utilizados pela maioria das siderúrgicas da Europa Ocidental. O minério A é um *sinter feed* originário da região Norte do Brasil, o minério B é um *sinter feed* originário da região Sudeste do Brasil, o minério C é um concentrado originário do Canadá e o minério D é um concentrado originário da Mauritânia. A tabela IV.5 mostra as propriedades químicas e físicas dos minérios constituintes das misturas de sinterização da Europa Ocidental. A tabela IV.6 mostra as propriedades químicas e físicas dos aditivos utilizados nas misturas de sinterização da Europa Ocidental e a figura 4.4 mostra um gráfico com a distribuição granulométrica dos minérios constituintes das misturas da Europa Ocidental.

Tabela IV.5 - Propriedades químicas e físicas dos minérios constituintes das misturas da Europa

Ocidental

Denominação		Minério A	Minério B	Finos de retorno	Minério C	Minério D	<i>Pellet screenings Samarco</i>
SGA No.		7227/1	7227/2	7356/4	6489	7356/3	7377/1
SGA E-No.		E 12561	E 12559		E 10885		E 13692
Umidade	[%]	3,9	2,5	0,6	0,9	2,5	5,5
Análise Química							
Fe _{tot}	[%]	65,32	63,79	56,01	65,64	65,36	67,23
FeO	[%]	0,20	0,76	7,86	11,26	26,88	0,29
SiO ₂	[%]	2,42	5,47	5,33	4,39	7,26	1,76
Al ₂ O ₃	[%]	1,14	0,78	1,44	0,18	0,55	0,51
CaO	[%]	0,06	0,34	11,95	0,45	0,41	0,77
MgO	[%]	0,07	0,17	0,65	0,47	0,55	0,13
P	[%]	0,016	0,047	0,031	0,006	0,013	0,046
S	[%]	0,005	0,005	0,032	0,007	0,023	0,008
Na ₂ O	[%]	0,030	0,004	0,019	<0,005	0,051	0,033
K ₂ O	[%]	0,025	0,015	0,050	<0,005	0,081	0,014
Mn	[%]	0,670	0,150	0,460	0,132	0,030	0,073
TiO ₂	[%]	0,056	0,059	0,084	0,036	0,170	0,044
V	[%]	0,004	0,005	0,005	0,004	0,002	0,002
P.P.C.	[%]	1,82	1,69	0,53	1,64	0,38	0,41
Granulometria							
+10 mm	[%]	0,6 / 0,6	1,6 / 1,6	0,0 / 0,0	0,0 / 0,0	0,1 / 0,1	
+8 mm	[%]	7,6 / 8,2	5,0 / 6,6	0,3 / 0,3	0,0 / 0,0	0,0 / 0,1	0,5 / 0,5
+6,3 mm	[%]	3,4 / 11,6	5,9 / 12,5	10,2 / 10,5	0,0 / 0,0	0,1 / 0,2	8,4 / 8,9
+5,0 mm	[%]	5,1 / 16,7	6,5 / 19,0	27,3 / 37,8	0,0 / 0,0	0,1 / 0,3	
+4,0 mm	[%]	1,1 / 17,8	2,1 / 21,1	13,5 / 51,3	0,0 / 0,0	0,0 / 0,3	
+3,15 mm	[%]	7,4 / 25,2	7,0 / 28,1	12,7 / 64,0	0,0 / 0,0	0,1 / 0,4	42,9 / 51,8
+2,5 mm	[%]	9,5 / 34,7	8,0 / 36,1	14,6 / 78,6	0,1 / 0,1	1,1 / 1,5	
+1,0 mm	[%]	12,3 / 47,0	8,2 / 44,3	9,7 / 88,3	2,1 / 2,2	7,3 / 8,8	20,4 / 72,2
+0,5 mm	[%]	7,6 / 54,6	5,2 / 49,5	4,8 / 93,1	5,4 / 7,6	13,6 / 22,4	2,3 / 74,5
+0,315 mm	[%]	7,1 / 61,7	3,1 / 52,6	2,2 / 95,3	13,9 / 21,5	14,0 / 36,4	0,9 / 75,4
+0,200 mm	[%]	5,9 / 67,6	5,1 / 57,7	1,5 / 96,8	21,9 / 43,4	14,8 / 51,2	0,9 / 76,3
+0,160 mm	[%]	2,9 / 70,5	3,6 / 61,3	0,0 / 96,8	0,0 / 43,4	0,0 / 51,2	
+0,100 mm	[%]	4,6 / 75,1	7,5 / 68,8	1,4 / 98,2	37,1 / 80,5	19,2 / 70,4	1,2 / 77,5
+0,063 mm	[%]	3,0 / 78,1	0,6 / 69,4	0,4 / 98,6	14,3 / 94,8	9,4 / 79,8	1,3 / 78,8
+0,040 mm	[%]	1,7 / 79,8	16,7 / 86,1	0,3 / 98,9	3,4 / 98,2	6,1 / 85,9	2,8 / 81,6
+0,025 mm	[%]	2,5 / 82,3	4,6 / 90,7	0,2 / 99,1	0,6 / 98,8	4,3 / 90,2	5,1 / 86,7
+0 mm	[%]	17,7 / 100,0	9,3 / 100,0	0,9 / 100,0	1,2 / 100,0	9,8 / 100,0	13,3 / 100,0
D-80	[mm]	3,748	4,509	5,848	0,334	0,589	5,485
D-50	[mm]	0,800	0,470	4,098	0,149	0,209	3,280

Tabela IV.6 - Propriedades químicas e físicas dos aditivos utilizados nas misturas de sinterização da Europa Ocidental

Denominação		Calcário	Olivina	Areia	Coque	Cal Virgem
SGA No, SGA E-No,		V 6489 E 8381	7116/7 E 11859,7	7316/11 E 12218,6	7204/9 E 12442,9	E 13564
Umidade	[%]	-	6,3	3,5	-	-
Análise Química						
Fe _{tot}	[%]	0,25	6,25	1,02	1,32	0,25
FeO	[%]	0,15	5,31	0,82	-	<0,1
SiO ₂	[%]	0,96	41,00	97,00	6,82	1,79
Al ₂ O ₃	[%]	0,20	0,61	0,40	3,36	0,29
CaO	[%]	54,90	0,43	0,28	0,95	94,70
MgO	[%]	0,50	47,50	0,14	0,20	1,16
P	[%]	0,003	0,002	0,005	0,037	0,005
S	[%]	0,020	0,014	0,020	0,700	0,052
Na ₂ O	[%]	0,010	0,030	0,020	0,170	0,060
K ₂ O	[%]	0,050	0,045	0,050	0,220	0,060
Mn	[%]	0,030	0,084	0,020	0,007	0,054
TiO ₂	[%]	0,010	0,013	0,030	0,160	0,013
V	[%]	<0,001	<0,001	0,004	0,007	<0,001
P,P,C,	[%]	43,02	1,34	0,68	86,05	1,54
Granulometria						
+10 mm	[%]	0,0 / 0,0	0,0 / 0,0	0,0 / 0,0	1,1 / 1,1	
+8 mm	[%]	0,0 / 0,0	0,1 / 0,1	0,0 / 0,0	2,1 / 3,2	
+6,3 mm	[%]	0,0 / 0,0	0,4 / 0,5	0,0 / 0,0	4,9 / 8,1	
+5,0 mm	[%]	0,1 / 0,1	1,2 / 1,7	0,1 / 0,1	8,8 / 16,9	
+4,0 mm	[%]	0,2 / 0,3	1,2 / 2,9	0,1 / 0,2	8,1 / 25,0	
+3,15 mm	[%]	2,3 / 2,6	2,4 / 5,3	0,2 / 0,4	9,8 / 34,8	
+2,5 mm	[%]	21,3 / 23,9	4,1 / 9,4	0,2 / 0,6	15,6 / 50,4	
+1,0 mm	[%]	28,8 / 52,7	8,4 / 17,8	0,5 / 1,1	16,0 / 66,4	
+0,5 mm	[%]	15,4 / 68,1	7,3 / 25,1	25,6 / 26,7	9,4 / 75,8	
+0,315 mm	[%]	9,0 / 77,1	23,2 / 48,3	23,8 / 50,5	4,4 / 80,2	
+0,200 mm	[%]	6,2 / 83,3	14,6 / 62,9	16,8 / 67,3	4,0 / 84,2	
+0,160 mm	[%]	0,0 / 83,3	0,0 / 62,9	6,9 / 74,2	2,1 / 86,3	
+0,100 mm	[%]	4,8 / 88,1	17,3 / 80,2	10,1 / 84,3	3,8 / 90,1	
+0,063 mm	[%]	1,2 / 89,3	6,9 / 87,1	4,4 / 88,7	2,8 / 92,9	
+0,040 mm	[%]	0,5 / 89,8	4,0 / 91,1	2,9 / 91,6	2,1 / 95,0	
+0,025 mm	[%]	0,7 / 90,5	2,2 / 93,3	1,6 / 93,2	1,6 / 96,6	
+0 mm	[%]	9,5 / 100,0	6,7 / 100,0	6,8 / 100,0	3,4 / 100,0	
D-80	[mm]	2,618	0,851	0,631	4,619	
D-50	[mm]	1,142	0,301	0,319	2,518	

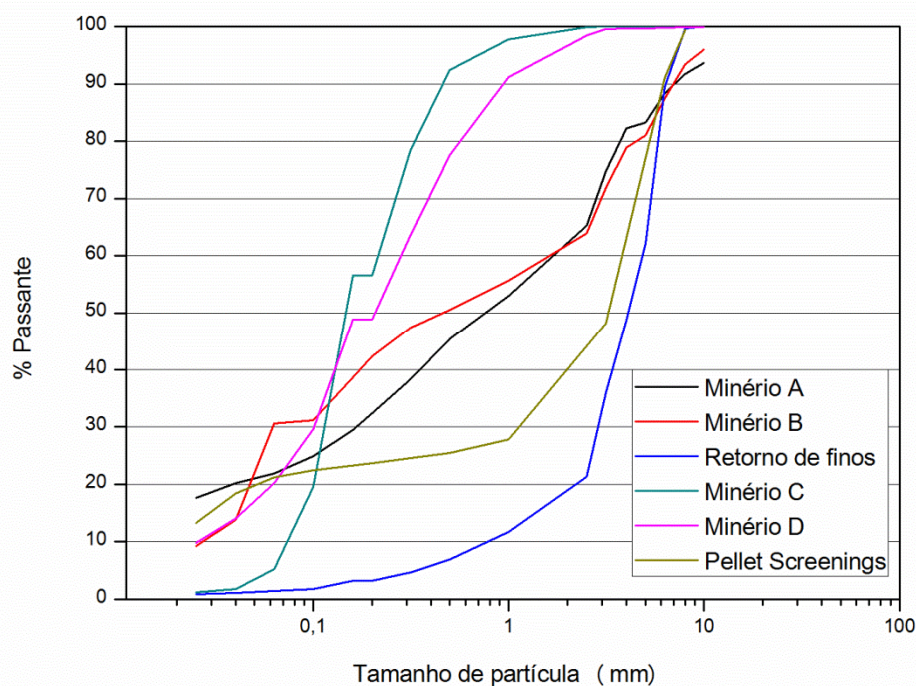


Figura 4.4 - Gráfico da distribuição granulométrica dos minérios constituintes das misturas da Europa Ocidental.

4.1.4 Pellet screenings Samarco em uma mistura de sinterização da Ásia

A avaliação de desempenho do produto *pellet screenings* quanto à sinterabilidade foi realizada utilizando-se, como referência, uma mistura de sinterização constituída por seis diferentes tipos de minérios de ferro. A escolha dessa mistura baseou-se no blend de minérios utilizados pela maioria das siderúrgicas da Ásia. O minério E é um *sinter feed* originário da região Norte do Brasil, O minério F é um *sinter feed* originário da região Sudeste do Brasil, o minério G é um *sinter feed* originário da Austrália com alta perda por calcinação (PPC), o minério H é um *sinter feed* originário da Austrália, o minério I é um *sinter feed* originário da Austrália e o minério J é um concentrado originário do Canadá. A tabela IV.7 mostra as propriedades químicas e físicas dos minérios constituintes das misturas de sinterização da Ásia. A tabela IV.8 mostra as propriedades químicas e físicas dos aditivos utilizados nas misturas de sinterização da

Ásia e a figura 4.5 apresenta a distribuição granulométrica dos minérios constituintes das misturas da Ásia.

Tabela IV.7 - Propriedades químicas e físicas dos minérios constituintes das misturas da Ásia

Denominação	Minério G	Minério E	Minério F	Minério H	Minério I	Minério J	Pellet screenings Samarco
SGA No.	6489	7227/1	7227/2	5785.2.b	6489	6493	7377/1
SGA E-No.	E 7365	E 12561	E 12559	E 3726	E 7334	E 6829	E 13692
Umidade [%]	8,2	3,9	2,5	3,7	5,4	0,5	5,5
Análise Química							
Fe _{tot} [%]	57,93	65,32	63,79	61,82	62,69	66,93	67,23
FeO [%]	0,23	0,20	0,76	0,27	0,35	1,42	0,29
SiO ₂ [%]	5,14	2,42	5,47	5,95	3,90	3,60	1,76
Al ₂ O ₃ [%]	1,35	1,14	0,78	2,43	2,20	0,30	0,51
CaO [%]	0,07	0,06	0,34	0,07	0,05	0,07	0,77
MgO [%]	0,08	0,07	0,17	0,07	0,22	0,04	0,13
P [%]	0,041	0,016	0,047	0,066	0,065	0,013	0,046
S [%]	0,011	0,005	0,005	0,017	0,013	0,002	0,008
Na ₂ O [%]	0,011	0,030	0,004	0,025	0,008	0,007	0,033
K ₂ O [%]	0,010	0,025	0,015	0,024	0,019	0,011	0,014
Mn [%]	0,032	0,670	0,150	0,073	0,198	0,021	0,073
TiO ₂ [%]	0,058	0,056	0,059	0,115	0,108	0,180	0,044
V [%]	0,004	0,004	0,005	0,003	0,003	0,005	0,002
P.P.C. [%]	10,33	1,82	1,69	2,73	3,47	0,15	0,41
Granulometria							
+10 mm [%]	1,1 / 1,1	0,6 / 0,6	1,6 / 1,6	0,0 / 0,0	0,0 / 0,0	0,0 / 0,0	
+8 mm [%]	2,9 / 4,0	7,6 / 8,2	5,0 / 6,6	0,1 / 0,1	0,2 / 0,2	0,0 / 0,0	0,5 / 0,5
+6,3 mm [%]	5,3 / 9,3	3,4 / 11,6	5,9 / 12,5	1,8 / 1,9	0,8 / 1,0	0,1 / 0,1	8,4 / 8,9
+5,0 mm [%]	5,8 / 15,1	5,1 / 16,7	6,5 / 19,0	7,1 / 9,0	4,4 / 5,4	0,0 / 0,1	
+4,0 mm [%]	4,2 / 19,3	1,1 / 17,8	2,1 / 21,1	6,9 / 15,9	3,7 / 9,1	0,0 / 0,1	
+3,15 mm [%]	6,6 / 25,9	7,4 / 25,2	7,0 / 28,1	8,1 / 24,0	7,5 / 16,6	0,1 / 0,2	42,9 / 51,8
+2,5 mm [%]	12,8 / 38,7	9,5 / 34,7	8,0 / 36,1	12,5 / 36,5	14,2 / 30,8	0,0 / 0,2	
+1,0 mm [%]	20,5 / 59,2	12,3 / 47,0	8,2 / 44,3	14,3 / 50,8	19,2 / 50,0	5,1 / 5,3	20,4 / 72,2
+0,5 mm [%]	10,5 / 69,7	7,6 / 54,6	5,2 / 49,5	9,2 / 60,0	11,1 / 61,1	26,7 / 32,0	2,3 / 74,5
+0,315 mm [%]	6,5 / 76,2	7,1 / 61,7	3,1 / 52,6	5,8 / 65,8	6,1 / 67,2	26,4 / 58,4	0,9 / 75,4
+0,200 mm [%]	4,9 / 81,1	5,9 / 67,6	5,1 / 57,7	5,3 / 71,1	5,0 / 72,2	22,2 / 80,6	0,9 / 76,3
+0,160 mm [%]	0,0 / 81,1	2,9 / 70,5	3,6 / 61,3	0,0 / 71,1	0,0 / 72,2	0,0 / 80,6	
+0,100 mm [%]	4,8 / 85,9	4,6 / 75,1	7,5 / 68,8	6,8 / 77,9	6,5 / 78,7	14,7 / 95,3	1,2 / 77,5
+0,063 mm [%]	2,4 / 88,3	3,0 / 78,1	0,6 / 69,4	4,1 / 82,0	2,9 / 81,6	2,9 / 98,2	1,3 / 78,8
+0,040 mm [%]	1,7 / 90,0	1,7 / 79,8	16,7 / 86,1	2,8 / 84,8	0,7 / 82,3	0,6 / 98,8	2,8 / 81,6
+0,025 mm [%]	1,2 / 91,2	2,5 / 82,3	4,6 / 90,7	2,1 / 86,9	3,7 / 86,0	0,1 / 98,9	5,1 / 86,7
+0 mm [%]	8,8 / 100,0	17,7 / 100,0	9,3 / 100,0	13,1 / 100,0	14,0 / 100,0	1,1 / 100,0	13,3 / 100,0
D-80 [mm]	3,907	3,748	4,509	3,571	2,993	0,724	5,485
D-50 [mm]	1,671	0,800	0,470	1,082	1,001	0,374	3,280

Tabela IV.8 - Propriedades químicas e físicas dos aditivos utilizados nas misturas de sinterização da Ásia

Denominação		Calcário	Olivina	Areia	Coque	Cal Virgem
		V 6489 E 8381	7116/7 E 11859,7	7316/11 E 12218,6	7204/9 E 12442,9	E 13564
Umidade	[%]	-	6,3	3,5	-	-
Análise Química						
Fe _{tot}	[%]	0,25	6,25	1,02	1,32	0,25
FeO	[%]	0,15	5,31	0,82	-	<0,1
SiO ₂	[%]	0,96	41,00	97,00	6,82	1,79
Al ₂ O ₃	[%]	0,20	0,61	0,40	3,36	0,29
CaO	[%]	54,90	0,43	0,28	0,95	94,70
MgO	[%]	0,50	47,50	0,14	0,20	1,16
P	[%]	0,003	0,002	0,005	0,037	0,005
S	[%]	0,020	0,014	0,020	0,700	0,052
Na ₂ O	[%]	0,010	0,030	0,020	0,170	0,060
K ₂ O	[%]	0,050	0,045	0,050	0,220	0,060
Mn	[%]	0,030	0,084	0,020	0,007	0,054
TiO ₂	[%]	0,010	0,013	0,030	0,160	0,013
V	[%]	<0,001	<0,001	0,004	0,007	<0,001
P,P,C,	[%]	43,02	1,34	0,68	86,05	1,54
Granulometria						
+10 mm	[%]	0,0 / 0,0	0,0 / 0,0	0,0 / 0,0	1,1 / 1,1	
+8 mm	[%]	0,0 / 0,0	0,1 / 0,1	0,0 / 0,0	2,1 / 3,2	
+6,3 mm	[%]	0,0 / 0,0	0,4 / 0,5	0,0 / 0,0	4,9 / 8,1	
+5,0 mm	[%]	0,1 / 0,1	1,2 / 1,7	0,1 / 0,1	8,8 / 16,9	
+4,0 mm	[%]	0,2 / 0,3	1,2 / 2,9	0,1 / 0,2	8,1 / 25,0	
+3,15 mm	[%]	2,3 / 2,6	2,4 / 5,3	0,2 / 0,4	9,8 / 34,8	
+2,5 mm	[%]	21,3 / 23,9	4,1 / 9,4	0,2 / 0,6	15,6 / 50,4	
+1,0 mm	[%]	28,8 / 52,7	8,4 / 17,8	0,5 / 1,1	16,0 / 66,4	
+0,5 mm	[%]	15,4 / 68,1	7,3 / 25,1	25,6 / 26,7	9,4 / 75,8	
+0,315 mm	[%]	9,0 / 77,1	23,2 / 48,3	23,8 / 50,5	4,4 / 80,2	
+0,200 mm	[%]	6,2 / 83,3	14,6 / 62,9	16,8 / 67,3	4,0 / 84,2	
+0,160 mm	[%]	0,0 / 83,3	0,0 / 62,9	6,9 / 74,2	2,1 / 86,3	
+0,100 mm	[%]	4,8 / 88,1	17,3 / 80,2	10,1 / 84,3	3,8 / 90,1	
+0,063 mm	[%]	1,2 / 89,3	6,9 / 87,1	4,4 / 88,7	2,8 / 92,9	
+0,040 mm	[%]	0,5 / 89,8	4,0 / 91,1	2,9 / 91,6	2,1 / 95,0	
+0,025 mm	[%]	0,7 / 90,5	2,2 / 93,3	1,6 / 93,2	1,6 / 96,6	
+0 mm	[%]	9,5 / 100,0	6,7 / 100,0	6,8 / 100,0	3,4 / 100,0	
D-80	[mm]	2,618	0,851	0,631	4,619	
D-50	[mm]	1,142	0,301	0,319	2,518	

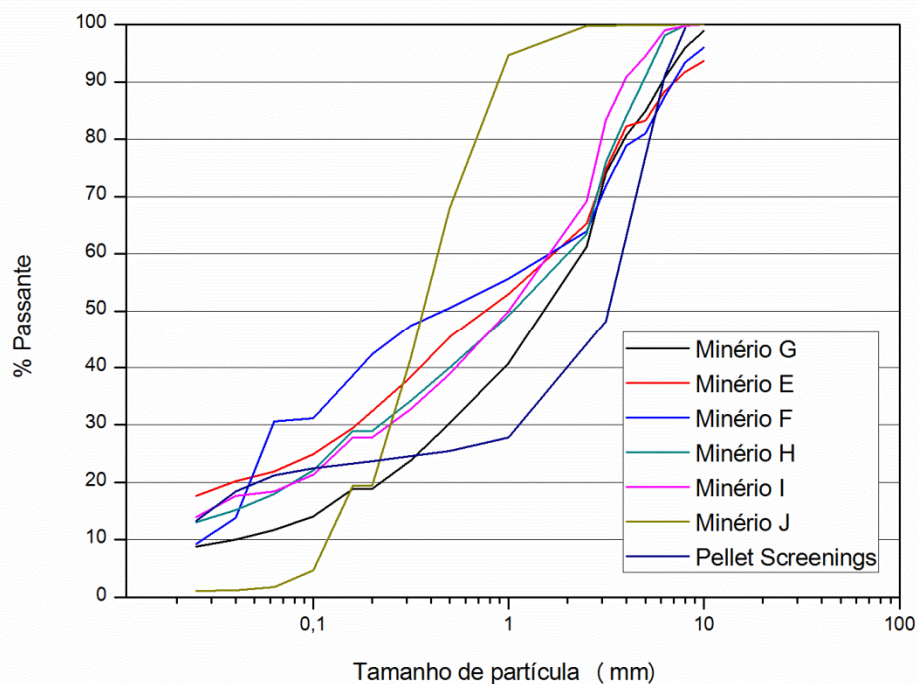


Figura 4.5 - Gráfico da distribuição granulométrica dos minérios constituintes das misturas da Ásia.

4.2 Planejamento dos ensaios de sinterabilidade

4.2.1 Ensaios de sinterização com *pellet feed* Samarco em substituição de minérios em misturas de sinterização de referência da Europa Ocidental e da Ásia

Em ambas as misturas de referência, percentuais de *pellet feed* Samarco foram adicionados, mantendo-se as características químicas dos sínteres produzidos.

Para o ajuste da composição química dos sínteres, calcário, olivina e areia foram utilizados.

Um total de 6 séries de sinterização foram realizadas para cada região e 80 queimas foram realizadas no total. A tabela IV.9 mostra as séries de sinterização da Europa Ocidental e a tabela IV.10 mostra as séries de sinterização da Ásia.

Tabela IV.9 – Séries de sinterização da Europa Ocidental

Séries de sinterização	Referência 1	2	3	4	5	6
Minério A (%)	40	36	32	32	28	24
Minério B (%)	35	31,5	28	28	24,5	21
Finos de retorno (%)	10	9	8	8	7	6
Minério C (%)	8	7,2	6,4	6,4	5,6	4,8
Minério D (%)	7	6,3	5,6	5,6	4,9	4,2
Pellet feed (%)	-	10	20	-	-	-
Pellet feed pré-aglomerado (%)	-	-	-	20	30	40
Total	100	100	100	100	100	100

Tabela IV.10 – Séries de sinterização da Ásia

Séries de sinterização	Referência 7	8	9	10	11	12
Minério E (%)	20	18	16	16	14	12
Minério F (%)	15	13,5	12	12	10,5	9
Minério G (%)	50	45	40	40	35	20
Minério H (%)	5	4,5	4	4	3,5	3
Minério I (%)	5	4,5	4	4	3,5	3
Minério J	5	4,5	4	4	3,5	3
Pellet feed (%)	-	10	20	-	-	-
Pellet feed pré-aglomerado (%)	-	-	-	20	30	40
Total	100	100	100	100	100	100

A tabela IV.11 mostra as propriedades químicas e físicas das séries de sinterização da Europa Ocidental, a tabela IV.12 mostra as propriedades químicas e físicas das séries de sinterização da Ásia, a figura 4.6 apresenta a distribuição granulométrica das misturas com as diferentes adições de *pellet feed* nas séries de sinterização da Europa Ocidental e

a figura 4.7 apresenta a distribuição granulométricas das misturas com as diferentes adições de *pellet feed* nas séries de sinterização da Ásia.

Tabela IV.11 - Propriedades químicas e físicas das séries de sinterização da Europa Ocidental

Designação	Mistura referência Europa Ocidental	10% Pellet feed 90% Mist. ref. Europa Ocidental	20% Pellet feed 80% Mist. ref. Europa Ocidental	30% Pellet feed 70% Mist. ref. Europa Ocidental	40% Pellet feed 60% Mist. ref. Europa Ocidental
SGA No.	7356	7356	7356	7356	7356
Umidade [%]					
Análise química					
Fe _{tot} [%]	63,88	64,08	64,27	64,47	64,66
FeO [%]	3,91	3,61	3,32	3,02	2,72
SiO ₂ [%]	4,27	4,01	3,75	3,49	3,22
Al ₂ O ₃ [%]	0,93	0,87	0,82	0,76	0,71
CaO [%]	1,40	1,27	1,15	1,02	0,89
MgO [%]	0,23	0,21	0,19	0,17	0,15
P [%]	0,027	0,030	0,032	0,034	0,037
S [%]	0,009	0,009	0,008	0,008	0,007
Na ₂ O [%]	0,019	0,019	0,018	0,018	0,017
K ₂ O [%]	0,026	0,024	0,022	0,020	0,018
Mn [%]	0,379	0,354	0,329	0,304	0,279
TiO ₂ [%]	0,066	0,063	0,060	0,056	0,053
V [%]	0,004	0,004	0,004	0,004	0,003
P.P.C. [%]	1,53	1,72	1,91	2,10	2,29
Granulometria					
+10 mm [%]	3,9 / 3,9	3,6 / 3,6	3,2 / 3,2	2,8 / 2,8	2,4 / 2,4
+8 mm [%]	1,7 / 5,6	1,5 / 5,1	1,3 / 4,5	1,1 / 3,9	1,0 / 3,4
+6,3 mm [%]	4,5 / 10,1	4,0 / 9,1	3,6 / 8,1	3,2 / 7,1	2,6 / 6,0
+5,0 mm [%]	7,0 / 17,1	6,3 / 15,4	5,6 / 13,7	4,9 / 12,0	4,3 / 10,3
+4,0 mm [%]	2,6 / 19,7	2,3 / 17,7	2,0 / 15,7	1,8 / 13,8	1,5 / 11,8
+3,15 mm [%]	6,7 / 26,4	6,0 / 23,7	5,4 / 21,1	4,7 / 18,5	4,0 / 15,8
+2,5 mm [%]	8,1 / 34,5	7,3 / 31,0	6,5 / 27,6	5,6 / 24,1	4,9 / 20,7
+1,0 mm [%]	9,4 / 43,9	8,5 / 39,5	7,5 / 35,1	6,7 / 30,8	5,7 / 26,4
+0,5 mm [%]	6,7 / 50,6	6,1 / 45,6	5,4 / 40,5	4,7 / 35,5	4,0 / 30,4
+0,315 mm [%]	6,3 / 56,9	5,6 / 51,2	5,1 / 45,6	4,4 / 39,9	3,8 / 34,2
+0,200 mm [%]	7,0 / 63,9	6,4 / 57,6	5,7 / 51,2	5,0 / 44,9	4,3 / 38,5
+0,160 mm [%]	2,5 / 66,4	2,2 / 59,8	2,0 / 53,2	1,7 / 46,6	1,5 / 40,0
+0,100 mm [%]	8,9 / 75,3	8,1 / 67,9	7,3 / 60,5	6,5 / 53,1	5,6 / 45,6
+0,063 mm [%]	3,3 / 78,6	3,3 / 71,2	3,4 / 63,9	3,5 / 56,6	3,6 / 49,2
+0,040 mm [%]	7,2 / 85,8	7,7 / 78,9	8,0 / 71,9	8,3 / 64,9	8,8 / 58,0
+0,025 mm [%]	3,0 / 88,8	4,6 / 83,5	6,3 / 78,2	8,1 / 73,0	9,7 / 67,7
+0 mm [%]	11,2 / 100,0	16,5 / 100,0	21,8 / 100,0	27,0 / 100,0	32,3 / 100,0
D-80 [mm]	3,956	3,674	3,322	2,973	2,593
D-50 [mm]	0,547	0,355	0,225	0,129	0,061

Tabela IV.12 - Propriedades químicas e físicas das séries de sinterização da Ásia

Designação	Mistura referência Ásia	10% Pellet feed 90% Mistura referência Ásia	20% Pellet feed 80% Mistura referência Ásia	30% Pellet feed 70% Mistura referência Ásia	40% Pellet feed 60% Mistura referência Ásia
SGA No.	7356	7356	7356	7356	7356
Umidade [%]					
Análise química					
Fe _{tot} [%]	61,17	61,64	62,10	62,57	63,03
FeO [%]	0,37	0,43	0,48	0,54	0,59
SiO ₂ [%]	4,55	4,26	3,97	3,68	3,39
Al ₂ O ₃ [%]	1,27	1,18	1,09	1,00	0,91
CaO [%]	0,11	0,11	0,11	0,11	0,12
MgO [%]	0,09	0,09	0,08	0,08	0,07
P [%]	0,038	0,039	0,041	0,042	0,043
S [%]	0,009	0,008	0,008	0,007	0,007
Na ₂ O [%]	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014
K ₂ O [%]	0,015	0,014	0,013	0,013	0,012
Mn [%]	0,187	0,181	0,176	0,170	0,164
TiO ₂ [%]	0,069	0,066	0,062	0,058	0,055
V [%]	0,004	0,004	0,004	0,003	0,003
P.P.C. [%]	6,10	5,83	5,57	5,30	5,03
Granulometria					
+10 mm [%]	2,4 / 2,4	2,2 / 2,2	1,9 / 1,9	1,7 / 1,7	1,5 / 1,5
+8 mm [%]	2,3 / 4,7	2,0 / 4,2	1,8 / 3,7	1,6 / 3,3	1,3 / 2,8
+6,3 mm [%]	4,3 / 9,0	3,9 / 8,1	3,5 / 7,2	3,0 / 6,3	2,6 / 5,4
+5,0 mm [%]	5,5 / 14,5	4,9 / 13,0	4,4 / 11,6	3,8 / 10,1	3,3 / 8,7
+4,0 mm [%]	3,1 / 17,6	2,9 / 15,9	2,5 / 14,1	2,2 / 12,3	1,9 / 10,6
+3,15 mm [%]	6,6 / 24,2	5,9 / 21,8	5,3 / 19,4	4,7 / 17,0	4,0 / 14,6
+2,5 mm [%]	10,9 / 35,1	9,8 / 31,6	8,7 / 28,1	7,6 / 24,6	6,4 / 21,0
+1,0 mm [%]	15,8 / 50,9	14,2 / 45,8	12,7 / 40,8	11,1 / 35,7	9,6 / 30,6
+0,5 mm [%]	9,9 / 60,8	9,0 / 54,8	7,9 / 48,7	6,9 / 42,6	6,0 / 36,6
+0,315 mm [%]	7,1 / 67,9	6,3 / 61,1	5,7 / 54,4	5,0 / 47,6	4,4 / 40,8
+0,200 mm [%]	6,1 / 73,9	5,5 / 66,6	4,8 / 59,2	4,3 / 51,8	3,7 / 44,5
+0,160 mm [%]	1,1 / 75,0	1,0 / 67,6	0,9 / 60,1	0,8 / 52,7	0,7 / 45,2
+0,100 mm [%]	5,9 / 80,9	5,3 / 72,9	4,8 / 64,9	4,3 / 57,0	3,8 / 49,0
+0,063 mm [%]	2,4 / 83,3	2,6 / 75,5	2,8 / 67,7	2,8 / 59,8	3,0 / 52,0
+0,040 mm [%]	3,8 / 87,1	4,6 / 80,1	5,3 / 73,0	6,0 / 65,9	6,8 / 58,8
+0,025 mm [%]	2,1 / 89,2	3,8 / 83,9	5,6 / 78,6	7,4 / 73,3	9,2 / 68,0
+0 mm [%]	10,8 / 100,0	16,1 / 100,0	21,4 / 100,0	26,7 / 100,0	32,0 / 100,0
D-80 [mm]	3.694	3,41	3.105	2.891	2.605
D-50 [mm]	1.087	0,766	0,457	0,25	0,088

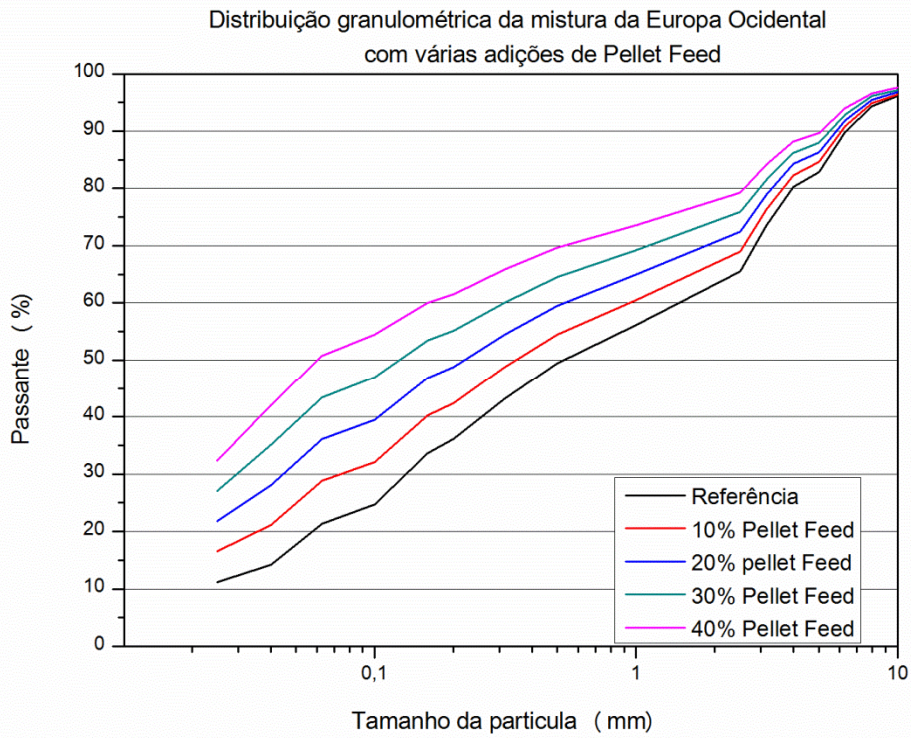


Figura 4.6 - Distribuição granulométrica das misturas com as diferentes adições de *pellet feed* nas séries de sinterização da Europa Ocidental.

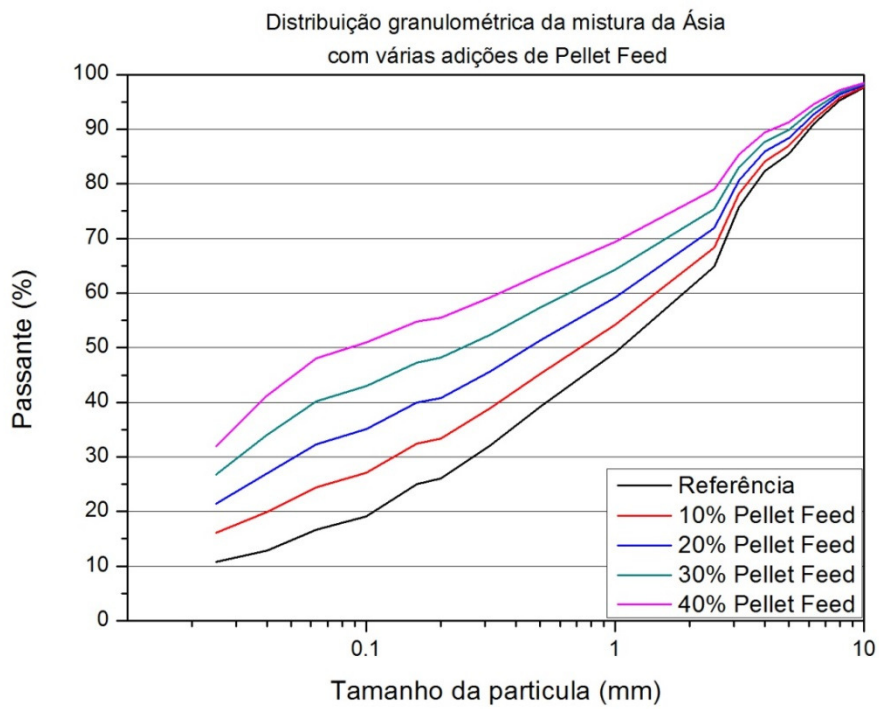


Figura 4.7 - Distribuição granulométricas das misturas com diferentes adições de *pellet feed* nas séries de sinterização da Ásia.

4.2.2 Ensaio de sinterização com *pellet screenings* Samarco em substituição de minérios em misturas de sinterização de referência da Europa Ocidental e da Ásia

Em ambas as misturas de referência, percentuais de *pellet screenings* Samarco foram adicionados, com o cuidado de manter o mais próximo possível as características químicas dos sínteres produzidos.

Para o ajuste da composição química dos sínteres, calcário, olivina e areia foram utilizados.

Cinco séries de sinterização foram realizadas para cada região e 62 queimas foram realizadas no total. A tabela IV.13 mostra as séries de sinterização da Europa Ocidental e a tabela IV.14 mostra as séries de sinterização da Ásia.

Tabela IV.13 – Séries de sinterização da Europa Ocidental

Séries de sinterização	Referência 1	2	3	4	5
Minério A (%)	40	36	32	28	24
Minério B (%)	35	31,5	28	24,5	21
Finos de retorno (%)	10	9	8	7	6
Minério C (%)	8	7,2	6,4	5,6	4,8
Minério D (%)	7	6,3	5,6	4,9	4,2
Pellet screenings (%)	-	10	20	30	40
Total	100	100	100	100	100

Tabela IV.14 – Séries de sinterização da Ásia

Séries de sinterização	Referência 6	7	8	9	10
Minério E (%)	20	18	16	14	12
Minério F (%)	15	13,5	12	10,5	9
Minério G (%)	50	45	40	35	30
Minério H (%)	5	4,5	4	3,5	3
Minério I (%)	5	4,5	4	3,5	3
Minério J	5	4,5	4	3,5	3
Pellet screenings (%)	-	10	20	30	40
Total	100	100	100	100	100

A tabela IV.15 mostra as propriedades químicas e físicas das séries de sinterização da Europa Ocidental, a tabela IV.16 mostra as propriedades químicas e físicas das séries de sinterização da Ásia, a figura 4.8 apresenta a distribuição granulométrica das misturas

com as diferentes adições de *pellet screenings* nas séries de sinterização da Europa Ocidental e a figura 4.9 apresenta a distribuição granulométrica das misturas com as diferentes adições de *pellet screenings* nas séries de sinterização da Ásia.

Tabela IV.15 - Propriedades químicas e físicas das séries de sinterização da Europa Ocidental

Denominação	Mistura referência Europa Ocidental	10% Pellet screenings 90% Mist. ref. Europa Ocidental	20% Pellet screenings 80% Mist. ref. Europa Ocidental	30% Pellet screenings 70% Mist. ref. Europa Ocidental	40% Pellet screenings 60% Mist. ref. Europa Ocidental
SGA No.	7377	7377	7377	7377	7377
Umidade [%]					
Análise Química					
Fe _{tot} [%]	63,88	64,22	64,55	64,89	65,22
FeO [%]	3,91	3,55	3,19	2,83	2,46
SiO ₂ [%]	4,27	4,02	3,77	3,52	3,27
Al ₂ O ₃ [%]	0,93	0,88	0,84	0,80	0,76
CaO [%]	1,40	1,34	1,27	1,21	1,15
MgO [%]	0,23	0,22	0,21	0,20	0,19
P [%]	0,027	0,029	0,031	0,033	0,035
S [%]	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009
Na ₂ O [%]	0,019	0,020	0,022	0,023	0,025
K ₂ O [%]	0,026	0,025	0,024	0,022	0,021
Mn [%]	0,379	0,349	0,318	0,287	0,257
TiO ₂ [%]	0,066	0,064	0,062	0,060	0,057
V [%]	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
P.P.C. [%]	1,53	1,42	1,31	1,20	1,08
Granulometria					
+10 mm [%]	3,9 / 3,9	3,6 / 3,6	3,2 / 3,2	2,8 / 2,8	2,4 / 2,4
+8 mm [%]	1,7 / 5,6	1,5 / 5,1	1,4 / 4,6	1,3 / 4,1	1,2 / 3,6
+6,3 mm [%]	4,5 / 10,1	4,9 / 10,0	5,2 / 9,8	5,6 / 9,7	6,0 / 9,6
+5,0 mm [%]	7,0 / 17,1	7,7 / 17,7	8,5 / 18,3	9,2 / 18,9	9,9 / 19,5
+4,0 mm [%]	2,6 / 19,7	3,8 / 21,5	5,0 / 23,3	6,3 / 25,2	7,5 / 27,0
+3,15 mm [%]	6,7 / 26,4	7,4 / 28,9	8,1 / 31,4	8,8 / 34,0	9,5 / 36,5
+2,5 mm [%]	8,1 / 34,5	8,1 / 37,0	8,2 / 39,6	8,2 / 42,2	8,2 / 44,7
+1,0 mm [%]	9,4 / 43,9	9,7 / 46,7	10,0 / 49,6	10,2 / 52,4	10,5 / 55,2
+0,5 mm [%]	6,7 / 50,6	6,3 / 53,0	5,8 / 55,4	5,4 / 57,8	5,0 / 60,2
+0,315 mm [%]	6,3 / 56,9	5,7 / 58,7	5,2 / 60,6	4,6 / 62,4	4,1 / 64,3
+0,200 mm [%]	7,0 / 63,9	6,5 / 65,2	5,8 / 66,4	5,2 / 67,6	4,6 / 68,9
+0,160 mm [%]	2,5 / 66,4	2,3 / 67,5	2,1 / 68,5	2,0 / 69,6	1,8 / 70,7
+0,100 mm [%]	8,9 / 75,3	8,0 / 75,5	7,2 / 75,7	6,4 / 76,0	5,5 / 76,2
+0,063 mm [%]	3,3 / 78,6	3,1 / 78,6	2,9 / 78,6	2,6 / 78,6	2,5 / 78,7
+0,040 mm [%]	7,2 / 85,8	6,8 / 85,4	6,4 / 85,0	5,9 / 84,5	5,4 / 84,1
+0,025 mm [%]	3,0 / 88,8	3,2 / 88,6	3,4 / 88,4	3,7 / 88,2	3,9 / 88,0
+0 mm [%]	11,2 / 100,0	11,4 / 100,0	11,6 / 100,0	11,8 / 100,0	12,0 / 100,0
D-80 [mm]	3,956	4,393	4,66	4,821	4,929
D-50 [mm]	0,547	0,74	0,962	1,351	1,747

Tabela IV.16 - Propriedades químicas e físicas das séries de sinterização da Ásia

Denominação	Mistura referência Ásia	10% Pellet screenings 90% Mistura referência Ásia	20% Pellet screenings 80% Mistura referência Ásia	30% Pellet screenings 70% Mistura referência Ásia	40% Pellet screenings 60% Mistura referência Ásia
SGA No.	7356	7356	7356	7356	7356
Umidade [%]					
Análise Química					
Fe _{tot} [%]	61,17	61,78	62,38	62,99	63,59
FeO [%]	0,37	0,36	0,35	0,35	0,34
SiO ₂ [%]	4,55	4,27	3,99	3,71	3,43
Al ₂ O ₃ [%]	1,27	1,19	1,12	1,04	0,96
CaO [%]	0,11	0,17	0,24	0,30	0,37
MgO [%]	0,09	0,10	0,10	0,10	0,11
P [%]	0,038	0,039	0,040	0,040	0,041
S [%]	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009
Na ₂ O [%]	0,014	0,016	0,018	0,020	0,022
K ₂ O [%]	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015
Mn [%]	0,187	0,176	0,164	0,153	0,141
TiO ₂ [%]	0,069	0,067	0,064	0,062	0,059
V [%]	0,004	0,004	0,004	0,004	0,003
P.P.C. [%]	6,10	5,53	4,96	4,39	3,82
Granulometria					
+10 mm [%]	2,4 / 2,4	2,2 / 2,2	1,9 / 1,9	1,7 / 1,7	1,5 / 1,5
+8 mm [%]	2,3 / 4,7	2,0 / 4,2	1,9 / 3,8	1,7 / 3,4	1,5 / 3,0
+6,3 mm [%]	4,3 / 9,0	4,8 / 9,0	5,0 / 9,0	5,6 / 9,0	6,0 / 9,0
+5,0 mm [%]	5,5 / 14,5	6,3 / 15,3	7,2 / 16,2	8,0 / 17,0	8,9 / 17,9
+4,0 mm [%]	3,1 / 17,6	4,4 / 19,7	5,5 / 21,7	6,7 / 23,7	7,9 / 25,8
+3,15 mm [%]	6,6 / 24,2	7,3 / 27,0	8,1 / 29,8	8,8 / 32,5	9,5 / 35,3
+2,5 mm [%]	10,9 / 35,1	10,6 / 37,6	10,3 / 40,1	10,1 / 42,6	9,8 / 45,1
+1,0 mm [%]	15,8 / 50,9	15,4 / 53,0	15,1 / 55,2	14,7 / 57,3	14,3 / 59,4
+0,5 mm [%]	9,9 / 60,8	9,0 / 62,2	8,3 / 63,5	7,6 / 64,9	6,9 / 66,3
+0,315 mm [%]	7,1 / 67,9	6,4 / 68,6	5,9 / 69,4	5,2 / 70,1	4,6 / 70,9
+0,200 mm [%]	6,0 / 73,9	5,5 / 74,1	5,0 / 74,4	4,5 / 74,6	3,9 / 74,8
+0,160 mm [%]	1,1 / 75,0	1,1 / 75,2	1,1 / 75,5	1,0 / 75,7	1,1 / 75,9
+0,100 mm [%]	5,9 / 80,9	5,3 / 80,5	4,7 / 80,2	4,2 / 79,9	3,6 / 79,5
+0,063 mm [%]	2,4 / 83,3	2,3 / 82,8	2,2 / 82,4	2,1 / 81,9	2,0 / 81,5
+0,040 mm [%]	3,8 / 87,1	3,8 / 86,6	3,6 / 86,0	3,6 / 85,5	3,4 / 84,9
+0,025 mm [%]	2,1 / 89,2	2,4 / 89,0	2,7 / 88,7	3,0 / 88,5	3,3 / 88,2
+0 mm [%]	10,8 / 100,0	11,0 / 100,0	11,3 / 100,0	11,5 / 100,0	11,8 / 100,0
D-80 [mm]	3,694	3,96	4,306	4,556	4,73
D-50 [mm]	1,087	1,295	1,514	1,744	1,986

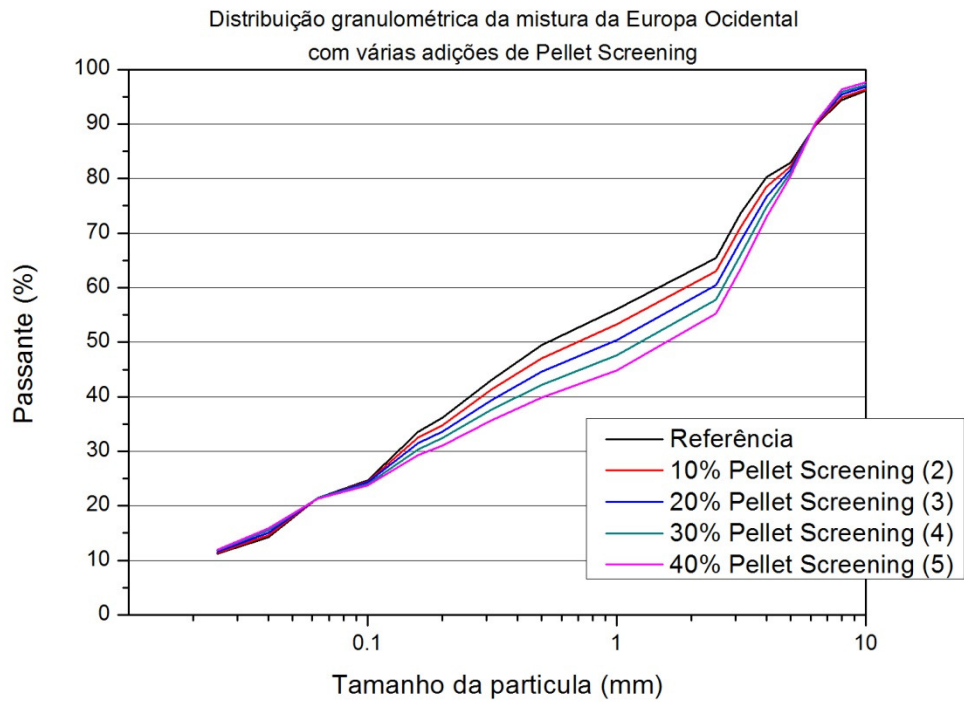


Figura 4.8 - Distribuição granulométrica das misturas com as diferentes adições de *pellet screenings* nas séries de sinterização da Europa Ocidental.

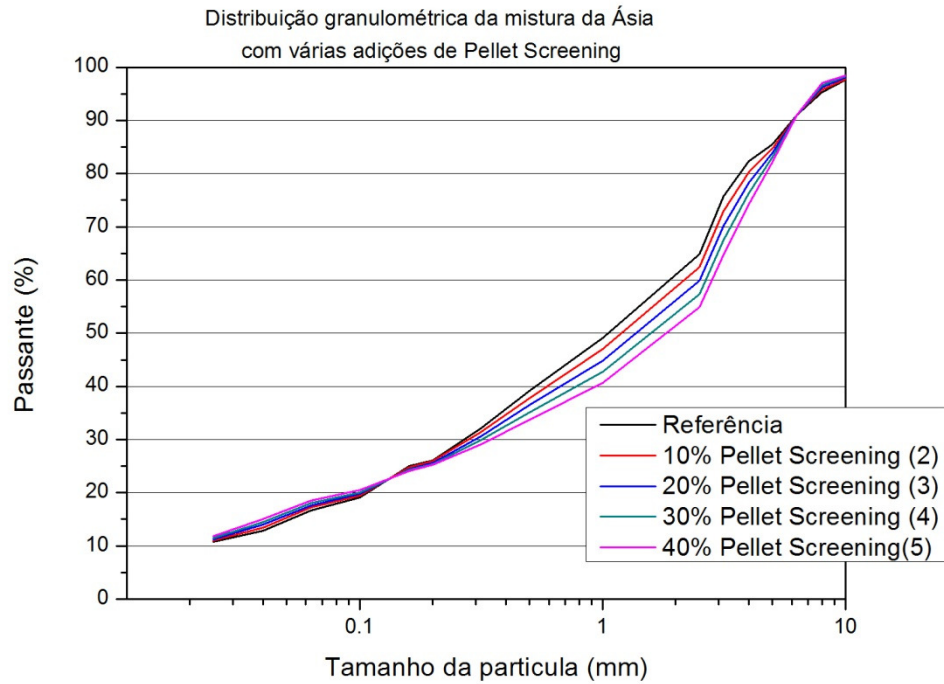


Figura 4.9 - Distribuição granulométricas das misturas com diferentes adições de *pellet screenings* nas séries de sinterização da Ásia.

4.3 Ensaio de sinterabilidade - Padrão SGA

A metodologia, adotada no SGA, 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 síter com características químicas, físicas 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 foram realizadas duas queimas para obtenção de finos de retorno e pelo menos cinco queimas normais para cada condição testada. As condições de controle são: (i) todos os bolos de síter de uma determinada condição de teste devem produzir, após a desagregação, a mesma percentagem de finos de retorno, (ii) as queimas individuais não devem exibir uma divergência superior a 2,5min 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 4.10 mostra a máquina de síter durante a queima.

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 tolerância de 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 síter.

Os parâmetros básicos dos ensaios na máquina piloto de sinterização são:

- i. diâmetro da panela = 450mm;
- ii. altura da panela = 600mm;

- iii. altura da camada = 520mm (mistura + camada de fundo), sendo camada de fundo = 20mm;
- iv. pressão de sucção durante a ignição = de 40 até 160mbar;
- v. pressão de sucção durante a queima = 160mbar;
- vi. tempo de ignição = 90s;
- vii. temperatura de ignição = 1.220°C;



Figura 4.10 - Máquina de sinter durante a queima.

A qualidade química visada nos sinteres foi a praticada nas plantas de sinterização da Europa Ocidental e Ásia.

Qualidade química visada no sinter da Europa Ocidental:

Fe: ~56,3%

FeO: 7,5+/- 0,5%

SiO₂: 5,9 +/- 0,2%

MgO: 1,0 +/- 0,2%

CaO/SiO₂: 1,92 +/- 0,1

Qualidade química visada no sinter da Ásia:

Fe: ~57,7%

FeO: 8+/- 0,5%

SiO₂: 5,5+/- 0,2%

MgO: 1,0 +/- 0,2%

CaO/SiO₂: 1,8 +/- 0,1

Para o ajuste da composição química da mistura a ser sinterizada, calcário, olivina e areia foram utilizados. Cal virgem foi adicionada para aumentar a performance de sinterização na razão de 0,8% para as misturas de sinterização da Europa Ocidental e 1,0% para as da Ásia.

Para cada série, testes iniciais foram realizados para o ajuste do balanço de retorno de finos numa razão entre 0,95 e 1,05. Após o acerto do balanço de retorno de finos e valor de FeO, a umidade da mistura de sinterização foi modificada até se atingir a produtividade ótima.

Para todos os testes de sinterização convencional com *pellet feed* e *pellet screenings* as misturas de minérios foram preparadas como a seguir:

- mistura de todos os minérios e aditivos em um misturador Cyclos por 4 minutos com umidade natural, (a figura 4.11 mostra esse equipamento);
- adição de água para corrigir a umidade;
- mistura por mais 2 minutos;
- aglomeração em um tambor por 3 minutos. O tambor de aglomeração utilizado é um misturador de cimento convencional, sem as ferramentas de mistura, equipado apenas com duas aletas de 3cm de largura. A figura 4.12 mostra esse equipamento.



Figura 4.11 - Misturador Cyclos.



Figura 4.12 – Tambor de aglomeração.

Após essa etapa, a mistura de sinterização aglomerada foi amostrada para análises químicas e granulométrica e carregada na panela de sinterização. (a figura 4.13 mostra a panela de sinterização carregada com a mistura).



Figura 4.13 – Painel de sinterização carregada com a mistura.

Para os testes com pré-aglomeração com *pellet feed* Samarco, um tratamento prévio foi realizado em um misturador intensivo EIRICH modelo R05T, antes de ser misturado aos outros minérios no tambor de aglomeração. (a figura 4.14 mostra esse equipamento).



Figura 4.14 - Misturador intensivo EIRICH modelo R05T.

A seguinte metodologia de pré-aglomeração foi adotada:

-Mistura do *pellet feed* Samarco e o aglomerante (cal hidratada) por 60 segundos em modo contrafluxo da panela e a ferramenta de mistura com velocidade de 600rpm;

- Manter a mistura por 200 segundos em modo contrafluxo da panela e a ferramenta de mistura com velocidade de 200rpm. Nesse momento as micropelotas são formadas;
- Continuar por 60 segundos sem a ferramenta de mistura para estabilização das micropelotas;

Após essa etapa de pré-aglomeração, as micropelotas são misturadas aos outros minérios e aditivos no processo convencional de sinterização descrito anteriormente.

Os parâmetros de queima descritos anteriormente foram os aplicados para as condições de sinterização. A figura 4.15 mostra o aspecto do bolo de sínter na panela após a etapa de queima.



Figura 4.15 – Aspecto do bolo de sínter na panela após a queima.

O bolo de sínter foi resfriado ao ar e seguiu depois para um tratamento mecânico. (a figura 4.16 mostra o aspecto do bolo de sínter após o resfriamento).



Figura 4.16 – Bolo de sinter após resfriamento.

4.4 Tratamento mecânico e preparação de amostras para caracterização, química, física e metalúrgica do sinter piloto

Objetivando simular os efeitos do manuseio e transporte sobre o grau de estabilização granulométrica de um sinter industrial, o sinter piloto foi submetido a um tratamento mecânico nos equipamentos de teste de tamboramento e *shatter test*. A figura 4.17 mostra o equipamento para o ensaio de *shatter test* e a figura 4.18 mostra o equipamento para o ensaio de tamboramento.

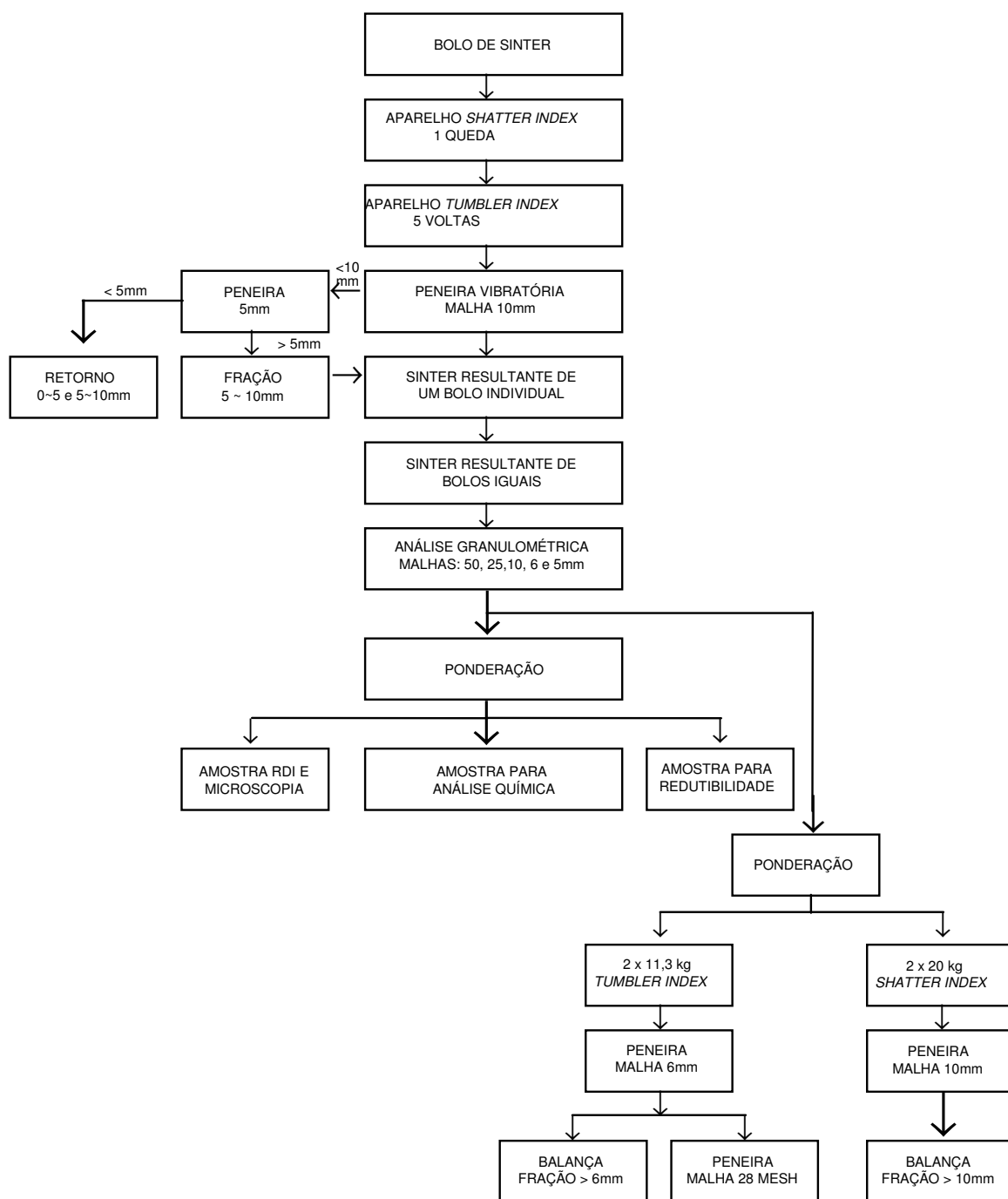


Figura 4.17 – Ensaio *Shatter*.



Figura 4.18 – Ensaio de tamboramento.

A metodologia adotada para o tratamento mecânico e a preparação de amostras para os ensaios de caracterização são descritos na figura 4.19.



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 4.19 – 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 sínter piloto

Para a caracterização física e metalúrgica dos sínteres produzidos, foram utilizados os procedimentos usualmente adotados pelas siderúrgicas de cada região, a saber:

- i. *Sampling and sample preparation procedures*: ISO 3082:2009, ambas regiões.
- ii. *Determination of moisture*: ISO 3087:2011, ambas regiões.
- iii. *Determination of sizing distribution by sieving*: ISO 4701:2008, ambas regiões.
 - resultado expresso percentual das frações de material em mm.
- iv. *Determination of tumble strength and abrasion indices*: ISO 3271:2007
 - resistência ao tamboramento expressa pela fração de material > 6,3mm e o índice de abrasão expresso pela fração <0,5mm.
- v. *Determination of low-temperature reduction desintegration indices by static method – Part1: Reduction with CO, CO₂, H₂ and N₂*: ISO 4696-1:2007, Sínter da Europa Ocidental
 - temperatura: 500°C;
 - resultado expresso pela fração de material >6,3mm, <3,15mm e < 0,5mm;
 - composição do gás redutor 20% CO, 20% CO₂, 2% H₂ e 58% N₂;
 - vazão de gás: 20NL/min.
- vi. *Determination of low-temperature reduction desintegration indices by static method – Part2: Reduction with CO and N₂*: ISO 4696-2:2007, sínter da Ásia.
 - temperatura: 550°C;
 - resultado expresso pela fração de material >6,3mm, <3,15mm, <2,8mm e < 0,5mm;
 - composição do gás redutor 30% CO e 70% N₂;
 - vazão de gás: 15NL/min.

vii. *Determination of reducibility by the rate of reduction index: ISO 4695:2007, sinter Europa Ocidental*

- temperatura: 950°C;

- composição do gás redutor: 40% CO e 60% N₂;

- vazão de gás: 50NL/min.

viii. *Determination of the reducibility by the final degree of reduction index: ISO 7215:2007, sinter da Ásia*

- temperatura: 900°C;

- composição do gás redutor: 30% CO e 70% N₂;

- vazão de gás: 15NL/min.

5. RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios de sinterabilidade dos produtos *pellet feed* e *pellet screenings* participando em misturas de sinterização da Europa Ocidental e da Ásia.

As variações numéricas dos resultados obtidos estão de acordo com as tolerâncias pelas normas de ensaios utilizados.

5.1 Testes de sinterização de *pellet feed* em misturas da Europa Ocidental

5.1.1 Série 1- Séries de referência da mistura Europa Ocidental

Os resultados dos testes de sinterização da série 1 de referência estão listados na tabela V.1. Para essa série nenhum *pellet feed* foi adicionado. Foram realizadas um total de sete queimas, e mais um teste para gerar finos de retorno. O balanço da relação de retorno de finos foi baseada no teor de FeO do sínter obtido em quatro testes com 5,6 partes de coque e a adição de 32 partes de finos de retorno, baseado em 100 partes da mistura de minérios e aditivos. A umidade da mistura de sinterização variou entre 5,6 a 6,2%. Nesses testes a média de produtividade foi de 34,5t/m².24h, com uma taxa de coque entre 64,6 a 65,4kg/t de sínter final. O melhor teste (S17641) alcançou uma produtividade de 35,4t/m².24h. O sínter desse teste foi o escolhido para a análise química, física e metalúrgica.

Tabela V.1 – Resultados dos testes de sinterização da série 1

Séries de sinterização	Série 1 - Mistura referência da Europa Ocidental								
Condições de sinterização									
sucção na ignição / sinterização	[mbar]	40 a 120 / 160							
tempo de ignição / temperatura	[s] / [°C]	90 / 1220							
leito de sínter / camada de forramento	[mm] / [mm]	500 / 20							
trat. do sínter, tamboramento e peneiramento	[rev] / [mm]	70 / 6,3							
Mistura									
<i>Samarco Pellet feed</i>	[pts] / [%]	0,00		/		0,00			
Minério A	[pts] / [%]	40,00		/		32,29			
Minério B	[pts] / [%]	35,00		/		28,25			
Finos de retorno	[pts] / [%]	10,00		/		8,07			
Minério C	[pts] / [%]	8,00		/		6,46			
Minério D	[pts] / [%]	7,00		/		5,65			
	subtotal	100,00				80,73			
Calcário	[pts] / [%]	19,95		/		16,10			
Olivina	[pts] / [%]	1,66		/		1,34			
Areia	[pts] / [%]	1,27		/		1,03			
Cal virgem	[pts] / [%]	0,99		/		0,80			
	[pts] / [%]	123,88		/		100,00			
teste n°		S17633	S17634	S17635	S17636	S17639	S17641	S17638	S17640
mistura de sinterização	[pts]	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
água	[pts]	7,00	9,50	9,55	9,55	9,70	9,90	10,10	10,40
coque	[pts]	4,00	4,50	5,40	5,60	5,60	5,60	5,60	5,60
finos de retorno (seco)	[pts]	RF-Test	32,00	32,00	32,00	32,00	32,00	32,00	32,00
mistura total alimentada (úmida)	[pts]	111,00	146,00	146,95	147,15	147,30	147,50	147,70	148,00
umidade da mist. total alimentada	[%]		5,7	5,6	5,6	5,8	6,0	6,2	6,5
Dados de sinterização									
temperatura de ignição	[°C]	1220							
energia de ignição	[MJ/t s.f.]	199							
temp. de sinterização a 40% da altura do leito	[°C]	n.b.							
vazão do gás de exaustão									
a 60% do tempo do teste	[Nm³/h]	275							
no final do teste	[Nm³/h]	650							
temperaturas no final do teste									
barra de grelha	[°C]	570							
gás de exaustão	[°C]	475							
taxa de sinterização	[mm/min]	19,5							
tempo de sinterização = t [Tmax + 1 min]	[min]	25,6							
consumo de coque	(kg/t s.f.)	51,8							
energia total [ignição e sinterização]	[MJ/t s.f.]	1728							
contração do bolo de sínter	[dH %]	5,0							
retorno de finos sinterizados	[%]	86,9							
rendimento	[%]	57,0							
balanço do ret. dos finos sint [ret. ger./ret.adic.]	[%]	167,0							
produt. final da sinter. [ret. ger./ret.adic.=100]	[t/m².24h]	34,9							
conteúdo de magnetita (pré-amostrado)	[%]	15,2							
conteúdo de FeO (pré-amostrado)	[%]	5,5							
Nota: ***avaliação das propriedades químicas, físicas e metalúrgicas.									
Granulometria das misturas									
		> 3,15	< 1,0	< 0,1	< 0,04				
		mm	mm	mm	mm				
Minérios	[%]	26,4	56,1	24,7	14,2				
Minérios + aditivos	[%]	21,8	55,8	23,1	14,1				
Minérios + aditivos + coque	[%]	22,4	54,7	22,4	13,6				
Minérios + aditivos + coque + finos de retorno	[%]	28,9	46,9	18,2	10,6				

5.1.2 Série 2 – Séries com a adição de 10% de *pellet feed* na mistura de referência da Europa Ocidental

Os resultados de testes de sinterização da série 2 com adição de 10% de *pellet feed* na mistura de referência da Europa Ocidental estão listados na tabela V.2. Foram realizadas um total de seis queimas. Para essa série de testes de sinterização, a adição de 5,65 partes de coque e 32 partes de finos de retorno alcançou o objetivo do teor de FeO. A umidade da mistura de sinterização variou entre 5,9 e 6,1%. Esses testes de sinterização alcançaram uma produtividade média de 31,1t/m².24h, com uma taxa de coque entre 64,4 a 65,7kg/t de sínter final. O melhor teste (S17643) alcançou uma produtividade de 33,6t/m².24h. O sínter desse teste foi o escolhido para a análise química, física e metalúrgica.

Tabela V.2 – Resultados dos testes de sinterização da série 2

Séries de sinterização		Série 2 - Mist. EU Ocidental com 10% pellet feed					
Condições de sinterização							
sucção na ignição / sinterização	[mbar]	40 a 120 / 160					
tempo de ignição / temperatura	[s] / [°C]	90 / 1220					
leito de sínter / camada de forramento	[mm] / [mm]	500 / 20					
trat. do sínter, tamboramento e peneiramento	[rev] / [mm]	70 / 6,3					
Mistura							
<i>Samarco Pellet feed</i>	[pts] / [%]	10,00	/	8,04			
Minério A	[pts] / [%]	36,00	/	28,93			
Minério B	[pts] / [%]	31,50	/	25,31			
Finos de retorno	[pts] / [%]	9,00	/	7,23			
Minério C	[pts] / [%]	7,20	/	5,79			
Minério D	[pts] / [%]	6,30	/	5,06			
	subtotal	100,00		80,36			
Calcário	[pts] / [%]	20,23	/	16,26			
Olivina	[pts] / [%]	1,70	/	1,37			
Areia	[pts] / [%]	1,52	/	1,22			
Cal virgem	[pts] / [%]	0,99	/	0,80			
	[pts] / [%]	124,44	/	100,00			
teste n°		S17642	S17645	S17647	S17644	S17643	S17646
mistura de sinterização	[pts]	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
água	[pts]	9,88	9,31	9,48	9,65	10,00	10,37
coque	[pts]	5,60	5,65	5,65	5,65	5,65	5,65
finos de retorno (seco)	[pts]	32,00	32,00	32,00	32,00	32,00	32,00
mistura total alimentada (úmida)	[pts]	147,48	146,96	147,13	147,30	147,65	148,02
umidade da mist. total alimentada	[%]	6,1	5,8	5,9	6,0	6,1	6,4
Dados de sinterização							
temperatura de ignição	[°C]	1220	1220	1220	1220	1220	1220
energia de ignição	[MJ/t s.f.]	201	201	206	202	202	196
temp. de sinterização a 40% da altura do leito	[°C]	n.b.	1340	1350	1325	1275	1270
vazão do gás de exaustão							
a 60% do tempo do teste	[Nm³/h]	285	260	265	265	265	265
no final do teste	[Nm³/h]	575	590	540	665	665	685
temperaturas no final do teste							
barra de grelha	[°C]	665	535	625	600	625	665
gás de exaustão	[°C]	545	560	545	560	515	475
taxa de sinterização	[mm/min]	19,4	17,5	19,1	18,6	19,1	18,0
tempo de sinterização = t [Tmax + 1 min]	[min]	25,8	28,6	26,2	26,9	26,2	27,8
consumo de coque	(kg/t s.f.)	64,8	65,4	65,7	65,4	65,5	65,2
energia total [ignição e sinterização]	[MJ/t s.f.]	2112	2132	2144	2132	2135	2119
contração do bolo de sínter	[dH %]	9,6	13,6	13,0	10,0	8,8	5,6
retorno de finos sinterizados	[%]	86,5	86,3	86,0	86,4	86,2	86,7
rendimento	[%]	73,6	76,1	75,2	74,4	73,3	71,7
balanço do ret. dos finos sint. [ret. ger./ret.adic.]	[%]	102,0	92,3	95,5	98,8	103,2	109,7
produt. final da sinter. [ret. ger./ret.adic.=100]	[t/m².24h]	34,3	30,9	33,0	32,8	33,6	32,7
conteúdo de magnetita (pré-amostrado)	[%]	17,8	17,2	19,8	20,1	19,3	20,1
conteúdo de FeO (pré-amostrado)	[%]	6,5	6,3	7,2	7,3	7,0	7,2
Nota: ***avaliação das propriedades químicas, físicas e metalúrgicas.							
Granulometria das misturas		> 3,15	< 1,0	< 0,1	< 0,04		
		mm	mm	mm	mm		
Minérios	[%]	23,7	60,5	32,1	21,1		
Minérios + aditivos	[%]	19,6	59,4	29,0	19,7		
Minérios + aditivos + coque	[%]	20,4	58,1	28,0	18,9		
Minérios + aditivos + coque + finos de retorno	[%]	28,0	48,6	22,8	14,9		

5.1.3 Série 3 – Séries com a adição de 20% de *pellet feed* na mistura de referência da Europa Ocidental

Os resultados de testes de sinterização da série 3 com adição de 20% de *pellet feed* na mistura de referência da Europa Ocidental estão listados na tabela. V.3. Foram realizadas um total de sete queimas. Para essa série de testes de sinterização, a adição de 5,65 partes de coque e 33 partes de finos de retorno alcançou o objetivo do teor de FeO. A umidade da mistura de sinterização variou entre 5,8 e 6,4%. Esses testes de sinterização alcançaram uma produtividade média de 32,1t/m².24h, com uma taxa de coque entre 65,4 a 66,2kg/t de sínter final. O melhor teste (S17654) alcançou uma produtividade de 33,1t/m².24h. O sínter desse teste foi o escolhido para a análise química, física e metalúrgica.

Tabela V.3 – Resultados dos testes de sinterização da série 3

Séries de sinterização		Série 3 - Mist. EU Ocidental com 20% <i>pellet feed</i>							
Condições de sinterização									
sucção na ignição / sinterização	[mbar]	40 a 120 / 160							
tempo de ignição / temperatura	[s] / [°C]	90 / 1220							
leito de sínter / camada de forramento	[mm] / [mm]	500 / 20							
trat. do sínter, tamboramento e peneiramento	[rev] / [mm]	70 / 6,3							
Mistura									
<i>Samarco Pellet feed</i>	[pts] / [%]	20,00	/	16,00					
Minério A	[pts] / [%]	32,00	/	25,60					
Minério B	[pts] / [%]	28,00	/	22,40					
Finos de retorno	[pts] / [%]	8,00	/	6,40					
Minério C	[pts] / [%]	6,40	/	5,12					
Minério D	[pts] / [%]	5,60	/	4,48					
	subtotal	100,00		79,99					
Calcário	[pts] / [%]	20,50	/	16,40					
Olivina	[pts] / [%]	1,74	/	1,39					
Areia	[pts] / [%]	1,78	/	1,42					
Cal virgem	[pts] / [%]	1,00	/	0,80					
	[pts] / [%]	125,02	/	100,00					
teste nº		S17648	S17652	S17654	S17653	S17649	S17650	S17651	
mistura de sinterização	[pts]	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	
água	[pts]	9,88	10,00	9,64	10,00	10,45	10,55	10,24	
coque	[pts]	5,60	5,65	5,65	5,65	5,65	5,65	5,75	
finos de retorno (seco)	[pts]	32,00	33,00	33,00	33,00	33,00	33,00	33,00	
mistura total alimentada (úmida)	[pts]	147,48	148,65	148,29	148,65	149,10	149,20	148,99	
umidade da mist. total alimentada	[%]	5,8	5,8	6,0	6,2	6,4	6,5	6,2	
Dados de sinterização									
temperatura de ignição	[°C]	1220	1220	1220	1220	1220	1220	1220	
energia de ignição	[MJ/t s.f.]	203	206	208	204	203	205	207	
temp. de sinterização a 40% da altura do leito	[°C]	n.b.	1300	1335	1360	1365	1340	1365	
vazão do gás de exaustão									
a 60% do tempo do teste	[Nm³/h]	250	240	240	255	270	255	200	
no final do teste	[Nm³/h]	590	540	685	640	620	700	555	
temperaturas no final do teste									
barra de grelha	[°C]	605	605	565	645	565	665	645	
gás de exaustão	[°C]	590	590	515	550	470	495	575	
taxa de sinterização	[mm/min]	18,2	18,2	19,3	18,9	18,1	19,2	17,1	
tempo de sinterização = t [Tmax + 1 min]	[min]	27,4	27,5	25,9	26,4	27,7	26,1	29,3	
consumo de coque	[kg/t s.f.]	64,9	66,2	65,8	65,4	65,4	65,5	66,9	
energia total [ignição e sinterização]	[MJ/t s.f.]	2117	2159	2149	2133	2131	2137	2180	
contração do bolo de sínter	[dH %]	10,0	10,4	10,6	10,0	8,0	8,0	10,8	
retorno de finos sinterizados	[%]	86,3	86,1	85,9	86,4	86,4	86,3	86,0	
rendimento	[%]	72,1	74,0	72,8	72,3	72,6	70,7	75,8	
balanço do ret. dos finos sint [ret. ger./ret.adic.]	[%]	107,9	96,1	102,4	104,7	103,5	108,1	89,2	
produt. final da sinter. [ret. ger./ret.adic.=100]	[t/m²·24h]	32,0	31,5	33,1	32,1	31,7	33,3	29,4	
conteúdo de magnetita (pré-amostrado)	[%]	18,8	20,1	19,1	20,4	19,5	19,0	20,5	
conteúdo de FeO (pré-amostrado)	[%]	6,6	7,3	6,7	7,1	6,8	6,7	7,4	
Nota: ***avaliação das propriedades químicas, físicas e metalúrgicas.									
Granulometria das misturas		> 3,15	< 1,0	< 0,1	< 0,04				
		mm	mm	mm	mm				
Minérios	[%]	21,1	64,9	39,5	28,1				
Minérios + aditivos	[%]	17,4	63,0	34,9	25,2				
Minérios + aditivos + coque	[%]	18,3	61,4	33,5	24,1				
Minérios + aditivos + coque + finos de retorno	[%]	20,1	57,4	28,8	19,0				

5.1.4 Série 4 – Séries com a adição de 20% de *pellet feed* com pré-aglomeração na mistura de referência da Europa Ocidental

Os resultados de testes de sinterização da série 4 com adição de 20% de *pellet feed* pré-aglomerado na mistura de referência da Europa Ocidental estão listados na tabela V.4. Foram realizadas um total de cinco queimas. Para esses testes foi utilizado como aglomerante cal hidratada na razão de 10% da base de *pellet feed*, o que corresponde a 1,61% da mistura total. A adição de 5,4 partes de coque e 35 partes de finos de retorno alcançou o objetivo do teor de FeO. A umidade da mistura de sinterização variou entre 6,0 e 6,3%. Esses testes de sinterização alcançaram uma produtividade média de 37,6t/m².24h, com uma taxa de coque entre 62,0 a 62,6kg/t de sínter final. O melhor teste (S17686) alcançou uma produtividade de 38,1t/m².24h. O sínter desse teste foi o escolhido para a análise química, física e metalúrgica.

Tabela V.4 – Resultados dos testes de sinterização da série 4

Séries de sinterização		Série 4 - Mist. EU Ocid. com 20% pellet feed (pré-aglom.)					
Condições de sinterização							
sucção na ignição / sinterização	[mbar]	40 a 120 / 160					
tempo de ignição / temperatura	[s] / [°C]	90 / 1220					
leito de sínter / camada de forramento	[mm] / [mm]	500 / 20					
trat. do sínter, tamboramento e peneiramento	[rev] / [mm]	70 / 6,3					
Mistura							
<i>Samarco Pellet feed</i>	[pts] / [%]	20,00	/	16,08			
Minério A	[pts] / [%]	32,00	/	25,73			
Minério B	[pts] / [%]	28,00	/	22,51			
Finos de retorno	[pts] / [%]	8,00	/	6,43			
Minério C	[pts] / [%]	6,40	/	5,15			
Minério D	[pts] / [%]	5,60	/	4,50			
	subtotal	100,00		80,41			
Calcário	[pts] / [%]	17,81	/	14,32			
Olivina	[pts] / [%]	1,74	/	1,40			
Areia	[pts] / [%]	1,82	/	1,46			
Cal virgem	[pts] / [%]	1,00	/	0,80			
Cal hidratada	[pts] / [%]	2,00	/	1,61			
	[pts] / [%]	124,37	/	100,00			
teste nº		S17681	S17685	S17686	S17683	S17684	
mistura de sinterização	[pts]	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	
água	[pts]	10,01	9,66	9,89	10,11	10,31	
coque	[pts]	5,40	5,40	5,40	5,40	5,40	
finos de retorno (seco)	[pts]	34,00	35,00	35,00	35,00	35,00	
mistura total alimentada (úmida)	[pts]	149,41	150,06	150,29	150,51	150,71	
umidade da mist. total alimentada	[%]	6,2	5,8	6,0	6,1	6,3	
Dados de sinterização							
temperatura de ignição	[°C]	1220	1220	1220	1220	1220	
energia de ignição	[MJ/t s.f.]	209	211	209	212	209	
temp. de sinterização a 40% da alt. do leito	[°C]	1365	1280	1285	1345	1360	
vazão do gás de exaustão							
a 60% do tempo do teste	[Nm³/h]	305	240	270	295	300	
no final do teste	[Nm³/h]	615	625	665	550	735	
temperaturas no final do teste							
barra de grelha	[°C]	470	475	485	345	565	
gás de exaustão	[°C]	435	405	365	430	455	
taxa de sinterização	[mm/min]	21,7	20,3	22,3	22,5	21,7	
tempo de sinterização = t [Tmax + 1 min]	[min]	23,0	24,6	22,4	22,3	23,0	
consumo de coque	(kg/t s.f.)	62,5	63,0	62,3	62,0	62,6	
energia total [ignição e sinterização]	[MJ/t s.f.]	2052	2069	2048	2041	2055	
contração do bolo de sínter	[dH %]	11,0	12,2	9,0	10,0	8,6	
retorno de finos sinterizados	[%]	86,5	85,7	86,6	86,3	86,3	
rendimento	[%]	72,5	73,7	71,7	71,5	70,7	
balanço ret. dos finos sint [ret. ger./ret.adic.]	[%]	102,0	93,9	102,7	103,2	104,5	
prod. final sinter. [ret. ger./ret.adic.=100]	[t/m²·24h]	37,1	34,4	38,1	37,8	37,0	
conteúdo de magnetita (pré-amostrado)	[%]	23,0	21,0	20,5	17,6	18,6	
conteúdo de FeO (pré-amostrado)	[%]	7,9	7,4	7,3	6,8	6,9	
Nota: ***avaliação das propriedades químicas, físicas e metalúrgicas.							
Granulometria das misturas		> 3,15	< 1,0	< 0,1	< 0,04		
		mm	mm	mm	mm		
Minérios	[%]	21,1	64,9	39,5	28,1		
Minérios + aditivos	[%]	17,4	63,9	36,4	26,7		
Minérios + aditivos + coque	[%]	18,3	62,4	35,0	25,6		
Minérios + aditivos + coque + finos de retorno	[%]	19,9	59,6	30,2	19,7		

5.1.5 Série 5 – Séries com a adição de 30% de *pellet feed* com pré-aglomeração na mistura de referência da Europa Ocidental

Os resultados de testes de sinterização da série 5 com adição de 30% de *pellet feed* pré-aglomerado na mistura de referência da Europa Ocidental estão listados na tabela V.5. Foram realizadas um total de sete queimas. Para esses testes foi utilizado como aglomerante cal hidratada na razão de 10% da base de *pellet feed*, o que corresponde a 2,41% da mistura total. A adição de 5,4 partes de coque e 37 partes de finos de retorno alcançou o objetivo do teor de FeO. A umidade da mistura de sinterização variou entre 5,9 e 6,4%. Esses testes de sinterização alcançaram uma produtividade média de 39,2t/m².24h, com uma taxa de coque entre 62,4 a 62,7kg/t de sínter final. O melhor teste (S17671) alcançou uma produtividade de 40,3t/m².24h. O sínter desse teste foi o escolhido para a análise química, física e metalúrgica.

Tabela V.5 – Resultados dos testes de sinterização da série 5

Séries de sinterização	Série 5 - Mist. EU Ocid. com 30% pellet feed (pré-aglom.)							
Condições de sinterização								
sucção na ignição / sinterização	[mbar]	40 a 120 / 160						
tempo de ignição / temperatura	[s] / [°C]	90 / 1220						
leito de sínter / camada de forramento	[mm] / [mm]	500 / 20						
trat. do sínter, tamboramento e peneiramento	[rev] / [mm]	70 / 6,3						
Mistura								
<i>Samarco Pellet feed</i>	[pts] / [%]	30,00	/	24,07				
Minério A	[pts] / [%]	28,00	/	22,47				
Minério B	[pts] / [%]	24,50	/	19,66				
Finos de retorno	[pts] / [%]	7,00	/	5,62				
Minério C	[pts] / [%]	5,60	/	4,49				
Minério D	[pts] / [%]	4,90	/	3,93				
subtotal		100,00		80,25				
Calcário	[pts] / [%]	16,74	/	13,43				
Olivina	[pts] / [%]	1,78	/	1,43				
Areia	[pts] / [%]	2,09	/	1,68				
Cal virgem	[pts] / [%]	1,00	/	0,80				
Cal hidratada	[pts] / [%]	3,00	/	2,41				
	[pts] / [%]	124,61	/	100,00				
teste n°		S17666	S17667	S17670	S17673	S17671	S17672	S17674
mistura de sinterização	[pts]	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
água	[pts]	9,95	9,95	10,00	9,86	10,18	10,21	10,61
coque	[pts]	5,50	5,50	5,40	5,40	5,40	5,40	5,40
finos de retorno (seco)	[pts]	33,00	33,00	34,00	37,00	37,00	37,00	37,00
mistura total alimentada (úmida)	[pts]	148,45	148,45	149,40	152,26	152,58	152,61	153,01
umidade da mist. total alimentada	[%]	6,0	6,0	6,1	5,9	6,1	6,1	6,4
Dados de sinterização								
temperatura de ignição	[°C]	1220	1220	1220	1220	1220	1220	1220
energia de ignição	[MJ/t s.f.]	211	212	214	217	216	218	217
temp. de sinterização a 40% da alt. do leito	[°C]	1310	1325	1310	1305	1300	1375	1355
vazão do gás de exaustão								
a 60% do tempo do teste	[Nm³/h]	250	255	245	175	265	270	280
no final do teste	[Nm³/h]	590	600	635	570	635	640	650
temperaturas no final do teste								
barra de grelha	[°C]	620	635	600	520	3625	510	340
gás de exaustão	[°C]	550	540	565	480	520	480	375
taxa de sinterização	[mm/min]	20,1	22,5	23,3	22,4	24,4	24,2	24,4
tempo de sinterização = t [Tmax + 1 min]	[min]	24,9	22,2	21,5	22,3	20,5	20,7	20,5
consumo de coque	(kg/t f.s.)	64,3	63,5	62,3	62,6	62,4	62,7	62,7
energia total [ignição e sinterização]	[MJ/t s.f.]	2107	2084	2051	2063	2058	2069	2066
contração do bolo de sínter	[dH %]	14,8	14,4	12,0	13,6	9,6	10,0	8,8
retorno de finos sinterizados	[%]	85,6	86,6	86,7	86,3	86,5	86,1	86,1
rendimento	[%]	72,3	73,5	70,8	71,8	71,1	70,4	70,0
balanço ret. dos finos sint [ret. ger./ret.adic.]	[%]	104,1	100,6	108,3	98,5	102,8	103,2	104,5
prod. final sinter. [ret. ger./ret.adic.=100]	[t/m².24h]	33,8	37,8	38,7	36,8	40,3	39,4	40,1
conteúdo de magnetita (pré-amostrado)	[%]	18,9	22,8	21,4	18,6	19,3	21,8	18,1
conteúdo de FeO (pré-amostrado)	[%]	6,8	7,7	7,5	6,8	6,6	8,1	6,6
Nota: ***avaliação das propriedades químicas, físicas e metalúrgicas.		5 Hyd	10 Hyd	10 Hyd	10 Hyd	***	10 Hyd	z
Granulometria das misturas								
		> 3,15	< 1,0	< 0,1	< 0,04			
		mm	mm	mm	mm			
Minérios	[%]	18,5	69,2	46,9	35,1			
Minérios + aditivos	[%]	15,2	68,0	43,0	33,0			
Minérios + aditivos + coque	[%]	16,3	66,2	41,3	31,5			
Minérios + aditivos + coque + finos de retor.	[%]	23,3	56,3	32,9	24,2			

5.1.6 Série 6 – Séries com a adição de 40% de *pellet feed* com pré-aglomeração na mistura de referência da Europa Ocidental

Os resultados de testes de sinterização da série 6 com adição de 40% de *pellet feed* pré-aglomerado na mistura de referência da Europa Ocidental estão listados na tabela V.6. Foram realizadas um total de seis queimas. Para esses testes foi utilizado como aglomerante cal hidratada na razão de 10% da base de *pellet feed*, o que corresponde a 3,20% da mistura total. Para essa série de testes de sinterização, a adição de 5,5 partes de coque e 39 partes de finos de retorno alcançou o objetivo do teor de FeO. A umidade da mistura de sinterização variou entre 5,8 e 6,4%. Esses testes de sinterização alcançaram uma produtividade média de 36,7t/m².24h, com uma taxa de coque entre 63,5 a 64,0kg/t de sínter final. O melhor teste (S17678) alcançou uma produtividade de 37,4t/m².24h. O sínter desse teste foi o escolhido para a análise química, física e metalúrgica.

Tabela V.6 – Resultados dos testes de sinterização da série 6

Séries de sinterização		Série 6 - Mist. EU Ocid. com 40% pellet feed (pré-aglom.)							
Condições de sinterização									
sucção na ignição / sinterização	[mbar]	40 a 120 / 160							
tempo de ignição / temperatura	[s] / [°C]	90 / 1220							
leito de sínter / camada de forramento	[mm] / [mm]	500 / 20							
trat. do sínter, tamboramento e peneiramento	[rev] / [mm]	70 / 6,3							
Mistura									
<i>Samarco Pellet feed</i>	[pts] / [%]	40,00		/		32,04			
Minério A	[pts] / [%]	24,00		/		19,22			
Minério B	[pts] / [%]	21,00		/		16,82			
Finos de retorno	[pts] / [%]	6,00		/		4,81			
Minério C	[pts] / [%]	4,80		/		3,84			
Minério D	[pts] / [%]	4,20		/		3,36			
	subtotal	100,00				80,09			
Calcário	[pts] / [%]	15,68		/		12,56			
Olivina	[pts] / [%]	1,82		/		1,46			
Areia	[pts] / [%]	2,36		/		1,89			
Cal virgem	[pts] / [%]	1,00		/		0,80			
Cal hidratada	[pts] / [%]	4,00		/		3,20			
	[pts] / [%]	124,86		/		100,00			
teste nº		S17675	S17676	S17677	S17679	S17678	S17680		
mistura de sinterização	[pts]	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00		
água	[pts]	10,23	10,33	10,33	9,91	10,33	10,70		
coque	[pts]	5,40	5,40	5,40	5,50	5,50	5,50		
finos de retorno (seco)	[pts]	37,00	38,00	38,00	39,00	39,00	39,00		
mistura total alimentada (úmida)	[pts]	152,63	153,73	153,73	154,41	154,83	155,20		
umidade da mist. total alimentada	[%]	6,0	6,1	6,1	5,8	6,1	6,4		
Dados de sinterização									
temperatura de ignição	[°C]	1220	1220	1220	1220	1220	1220		
energia de ignição	[MJ/t s.f.]	223	223	219	225	224	224		
temp. de sinterização a 40% da alt. do leito	[°C]	n.d.	1330	1275	1300	1330	1340		
vazão do gás de exaustão									
a 60% do tempo do teste	[Nm³/h]	275	190	300	180	295	255		
no final do teste	[Nm³/h]	655	575	575	490	620	710		
temperaturas no final do teste									
barra de grelha	[°C]	585	575	595	570	540	440		
gás de exaustão	[°C]	560	490	545	535	430	460		
taxa de sinterização	[mm/min]	23,5	21,3	23,0	22,5	23,5	23,3		
tempo de sinterização = t [Tmax + 1 min]	[min]	21,3	23,5	21,7	22,2	21,3	21,5		
consumo de coque	(kg/t s.f.)	63,1	63,1	62,1	64,0	63,8	63,5		
energia total [ignição e sinterização]	[MJ/t s.f.]	2085	2084	2051	2113	2106	2097		
contração do bolo de sínter	[dH %]	13,0	15,6	14,6	21,6	11,2	10,0		
retorno de finos sinterizados	[%]	85,6	85,6	87,0	85,9	86,2	86,6		
rendimento	[%]	70,3	73,9	68,6	71,6	69,6	69,6		
balanço ret. dos finos sint [ret. ger./ret.adic.]	[%]	103,1	89,1	108,1	95,4	102,1	102,4		
prod. final sinter. [ret. ger./ret.adic.=100]	[t/m².24h]	37,5	34,0	37,5	35,6	37,4	37,0		
conteúdo de magnetita (pré-amostrado)	[%]	20,8	22,6	20,1	22,4	21,4	22,4		
conteúdo de FeO (pré-amostrado)	[%]	7,5	7,8	7,3	8,0	7,6	7,6		
Nota: **avaliação das propriedades químicas, físicas e metalúrgicas.						***		z	
Granulometria das misturas									
		> 3,15	< 1,0	< 0,1	< 0,04				
		mm	mm	mm	mm				
Minérios	[%]	15,8	73,6	54,4	42,0				
Minérios + aditivos	[%]	13,1	72,0	49,6	39,2				
Minérios + aditivos + coque	[%]	14,2	70,0	47,6	37,5				
Minérios + aditivos + coque + finos de retor.	[%]	19,8	62,7	39,3	28,9				

5.2 Testes de sinterização de *pellet feed* com as misturas da Ásia

5.2.1 Série 7- Séries de referência da mistura da Ásia

Os resultados dos testes de sinterização da série 7 de referência estão listados na tabela V.7. Para essa série nenhum *pellet feed* foi adicionado. Foram realizadas um total de sete queimas, e mais um teste para gerar finos de retorno. O balanço da relação de retorno de finos foi baseada no teor de FeO do sínter obtido em quatro testes com 6 partes de coque e a adição de 36 partes de finos de retorno, baseado em 100 partes da mistura de minérios e aditivos. A umidade da mistura de sinterização variou entre 6,1 a 6,8%. Nesses testes a média de produtividade foi de 32,2t/m².24h, com uma taxa de coque entre 72,7 a 72,9kg/t de sínter final. O melhor teste (S17692) alcançou uma produtividade de 33,6t/m².24h. O sínter desse teste foi o escolhido para a análise química, física e metalúrgica.

Tabela V.7 – Resultados dos testes de sinterização da série 7

Séries de sinterização		Série 7 - Mistura referência da Ásia							
Condições de sinterização									
sucção na ignição / sinterização	[mbar]	40 a 120 / 160							
tempo de ignição / temperatura	[s] / [°C]	90 / 1220							
leito de sínter / camada de forramento	[mm] / [mm]	500 / 20							
trat. do sínter, tamboramento e peneiramento	[rev] / [mm]	70 / 6,3							
Mistura									
Samarco Pellet feed	[pts] / [%]	0,00	/	0,00					
Minério G	[pts] / [%]	50,00	/	41,59					
Minério E	[pts] / [%]	20,00	/	16,64					
Minério F	[pts] / [%]	15,00	/	12,48					
Minério H	[pts] / [%]	5,00	/	4,16					
Minério I	[pts] / [%]	5,00	/	4,16					
Minério J	[pts] / [%]	5,00	/	4,16					
	subtotal	100,00		83,19					
Calcário	[pts] / [%]	17,190	/	14,300					
Olivina	[pts] / [%]	1,810	/	1,506					
Areia	[pts] / [%]	0,008	/	0,007					
Cal virgem	[pts] / [%]	1,202	/	1,000					
Cal hidratada	[pts] / [%]	0,000	/	0,000					
	[pts] / [%]	120,21	/	100,00					
teste n°		S17687	S17688	S17689	S17690	S17691	S17694	S17692	S17693
mistura de sinterização	[pts]	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
água	[pts]	7,40	9,58	10,06	10,39	10,39	10,96	10,77	11,16
coque	[pts]	4,00	5,80	5,90	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00
finos de retorno (seco)	[pts]	RF-test	32,00	32,00	32,00	36,00	36,00	36,00	36,00
mistura total alimentada (úmida)	[pts]	111,40	147,38	147,96	148,39	152,39	152,96	152,77	153,16
umidade da mist. total alimentada	[%]		5,7	5,9	6,4	6,1	6,3	6,4	6,8
Dados de sinterização									
temperatura de ignição	[°C]	1220	1220	1220	1220	1220	1220	1220	1220
energia de ignição	[MJ/t s.f.]	237	238	242	244	248	245	245	245
temp. de sinterização a 40% da altura do leito	[°C]	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1315	1385	1385	
vazão do gás de exaustão									
a 60% do tempo do teste	[Nm³/h]	245	n.d.	230	225	205	180	250	
no final do teste	[Nm³/h]	485	530	575	515	540	535	525	
temperaturas no final do teste									
barra de grelha	[°C]	515	340	515	525	440	235	340	
gás de exaustão	[°C]	375	365	440	395	420	370	395	
taxa de sinterização	[mm/min]	19,2	21,9	21,6	21,2	21,5	23,1	22,9	
tempo de sinterização = t [Tmax + 1 min]	[min]	26,1	22,8	23,1	23,6	23,3	21,6	21,8	
consumo de coque	(kg/t s.f.)	70,0	70,1	72,5	72,8	72,8	72,9	72,7	
energia total [ignição e sinterização]	[MJ/t s.f.]	2302	2307	2382	2393	2396	2395	2389	
contração do bolo de sínter	[dH %]	25,6	23,6	25,2	24,0	23,0	23,0	21,6	
retorno de finos sinterizados	[%]	82,9	84,1	82,7	82,4	82,4	82,3	82,6	
rendimento	[%]	71,4	70,5	71,0	71,2	71,0	70,8	69,7	
balanço do ret. dos finos sint [ret. ger./ret.adic.]	[%]	108,1	112,5	109,5	99,6	100,4	100,9	104,8	
produt. final da sinter. [ret. ger./ret.adic.=100]	[t/m²·24h]	28,8	32,8	31,9	30,9	30,9	33,6	33,4	
conteúdo de magnetita (pré-amostrado)	[%]	19,7	24,8	26,6	23,0	24,8	26,3	23,8	
conteúdo de FeO (pré-amostrado)	[%]	6,9	8,2	8,5	7,6	8,0	8,4	8,2	
Nota: ***avaliação das propriedades químicas, físicas e metalúrgicas.									
Granulometria das misturas									
		> 3,15	< 1,0	< 0,1	< 0,04				
		mm	mm	mm	mm				
Minérios	[%]	24,2	49,1	19,1	12,9				
Minérios + aditivos	[%]	20,6	49,8	18,9	13,3				
Minérios + aditivos + coque	[%]	21,4	48,9	18,4	12,8				
Minérios + aditivos + coque + finos de retorno	[%]	30,0	42,6	15,3	9,9				

5.2.2 Série 8 - Séries com a adição de 10% de *pellet feed* na mistura de referência da Ásia

Os resultados dos testes de sinterização da série 8 estão listados na tabela V.8. Para essa série 10% de *pellet feed* foi adicionado na mistura de referência. Foram realizadas um total de cinco queimas. O balanço da relação de retorno de finos foi baseada no teor de FeO do sínter obtido em quatro testes com 6 partes de coque e a adição de 35 partes de finos de retorno, baseado em 100 partes da mistura de minérios e aditivos. A umidade da mistura de sinterização variou entre 5,9 a 6,3%. Nesses testes a média de produtividade foi de 31,0t/m².24h, com uma taxa de coque entre 72,4 a 72,9kg/t de sínter final. O melhor teste (S17696) alcançou uma produtividade de 32,0t/m².24h. O sínter desse teste foi o escolhido para a análise química, física e metalúrgica.

Tabela V.8 – Resultados dos testes de sinterização da série 8

Séries de sinterização		Série 8 - Mist. Ásia com 10% <i>pellet feed</i>							
Condições de sinterização									
sucção na ignição / sinterização	[mbar]	40 a 120 / 160							
tempo de ignição / temperatura	[s] / [°C]	90 / 1220							
leito de sínter / camada de forramento	[mm] / [mm]	500 / 20							
trat. do sínter, tamboramento e peneiramento	[rev] / [mm]	70 / 6,3							
Mistura									
Samarco <i>Pellet feed</i>	[pts] / [%]	10,00	/	8,29					
Minério G	[pts] / [%]	45,00	/	37,30					
Minério E	[pts] / [%]	18,00	/	14,92					
Minério F	[pts] / [%]	13,50	/	11,19					
Minério H	[pts] / [%]	4,50	/	3,73					
Minério I	[pts] / [%]	4,50	/	3,73					
Minério J	[pts] / [%]	4,50	/	3,73					
	subtotal	100,00		82,88					
Calcário	[pts] / [%]	17,285	/	14,326					
Olivina	[pts] / [%]	1,836	/	1,522					
Areia	[pts] / [%]	0,330	/	0,274					
Cal virgem	[pts] / [%]	1,207	/	1,000					
Cal hidratada	[pts] / [%]	0,000	/	0,000					
	[pts] / [%]	120,66	/	100,00					
teste n°		S17695	S17698	S17696	S17699	S17697			
mistura de sinterização	[pts]	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00			
água	[pts]	10,36	9,94	10,28	10,48	10,63			
coque	[pts]	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00			
finos de retorno (seco)	[pts]	36,00	35,00	35,00	35,00	35,00			
mistura total alimentada (úmida)	[pts]	152,36	150,94	151,28	151,48	151,63			
umidade da mist. total alimentada	[%]	6,0	5,9	6,0	6,1	6,3			
Dados de sinterização									
temperatura de ignição	[°C]	1220	1220	1220	1220	1220			
energia de ignição	[MJ/t s.f.]	243	240	240	241	241			
temp. de sinterização a 40% da altura do leito	[°C]	1320	1305	1365	1335	1365			
vazão do gás de exaustão									
a 60% do tempo do teste	[Nm³/h]	130	240	245	240	230			
no final do teste	[Nm³/h]	460	530	530	500	475			
temperaturas no final do teste									
barra de grelha	[°C]	515	370	365	465	320			
gás de exaustão	[°C]	405	395	450	510	405			
taxa de sinterização	[mm/min]	19,3	19,9	21,6	21,4	20,7			
tempo de sinterização = t [Tmax + 1 min]	[min]	25,9	25,1	23,2	23,4	24,2			
consumo de coque	[kg/t s.f.]	72,6	72,9	72,4	72,6	72,5			
energia total [ignição e sinterização]	[MJ/t s.f.]	2384	2390	2374	2382	2381			
contração do bolo de sínter	[dH %]	24,4	23,6	22,6	22,6	25,0			
retorno de finos sinterizados	[%]	82,6	82,4	82,9	82,7	82,7			
rendimento	[%]	72,4	72,2	71,5	71,8	72,0			
balanço do ret. dos finos sint [ret. ger./ret.adic.]	[%]	95,8	98,0	100,9	99,8	99,2			
produt. final da sinter. [ret. ger./ret.adic.=100]	[t/m².24h]	28,4	29,6	32,0	31,6	30,6			
conteúdo de magnetita (pré-amostrado)	[%]	23,2	27,6	24,3	22,6	23,6			
conteúdo de FeO (pré-amostrado)	[%]	7,4	8,9	7,6	7,5	7,8			
Nota: ***avaliação das propriedades químicas, físicas e metalúrgicas.				***	z				
Granulometria das misturas		> 3,15	< 1,0	< 0,1	< 0,04				
		mm	mm	mm	mm				
Minérios	[%]	21,8	54,2	27,1	19,9				
Minérios + aditivos	[%]	18,5	54,2	25,5	19,1				
Minérios + aditivos + coque	[%]	19,5	53,0	24,6	18,3				
Minérios + aditivos + coque + finos de retorno	[%]	27,7	44,5	19,7	14,0				

5.2.3 Série 9 - Séries com a adição de 20% de *pellet feed* na mistura de referência da Ásia

Os resultados dos testes de sinterização da série 9 estão listados na tabela V.9. Para essa série 20% de *pellet feed* foi adicionado na mistura de referência. Foram realizadas um total de quatro queimas. O balanço da relação de retorno de finos foi baseada no teor de FeO do sínter obtido em quatro testes com 6 partes de coque e a adição de 35 partes de finos de retorno, baseado em 100 partes da mistura de minérios e aditivos. A umidade da mistura de sinterização variou entre 6,3 a 6,7%. Nesses testes a média de produtividade foi de 29,4t/m².24h, com uma taxa de coque entre 72,2 a 72,6kg/t de sínter final. O melhor teste (S17703) alcançou uma produtividade de 30,0t/m².24h. O sínter desse teste foi o escolhido para a análise química, física e metalúrgica.

Tabela V.9 – Resultados dos testes de sinterização da série 9

Séries de sinterização		Série 9 - Mist. Ásia com 20% pellet feed							
Condições de sinterização									
sucção na ignição / sinterização	[mbar]	40 a 120 / 160							
tempo de ignição / temperatura	[s] / [°C]	90 / 1220							
leito de sínter / camada de forramento	[mm] / [mm]	500 / 20							
trat. do sínter, tamboramento e peneiramento	[rev] / [mm]	70 / 6,3							
Mistura									
Samarco Pellet feed	[pts] / [%]	20,00	/	16,51					
Minério G	[pts] / [%]	40,00	/	33,02					
Minério E	[pts] / [%]	16,00	/	13,21					
Minério F	[pts] / [%]	12,00	/	9,91					
Minério H	[pts] / [%]	4,00	/	3,30					
Minério I	[pts] / [%]	4,00	/	3,30					
Minério J	[pts] / [%]	4,00	/	3,30					
	subtotal	100,00		82,55					
Calcário	[pts] / [%]	17,410	/	14,372					
Olivina	[pts] / [%]	1,857	/	1,533					
Areia	[pts] / [%]	0,657	/	0,542					
Cal virgem	[pts] / [%]	1,211	/	1,000					
Cal hidratada	[pts] / [%]	0,000	/	0,000					
	[pts] / [%]	121,14	/	100,00					
teste n°		S17701	S17700	S17703	S17702				
mistura de sinterização	[pts]	100,00	100,00	100,00	100,00				
água	[pts]	10,22	10,61	10,78	10,95				
coque	[pts]	6,00	6,00	6,00	6,00				
finos de retorno (seco)	[pts]	35,00	35,00	35,00	35,00				
mistura total alimentada (úmida)	[pts]	151,22	151,61	151,78	151,95				
umidade da mist. total alimentada	[%]	6,3	6,5	6,6	6,7				
Dados de sinterização									
temperatura de ignição	[°C]	1220	1220	1220	1220				
energia de ignição	[MJ/t s.f.]	238	240	237	236				
temp. de sinterização a 40% da altura do leito	[°C]	1320	n.d.	1360	1435				
vazão do gás de exaustão									
a 60% do tempo do teste	[Nm³/h]	170	260	245	255				
no final do teste	[Nm³/h]	460	515	530	590				
temperaturas no final do teste									
barra de grelha	[°C]	455	325	420	390				
gás de exaustão	[°C]	415	470	415	380				
taxa de sinterização	[mm/min]	18,9	20,2	20,0	19,6				
tempo de sinterização = t [Tmax + 1 min]	[min]	26,5	24,7	25,0	25,5				
consumo de coque	(kg/t s.f.)	72,2	72,3	72,6	72,4				
energia total [ignição e sinterização]	[MJ/t s.f.]	2367	2372	2380	2371				
contração do bolo de sínter	[dH %]	25,0	23,4	21,4	19,8				
retorno de finos sinterizados	[%]	83,1	83,0	82,6	82,9				
rendimento	[%]	72,5	71,7	72,4	71,7				
balanço do ret. dos finos sint [ret. ger./ret.adic.]	[%]	97,4	100,5	97,4	100,1				
produt. final da sinter. [ret. ger./ret.adic.=100]	[t/m².24h]	28,3	29,9	30,0	29,6				
conteúdo de magnetita (pré-amostrado)	[%]	23,4	26,0	27,1	25,1				
conteúdo de FeO (pré-amostrado)	[%]	7,4	8,2	8,5	7,9				
Nota: ***avaliação das propriedades químicas, físicas e metalúrgicas.				***	z				
Granulometria das misturas		> 3,15	< 1,0	< 0,1	< 0,04				
		mm	mm	mm	mm				
Minérios	[%]	19,4	59,2	35,1	27,0				
Minérios + aditivos	[%]	16,5	58,5	32,1	25,0				
Minérios + aditivos + coque	[%]	17,5	57,1	30,8	23,8				
Minérios + aditivos + coque + finos de retorno	[%]	22,7	50,0	25,0	18,3				

5.2.4 Série 10 – Séries com a adição de 20% de *pellet feed* com pré-aglomeração na mistura de referência da Ásia

Os resultados de testes de sinterização da série 10 com adição de 20% de *pellet feed* pré-aglomerado na mistura de referência estão listados na tabela V.10. Foram realizadas um total de sete queimas. Para esses testes foi utilizado como aglomerante cal hidratada na razão de 10% da base de *pellet feed*, o que corresponde a 1,66% da mistura total. Para essa série de testes de sinterização, a adição de 5,95 partes de coque e 37 partes de finos de retorno alcançou o objetivo do teor de FeO. A umidade da mistura de sinterização variou entre 6,2 e 6,8%. Esses testes de sinterização alcançaram uma produtividade média de 32,4t/m².24h, com uma taxa de coque entre 71,2 a 72,3kg/t de sínter final. O melhor teste (S17710) alcançou uma produtividade de 33,4t/m².24h. O sínter desse teste foi o escolhido para a análise química, física e metalúrgica.

Tabela V.10 – Resultados dos testes de sinterização da série 10

Séries de sinterização		Série 10 - Mist. Ásia com 20% pellet feed (pré-aglom.)						
Condições de sinterização								
sucção na ignição / sinterização	[mbar]	40 a 120 / 160						
tempo de ignição / temperatura	[s] / [°C]	90 / 1220						
leito de sínter / camada de forramento	[mm] / [mm]	500 / 20						
trat. do sínter, tamboramento e peneiramento	[rev] / [mm]	70 / 6,3						
Mistura								
Samarco Pellet feed	[pts] / [%]	20,00	/	16,60				
Minério G	[pts] / [%]	40,00	/	33,20				
Minério E	[pts] / [%]	16,00	/	13,28				
Minério F	[pts] / [%]	12,00	/	9,96				
Minério H	[pts] / [%]	4,00	/	3,32				
Minério I	[pts] / [%]	4,00	/	3,32				
Minério J	[pts] / [%]	4,00	/	3,32				
	subtotal	100,00		83,01				
Calcário	[pts] / [%]	14,730	/	12,227				
Olivina	[pts] / [%]	1,855	/	1,540				
Areia	[pts] / [%]	0,677	/	0,562				
Cal virgem	[pts] / [%]	1,205	/	1,000				
Cal hidratada	[pts] / [%]	2,000	/	1,660				
	[pts] / [%]	120,47	/	100,00				
teste n°		S17704	S17706	S17707	S17709	S17708	S17710	S17711
mistura de sinterização	[pts]	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
água	[pts]	10,61	10,61	10,98	10,29	10,59	11,13	11,52
coque	[pts]	6,00	6,00	6,00	5,95	5,95	5,95	5,95
finos de retorno (seco)	[pts]	35,00	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00
mistura total alimentada (úmida)	[pts]	151,61	153,61	153,98	153,24	153,54	154,08	154,47
umidade da mist. total alimentada	[%]	6,4	6,3	6,5	6,2	6,4	6,6	6,8
Dados de sinterização								
temperatura de ignição	[°C]	1220	1220	1220	1220	1220	1220	1220
energia de ignição	[MJ/t s.f.]	237	242	242	243	241	240	242
temp. de sinterização a 40% da altura do leito	[°C]	n.d.	1375	1205	1255	1255	1370	1305
vazão do gás de exaustão								
a 60% do tempo do teste	[Nm³/h]	300	260	290	285	290	320	335
no final do teste	[Nm³/h]	570	585	600	570	590	590	605
temperaturas no final do teste								
barra de grelha	[°C]	420	410	460	440	550	395	420
gás de exaustão	[°C]	390	405	415	350	440	405	370
taxa de sinterização	[mm/min]	22,5	22,3	22,2	20,9	22,2	22,5	22,3
tempo de sinterização = t [Tmax + 1 min]	[min]	22,2	22,4	22,5	23,9	22,5	22,2	22,4
consumo de coque	[kg/t s.f.]	72,0	72,3	72,0	71,7	71,4	71,2	71,4
energia total [ignição e sinterização]	[MJ/t s.f.]	2362	2375	2365	2358	2347	2341	2348
contração do bolo de sínter	[dH %]	22,4	20,6	19,6	22,6	19,8	19,6	18,6
retorno de finos sinterizados	[%]	83,2	82,9	83,3	83,0	83,4	83,5	83,4
rendimento	[%]	70,8	70,7	71,4	70,7	70,4	70,3	69,3
balanço do ret. dos finos sint [ret. ger./ret.adic.]	[%]	103,8	99,8	97,8	99,9	101,2	101,6	104,9
produt. final da sinter. [ret. ger./ret.adic.=100]	[t/m²·24h]	33,9	32,9	32,8	30,7	32,8	33,4	32,9
conteúdo de magnetita (pré-amostrado)	[%]	29,1	25,9	30,7	28,3	28,2	26,0	29,2
conteúdo de FeO (pré-amostrado)	[%]	9,1	8,6	9,3	8,7	8,6	8,4	8,7
Nota: ***avaliação das propriedades químicas, físicas e metalúrgicas.								
Granulometria das misturas		> 3,15	< 1,0	< 0,1	< 0,04			
		mm	mm	mm	mm			
Minérios	[%]	19,4	59,2	35,1	27,0			
Minérios + aditivos	[%]	16,5	59,4	33,6	26,5			
Minérios + aditivos + coque	[%]	17,5	58,0	32,3	25,3			
Minérios + aditivos + coque + finos de retorno	[%]	24,3	49,8	26,0	19,3			

5.2.5 Série 11 – Séries com a adição de 30% de *pellet feed* com pré-aglomeração na mistura de referência da Ásia

Os resultados de testes de sinterização da série 11 com adição de 30% de *pellet feed* pré-aglomerado na mistura de referência estão listados na tabela V.11. Foram realizados um total de seis queimas. Para esses testes foi utilizado como aglomerante cal hidratada na razão de 10% da base de *pellet feed*, o que corresponde a 2,49% da mistura total. Para essa série de testes de sinterização, a adição de 5,80 partes de coque e 38 partes de finos de retorno alcançou o objetivo do teor de FeO. A umidade da mistura de sinterização variou entre 6,3 e 6,7%. Esses testes de sinterização alcançaram uma produtividade média de 31,1t/m².24h, com uma taxa de coque entre 69,0 a 69,1kg/t de sínter final. O melhor teste (S17710) alcançou uma produtividade de 32,7t/m².24h. O sínter desse teste foi o escolhido para a análise química, física e metalúrgica.

Tabela V.11 – Resultados dos testes de sinterização da série 11

Séries de sinterização		Série 11 - Mist. Ásia com 30% pellet feed (pré-aglom.)						
Condições de sinterização								
sucção na ignição / sinterização	[mbar]	40 a 120 / 160						
tempo de ignição / temperatura	[s] / [°C]	90 / 1220						
leito de sínter / camada de forramento	[mm] / [mm]	500 / 20						
trat. do sínter, tamboramento e peneiramento	[rev] / [mm]	70 / 6,3						
Mistura								
Samarco Pellet feed	[pts] / [%]	30,00	/	24,88				
Minério G	[pts] / [%]	35,00	/	29,02				
Minério E	[pts] / [%]	14,00	/	11,61				
Minério F	[pts] / [%]	10,50	/	8,71				
Minério H	[pts] / [%]	3,50	/	2,90				
Minério I	[pts] / [%]	3,50	/	2,90				
Minério J	[pts] / [%]	3,50	/	2,90				
	subtotal	100,00		82,92				
Calcário	[pts] / [%]	13,490	/	11,186				
Olivina	[pts] / [%]	1,878	/	1,557				
Areia	[pts] / [%]	1,020	/	0,846				
Cal virgem	[pts] / [%]	1,206	/	1,000				
Cal hidratada	[pts] / [%]	3,000	/	2,488				
	[pts] / [%]	120,59	/	100,00				
teste n°		S17712	S17713	S17714	S17716	S17722	S17715	
mistura de sinterização	[pts]	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	
água	[pts]	10,61	10,61	10,90	11,10	11,19	11,29	
coque	[pts]	5,90	5,90	5,80	5,80	5,80	5,80	
finos de retorno (seco)	[pts]	35,00	37,00	38,00	38,00	38,00	38,00	
mistura total alimentada (úmida)	[pts]	151,51	153,51	154,70	154,90	154,99	155,09	
umidade da mist. total alimentada	[%]	6,4	6,1	6,3	6,5	6,6	6,7	
Dados de sinterização								
temperatura de ignição	[°C]	1220	1220	1220	1220	1220	1220	
energia de ignição	[MJ/t s.f.]	239	239	239	240	240	241	
temp. de sinterização a 40% da altura do leito	[°C]	n.d.	1300	1350	1275	1335	1295	
vazão do gás de exaustão								
a 60% do tempo do teste	[Nm³/h]	340	285	305	310	305	305	
no final do teste	[Nm³/h]	525	530	490	535	505	520	
temperaturas no final do teste								
barra de grelha	[°C]	545	600	500	155	425	485	
gás de exaustão	[°C]	505	455	425	410	405	375	
taxa de sinterização	[mm/min]	23,3	20,5	20,5	22,0	21,2	20,1	
tempo de sinterização = t [Tmax + 1 min]	[min]	21,5	24,4	24,4	22,7	23,6	24,9	
consumo de coque	(kg/t s.f.)	70,6	70,2	69,1	69,0	69,1	69,1	
energia total [ignição e sinterização]	[MJ/t s.f.]	2320	2309	2279	2277	2277	2280	
contração do bolo de sínter	[dH %]	21,6	20,8	19,6	18,4	19,0	20,8	
retorno de finos sinterizados	[%]	83,6	84,1	83,9	84,0	84,0	83,9	
rendimento	[%]	70,3	71,3	70,4	70,2	69,6	69,4	
balanço do ret. dos finos sint [ret. ger./ret.adic.]	[%]	105,9	98,6	99,7	100,6	102,5	103,0	
produt. final da sinter. [ret. ger./ret.adic.=100]	[t/m².24h]	34,7	30,6	30,5	32,7	31,5	29,7	
conteúdo de magnetita (pré-amostrado)	[%]	30,3	27,5	28,3	27,0	25,3	27,5	
conteúdo de FeO (pré-amostrado)	[%]	9,2	8,3	8,4	8,3	8,1	8,3	
Nota: ***avaliação das propriedades químicas, físicas e metalúrgicas.								
Granulometria das misturas		> 3,15	< 1,0	< 0,1	< 0,04			
		mm	mm	mm	mm			
Minérios	[%]	17,0	64,3	43,0	34,1			
Minérios + aditivos	[%]	14,4	64,2	41,0	33,1			
Minérios + aditivos + coque	[%]	15,6	62,5	39,2	31,6			
Minérios + aditivos + coque + finos de retorno	[%]	19,3	59,0	32,9	24,1			

5.2.6 Série 12 – Séries com a adição de 40% de *pellet feed* com pré-aglomeração na mistura de referência da Ásia

Os resultados de testes de sinterização da série 12 com adição de 40% de *pellet feed* pré-aglomerado na mistura de referência estão listados na tabela V.12. Foram realizadas um total de cinco queimas. Para esses testes foi utilizado como aglomerante cal hidratada na razão de 10% da base de *pellet feed*, o que corresponde a 3,31% da mistura total. Para essa série de testes de sinterização, a adição de 5,70 partes de coque e 39 partes de finos de retorno alcançou o objetivo do teor de FeO. A umidade da mistura de sinterização variou entre 6,4 e 6,7%. Esses testes de sinterização alcançaram uma produtividade média de 30,5t/m².24h, com uma taxa de coque entre 67,6 a 68,0kg/t de sínter final. O melhor teste (S17719) alcançou uma produtividade de 31,8t/m².24h. O sínter desse teste foi o escolhido para a análise química, física e metalúrgica.

Tabela V.12 – Resultados dos testes de sinterização da série 12

Séries de sinterização		Série 12 - Mist. Ásia com 40% <i>pellet feed</i> (pré-aglom.)							
Condições de sinterização									
sucção na ignição / sinterização	[mbar]	40 a 120 / 160							
tempo de ignição / temperatura	[s] / [°C]	90 / 1220							
leito de sínter / camada de forramento	[mm] / [mm]	500 / 20							
trat. do sínter, tamboramento e peneiramento	[rev] / [mm]	70 / 6,3							
Mistura									
Samarco Pellet feed	[pts] / [%]	40,00	/	33,13					
Minério G	[pts] / [%]	30,00	/	24,84					
Minério E	[pts] / [%]	12,00	/	9,94					
Minério F	[pts] / [%]	9,00	/	7,45					
Minério H	[pts] / [%]	3,00	/	2,48					
Minério I	[pts] / [%]	3,00	/	2,48					
Minério J	[pts] / [%]	3,00	/	2,48					
	subtotal	100,00		82,82					
Calcário	[pts] / [%]	12,270	/	10,161					
Olivina	[pts] / [%]	1,900	/	1,573					
Areia	[pts] / [%]	1,372	/	1,136					
Cal virgem	[pts] / [%]	1,208	/	1,000					
Cal hidratada	[pts] / [%]	4,000	/	3,313					
	[pts] / [%]	120,75	/	100,00					
teste n°		S17717	S17718	S17720	S17719	S17721			
mistura de sinterização	[pts]	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00			
água	[pts]	11,07	10,69	10,84	10,99	11,28			
coque	[pts]	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70			
finos de retorno (seco)	[pts]	37,00	39,00	39,00	39,00	39,00			
mistura total alimentada (úmida)	[pts]	153,77	155,39	155,54	155,69	155,98			
umidade da mist. total alimentada	[%]	6,7	6,2	6,4	6,6	6,7			
Dados de sinterização									
temperatura de ignição	[°C]	1220	1220	1220	1220	1220			
energia de ignição	[MJ/t s.f.]	240	239	238	238	243			
temp. de sinterização a 40% da altura do leito	[°C]	395	1280	1295	1270	1330			
vazão do gás de exaustão									
a 60% do tempo do teste	[Nm³/h]	300	285	295	325	560			
no final do teste	[Nm³/h]	590	545	610	555	320			
temperaturas no final do teste									
barra de grelha	[°C]	n.d.	535	490	350	550			
gás de exaustão	[°C]	530	475	340	340	460			
taxa de sinterização	[mm/min]	20,7	18,5	19,3	21,3	21,0			
tempo de sinterização = t [Tmax + 1 min]	[min]	24,2	27,0	25,9	23,5	23,8			
consumo de coque	[kg/t s.f.]	67,7	67,6	67,6	67,7	68,0			
energia total [ignição e sinterização]	[MJ/t s.f.]	2238	2234	2233	2234	2248			
contração do bolo de sínter	[dH %]	20,4	20,8	20,0	18,2	19,6			
retorno de finos sinterizados	[%]	84,2	84,3	84,3	84,2	83,9			
rendimento	[%]	69,7	72,4	70,4	71,3	70,2			
balanço do ret. dos finos sint [ret. ger./ret.adic.]	[%]	104,2	91,5	98,1	97,0	98,5			
produt. final da sinter. [ret. ger./ret.adic.=100]	[t/m².24h]	30,6	27,6	29,0	31,8	30,8			
conteúdo de magnetita (pré-amostrado)	[%]	29,2	26,3	26,0	25,3	26,7			
conteúdo de FeO (pré-amostrado)	[%]	8,9	8,1	8,0	7,9	8,2			
Nota: ***avaliação das propriedades químicas, físicas e metalúrgicas.					***	z			
Granulometria das misturas		> 3.15	< 1.0	< 0.1	< 0.04				
		mm	mm	mm	mm				
Minérios	[%]	14,6	69,4	51,0	41,2				
Minérios + aditivos	[%]	12,4	69,0	48,3	39,7				
Minérios + aditivos + coque	[%]	13,6	67,1	46,2	37,9				
Minérios + aditivos + coque + finos de retorno	[%]	21,0	57,1	36,5	28,5				

O resumo dos testes de sinterização selecionados de cada série dos sínteres da mistura da Europa Ocidental é apresentado na tabela V.13 e para os testes de sinterização selecionados de cada série dos sínteres da mistura da Ásia na tabela V.14.

Tabela V.13 - Resumo dos testes de sinterização selecionados de cada série dos sínteres da mistura da Europa Ocidental

Séries de sinterização		1	2	3	4	5	6
Samarco pellet feed	[%]	-	10	20	-	-	-
Samarco pellet feed pré-agl.	[%]	-	-	-	20	30	40
Minério A	[%]	40	36	32	32	28	24
Minério B	[%]	35	31,5	28	28	24,5	21
Finos de retorno	[%]	10	9	8	8	7	6
Minério C	[%]	8	7,2	6,4	6,4	5,6	4,8
Minério D	[%]	7	6,3	5,6	5,6	4,9	4,2
Teste nº		S17641	S17643	S17654	S17686	S17671	S17678
Umidade da mistura total alimentada	[%]	6,0	6,1	6,0	6,0	6,1	6,1
Finos de retorno	[pts./100 pts.mist.total alim.]	32,0	32,0	33,0	35,0	37,0	39,0
Coque	[pts./100 pts.mist. total alim.]	5,6	5,65	5,65	5,4	5,4	5,5
Consumo esp. de coque	[kg/t s.f.]	65,4	65,5	65,8	62,3	62,4	63,8
Temp. de sint. a 40% da alt. do leito	[°C]	1320	1275	1335	1285	1300	1330
Taxa de sinterização	[mm/min]	20,3	19,1	19,3	22,0	24,4	23,5
Vazão gás exhaust. 60% tempo teste	[Nm³/h]	275	265	240	270	265	295
Produtividade	[t/m².24 h]	35,4	33,6	33,1	38,1	40,3	37,4
Produtividade média das séries	[t/m².24 h]	34,5	33,1	32,1	37,6	39,2	36,7
Análise química							
Fe _{tot}	[%]	56,23	56,30	56,35	56,35	56,42	56,46
FeO	[%]	7,30	7,25	7,12	7,34	7,20	7,56
SiO ₂	[%]	5,89	5,86	5,87	5,90	5,82	5,90
Al ₂ O ₃	[%]	1,14	1,04	1,00	0,99	0,93	0,89
CaO	[%]	11,60	11,57	11,60	11,59	11,58	11,55
MgO	[%]	1,03	1,02	1,01	1,01	0,97	1,03
P	[%]	0,028	0,032	0,033	0,032	0,033	0,036
S	[%]	0,018	0,014	0,014	0,015	0,014	0,016
Na ₂ O	[%]	0,019	0,019	0,019	0,020	0,020	0,022
K ₂ O	[%]	0,039	0,036	0,040	0,036	0,039	0,036
Mn	[%]	0,330	0,330	0,290	0,305	0,310	0,255
TiO ₂	[%]	0,071	0,068	0,065	0,065	0,061	0,059
V	[%]	0,004	0,004	0,004	0,004	0,003	0,003
P.P.C.	[%]	0,08	0,07	0,13	0,11	0,14	0,09
Basicidade CaO/SiO ₂		1,97	1,97	1,98	1,96	1,99	1,96
Análise Química, 10-12,5 mm							
Fe _{tot}	[%]	56,90	56,22	56,69	56,52	56,81	56,34
FeO	[%]	7,55	7,68	6,92	7,38	7,43	7,76
Granulometria							
> 50 mm	[% / acum.%]	0 / 0	0 / 0	1 / 1	1 / 1	0 / 0	1 / 1
50 - 40 mm	[% / acum.%]	17 / 17	4 / 4	2 / 3	2 / 3	2 / 2	2 / 3
40 - 25 mm	[% / acum.%]	11 / 28	14 / 18	14 / 17	17 / 20	15 / 17	13 / 16
25 - 20 mm	[% / acum.%]	10 / 38	12 / 30	13 / 30	13 / 33	12 / 29	12 / 28
20 - 16 mm	[% / acum.%]	14 / 52	14 / 44	14 / 44	14 / 47	14 / 43	16 / 44
16 - 10 mm	[% / acum.%]	27 / 79	31 / 75	31 / 75	29 / 76	32 / 75	32 / 76
10 - 6,3 mm	[% / acum.%]	21 / 100	25 / 100	25 / 100	24 / 100	25 / 100	24 / 100
Teste de tamboramento, ISO 3271							
resistência > 6,3 mm	[%]	78,9	79,8	79,8	78,9	77,2	77,7
abrasão < 0,5 mm	[%]	4,6	4,6	4,5	4,6	4,6	4,6
Teste de redução, ISO 4695							
reduzibilidade (dR/dt)40	[950°C] [%/min]	1,13	1,16	1,19	1,20	1,22	1,32
grau de redução após 65%	[min]	53,7	51,8	51,2	50,0	49,9	46,0
Degradação estática, ISO 4696-1, 500°C							
resistência > 6,3 mm	[%]	53,0	54,4	56,2	54,7	54,8	56,4
índice < 3,15 mm	[%]	17,8	18,8	17,0	16,6	16,3	15,7
abrasão < 0,5 mm	[%]	4,1	4,7	4,1	3,7	3,7	3,4

Tabela V.14 - Resumo dos testes de sinterização selecionados de cada série dos sínteres da mistura da Ásia

Séries de sinterização	7	8	9	10	11	12
Samarco pellet feed [%]	-	10	20	-	-	-
Samarco pellet feed pré-agl. [%]	-	-	-	20	30	40
Minério G [%]	50	45	40	40	35	30
Minério E [%]	20	18	16	16	14	12
Minério F [%]	15	13.5	12	12	10.5	9
Minério H [%]	5	4.5	4	4	3.5	3
Minério I [%]	5	4.5	4	4	3.5	3
Minério J [%]	5	4.5	4	4	3.5	3
Teste n°	S17692	S17696	S17703	S17710	S17716	S17719
Umidade da mistura total alimentada [%]	6,4	6,0	6,6	6,6	6,5	6,6
Finos de retorno [pts./100 pts.mist.total alim.]	36,0	35,0	35,0	37,0	38,0	39,0
Coque [pts./100 pts.mist. total alim.]	6,0	6,0	6,0	5,95	5,8	5,7
Consumo esp. de coque [kg/t s.f.]	72,9	72,4	72,6	71,2	69,0	67,7
Temp. de sint. a 40% da alt, do leito [°C]	1385	1365	1360	1370	1275	1270
Taxa de sinterização [mm/min]	23,1	21,6	20,0	22,5	22,0	21,3
Vazão gás exaust. 60% tempo teste [Nm³/h]	180	245	245	320	310	325
Produtividade [t/m².24 h]	33,6	32,0	30,0	33,4	32,7	31,8
Produtividade média das séries [t/m².24 h]	32,2	31,0	29,5	32,5	31,1	30,5
Análise química						
Fe _{tot} [%]	57,68	57,73	57,74	57,84	57,84	57,95
FeO [%]	8,32	8,18	8,51	8,40	8,45	8,12
SiO ₂ [%]	5,45	5,48	5,52	5,45	5,51	5,43
Al ₂ O ₃ [%]	1,46	1,38	1,29	1,28	1,19	1,10
CaO [%]	9,90	9,95	10,00	10,00	10,02	9,98
MgO [%]	1,01	1,00	1,02	1,00	1,02	0,99
P [%]	0,039	0,040	0,041	0,042	0,042	0,043
S [%]	0,008	0,012	0,010	0,022	0,008	0,009
Na ₂ O [%]	0,021	0,019	0,022	0,029	0,025	0,022
K ₂ O [%]	0,031	0,035	0,032	0,036	0,031	0,031
Mn [%]	0,210	0,190	0,165	0,180	0,160	0,155
TiO ₂ [%]	0,076	0,072	0,070	0,069	0,066	0,063
V [%]	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
P.P.C. [%]	0,08	0,08	0,08	0,03	0,08	0,18
Basicidade CaO/SiO ₂	1,82	1,82	1,81	1,83	1,82	1,84
Análise química						
Fe _{tot} 18-20 mm [%]	57,77	57,58	57,57	57,81	57,86	58,07
FeO 18-20 mm [%]	8,55	8,58	8,24	8,75	8,69	8,79
Granulometria						
> 50 mm [% / acum.%]	1 / 1	1 / 1	0 / 0	1 / 1	1 / 1	1 / 1
50 - 40 mm [% / acum.%]	3 / 4	4 / 5	6 / 6	3 / 4	3 / 4	4 / 5
40 - 25 mm [% / acum.%]	16 / 20	18 / 23	17 / 23	15 / 19	19 / 23	19 / 24
25 - 20 mm [% / acum.%]	13 / 33	14 / 37	14 / 37	13 / 32	13 / 36	14 / 38
20 - 16 mm [% / acum.%]	14 / 47	14 / 51	15 / 52	13 / 45	16 / 52	15 / 53
16 - 10 mm [% / acum.%]	30 / 77	27 / 78	27 / 79	31 / 76	27 / 79	27 / 80
10 - 6,3 mm [% / acum.%]	23 / 100	22 / 100	21 / 100	24 / 100	21 / 100	20 / 100
Teste de tamboramento, ISO 3271						
resistência > 6,3 mm [%]	74,7	75,8	76,9	75,6	75,9	75,7
abrasão < 0,5 mm [%]	5,5	5,6	5,6	5,4	5,7	5,8
Teste de redução, ISO 7215 [900°C]						
reducibilidade (dR/dt)40 [%/min]	0,40	0,39	0,40	0,40	0,40	0,40
índice reducibilidade final do teste [%]	71,7	70,7	70,9	71,1	70,7	71,5
Desintegração estática, ISO 4696-2, 550°C						
resistência > 6,3 mm [%]	41,7	44,8	49,8	44,6	48,4	47,8
índice < 3,15 mm [%]	30,4	27,8	26,8	27,8	25,0	25,5
índice < 2,8 mm [%]	27,7	25,8	24,9	25,6	23,0	23,4
abrasão < 0,5 mm [%]	8,7	8,0	8,5	8,1	7,1	7,3

5.3 Testes de sinterização de *pellet screenings* com as misturas da Europa Ocidental

5.3.1 Série 1- Séries de referência da mistura Europa Ocidental

Os resultados dos testes de sinterização da série 1 de referência estão listados na tabela V.15. Para essa série nenhum *pellet screenings* foi adicionado. Foram realizadas um total de sete queimas, e mais um teste para gerar finos de retorno. O balanço da relação de retorno de finos foi baseada no teor de FeO do sinter obtido em quatro testes com 5,6 partes de coque e a adição de 32 partes de finos de retorno, baseado em 100 partes da mistura de minérios e aditivos. A umidade da mistura de sinterização variou entre 5,6 a 6,2%. Nesses testes a média de produtividade foi de 34,5t/m².24h, com uma taxa de coque entre 64,6 a 65,4kg/t de sinter final. O melhor teste (S17641) alcançou uma produtividade de 35,4t/m².24h. O sinter desse teste foi o escolhido para a análise química, física e metalúrgica.

Tabela V.15 – Resultados dos testes de sinterização da série 1

Séries de sinterização		Série 1 - Mistura referência da Europa Ocidental							
Condições de sinterização									
sucção na ignição / sinterização	[mbar]	40 a 120 / 160							
tempo de ignição / temperatura	[s] / [°C]	90 / 1220							
leito de sínter / camada de forramento	[mm] / [mm]	500 / 20							
trat. do sínter, tamboramento e peneiramento	[rev] / [mm]	70 / 6,3							
Mistura									
<i>Samarco Pellet screenings</i>	[pts] / [%]	0,00	/	0,00					
Minério A	[pts] / [%]	40,00	/	32,29					
Minério B	[pts] / [%]	35,00	/	28,25					
Finos de retorno	[pts] / [%]	10,00	/	8,07					
Minério C	[pts] / [%]	8,00	/	6,46					
Minério D	[pts] / [%]	7,00	/	5,65					
	subtotal	100,00		80,73					
Calcário	[pts] / [%]	19,95	/	16,10					
Olivina	[pts] / [%]	1,66	/	1,34					
Areia	[pts] / [%]	1,27	/	1,03					
Cal virgem	[pts] / [%]	0,99	/	0,80					
	[pts] / [%]	123,88	/	100,00					
Teste nº		S17633	S17634	S17635	S17636	S17639	S17641	S17638	S17640
mistura de sinterização	[pts]	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
água	[pts]	7,00	9,50	9,55	9,55	9,70	9,90	10,10	10,40
coque	[pts]	4,00	4,50	5,40	5,60	5,60	5,60	5,60	5,60
finos de retorno (seco)	[pts]	RF-Test	32,00	32,00	32,00	32,00	32,00	32,00	32,00
mistura total alimentada (úmida)	[pts]	111,00	146,00	146,95	147,15	147,30	147,50	147,70	148,00
umidade da mist. total alimentada	[%]		5,7	5,6	5,6	5,8	6,0	6,2	6,5
Dados de sinterização									
temperatura de ignição	[°C]		1220	1220	1220	1220	1220	1220	1220
energia de ignição	[MJ/t s.f.]		199	204	201	202	205	199	200
temp. de sinterização a 40% da altura do leito	[°C]		n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	1320	n.b.	1335
vazão do gás de exaustão									
a 60% do tempo do teste	[Nm³/h]		275	270	265	235	275	285	280
no final do teste	[Nm³/h]		650	640	760	740	775	615	735
temperaturas no final do teste									
barra de grelha	[°C]		570	615	625	525	590	645	600
gás de exaustão	[°C]		475	530	525	605	480	465	485
taxa de sinterização	[mm/min]		19,5	19,8	18,9	19,2	20,3	19,5	19,4
tempo de sinterização = t [Tmax + 1 min]	[min]		25,6	25,3	26,5	26,0	24,6	25,6	25,8
consumo de coque	(kg/t s.f.)		51,8	62,4	64,6	64,7	65,4	65,4	64,6
energia total [ignição e sinterização]	[MJ/t s.f.]		1728	2043	2105	2111	2133	2127	2106
contração do bolo de sínter	[dH %]		5,0	11,0	8,0	10,4	8,2	6,4	5,4
retorno de finos sinterizados	[%]		86,9	86,6	86,7	86,5	85,7	85,7	86,7
rendimento	[%]		57,0	72,2	73,2	74,6	73,9	74,3	70,5
balanço do ret. dos finos sint [ret. gerado/ret.adic.]	[%]		167,0	107,9	104,0	98,1	100,4	98,8	114,3
produt. final da sinter. [ret. gerado/ret.adic.=100]	[t/m²·24h]		34,9	34,6	33,5	34,0	35,4	35,0	34,6
conteúdo de magnetita (pré-amostrado)	[%]			15,2	17,5	19,1	20,2	21,3	20,0
conteúdo de FeO (pré-amostrado)	[%]			5,5	6,5	6,9	7,3	7,5	7,2
Nota: ***avaliação das propriedades químicas, físicas e metalúrgicas.									
Distribuição granulométrica das misturas		> 3,15	< 1,0	< 0,1	< 0,04				
		mm	mm	mm	mm				
Minérios	[%]	26,4	56,1	24,7	14,2				
Minérios + aditivos	[%]	21,8	55,8	23,1	14,1				
Minérios + aditivos + coque	[%]	22,4	54,7	22,4	13,6				
Minérios + aditivos + coque + finos de retorno	[%]	28,9	46,9	18,2	10,6				

5.3.2 Série 2 – Séries com a adição de 10% de *pellet screenings* na mistura de referência da Europa Ocidental

Os resultados de testes de sinterização da série 2 com adição de 10% de *pellet screenings* na mistura de referência estão listados na tabela V.16. Foram realizadas um total de sete queimas. Para essa série de testes de sinterização, a adição de 5,50 partes de coque e 29 partes de finos de retorno alcançou o objetivo do teor de FeO. A umidade da mistura de sinterização variou entre 5,9 e 6,3%. Esses testes de sinterização alcançaram uma produtividade média de $37,4\text{t/m}^2 \cdot 24\text{h}$, com uma taxa de coque entre 63,2 a 63,8kg/t de sínter final. O melhor teste (S17783) alcançou uma produtividade de $38,5\text{t/m}^2 \cdot 24\text{h}$. O sínter desse teste foi o escolhido para a análise química, física e metalúrgica.

Tabela V.16 – Resultados dos testes de sinterização da série 2

Séries de sinterização		Série 2 - Mist. da EU Ocíd. c/ 10% Samarco <i>pellet screenings</i> .							
Condições de sinterização									
sucção na ignição / sinterização	[mbar]	40 a 120 / 160							
tempo de ignição / temperatura	[s] / [°C]	90 / 1220							
leito de sínter / camada de forramento	[mm] / [mm]	500 / 20							
trat. do sínter, tamboramento e peneiramento	[rev] / [mm]	70 / 6,3							
Mistura									
<i>Samarco Pellet screenings</i>	[pts] / [%]	10,00	/	8,04					
Minério A	[pts] / [%]	36,00	/	28,94					
Minério B	[pts] / [%]	31,50	/	25,32					
Finos de retorno	[pts] / [%]	9,00	/	7,23					
Minério C	[pts] / [%]	7,20	/	5,79					
Minério D	[pts] / [%]	6,30	/	5,06					
	subtotal	100,00		80,38					
Calcário	[pts] / [%]	20,170	/	16,21					
Olivina	[pts] / [%]	1,689	/	1,36					
Areia	[pts] / [%]	1,560	/	1,25					
Cal virgem	[pts] / [%]	0,992	/	0,80					
	[pts] / [%]	124,41	/	100,00					
Teste nº		S17778	S17779	S17780	S17784	S17783	S17781	S17785	
mistura de sinterização	[pts]	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	
água	[pts]	9,88	9,88	10,00	9,12	9,42	9,82	10,09	
coque	[pts]	5,65	5,55	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	
finos de retorno (seco)	[pts]	32,00	32,00	30,00	29,00	29,00	29,00	29,00	
mistura total alimentada (úmida)	[pts]	147,53	147,43	145,50	143,62	143,92	144,32	144,59	
umidade da mist. total alimentada	[%]	6,1	6,0	6,1	5,6	5,8	6,0	6,3	
Dados de sinterização									
temperatura de ignição	[°C]	1220	1220	1220	1220	1220	1220	1220	
energia de ignição	[MJ/t s.f.]	202	203	199	199	198	199	195	
temp. de sinterização a 40% da altura do leito	[°C]	n.d.	n.d.	n.d.	1305	1325	1365	1365	
vazão do gás de exaustão									
a 60% do tempo do teste	[Nm³/h]	320	300	305	295	300	305	320	
no final do teste	[Nm³/h]	755	490	540	605	625	605	705	
temperaturas no final do teste									
barra de grelha	[°C]	590	600	585	560	410	535	530	
gás de exaustão	[°C]	460	510	515	440	425	520	525	
taxa de sinterização	[mm/min]	20,2	19,8	20,7	20,4	21,5	20,6	20,7	
tempo de sinterização = t [Tmax + 1 min]	[min]	24,7	25,3	24,2	24,5	23,3	24,3	24,1	
consumo de coque	(kg/t s.f.)	64,4	64,1	63,2	63,3	63,8	63,3	63,2	
energia total [ignição e sinterização]	[MJ/t s.f.]	2103	2092	2065	2068	2081	2066	2061	
contração do bolo de sínter	[dH %]	12,0	15,4	13,0	15,6	13,6	12,8	9,4	
retorno de finos sinterizados	[%]	87,7	86,6	87,0	86,8	86,2	86,9	87,0	
rendimento	[%]	77,5	77,1	76,3	77,2	76,9	76,9	75,0	
balanço do ret. dos finos sint [ret. ger./ret.adic.]	[%]	88,1	88,8	96,7	95,2	95,8	96,3	104,4	
produt. final da sinter. [ret. ger./ret.adic.=100]	[t/m².24h]	35,6	34,8	37,0	36,5	38,5	36,9	37,8	
conteúdo de magnetita (pré-amostrado)	[%]	21,9	20,4	19,3	20,4	20,4	19,7	20,3	
conteúdo de FeO (pré-amostrado)	[%]	7,5	7,4	7,1	7,1	7,2	7,2	6,9	
Nota: ***avaliação das propriedades químicas, físicas e metalúrgicas.									
Granulometria das misturas									
		> 3,15	< 1,0	< 0,1	< 0,04				
		mm	mm	mm	mm				
Minérios	[%]	28,9	53,3	24,5	14,6				
Minérios + aditivos	[%]	23,7	53,7	22,7	14,4				
Minérios + aditivos + coque	[%]	24,3	52,6	22,1	13,9				
Minérios + aditivos + coque + finos de retorno	[%]	28,6	48,5	19,4	11,1				

5.3.3 Série 3 – Séries com a adição de 20% de *pellet screenings* na mistura de referência da Europa Ocidental

Os resultados de testes de sinterização da série 3 com adição de 20% de *pellet screenings* na mistura de referência estão listados na tabela V.17. Foram realizadas um total de cinco queimas. Para essa série de testes de sinterização, a adição de 5,4 partes de coque e 29 partes de finos de retorno alcançou o objetivo do teor de FeO. A umidade da mistura de sinterização variou entre 5,9 e 6,5%. Esses testes de sinterização alcançaram uma produtividade média de 38,5t/m².24h, com uma taxa de coque entre 62,0 a 62,2kg/t de sínter final. O melhor teste (S17790) alcançou uma produtividade de 38,9t/m².24h. O sínter desse teste foi o escolhido para a análise química, física e metalúrgica.

Tabela V.17 – Resultados dos testes de sinterização da série 3

Séries de sinterização		Série 3 - Mist. da EU Ocid. c/ 20% Samarco pellet screenings .							
Condições de sinterização									
sucção na ignição / sinterização	[mbar]	40 a 120 / 160							
tempo de ignição / temperatura	[s] / [°C]	90 / 1220							
leito de sínter / camada de forramento	[mm] / [mm]	500 / 20							
trat. do sínter, tamboramento e peneiramento	[rev] / [mm]	70 / 6,3							
Mistura									
<i>Samarco Pellet screenings</i>	[pts] / [%]	20,00	/	16,01					
Minério A	[pts] / [%]	32,00	/	25,61					
Minério B	[pts] / [%]	28,00	/	22,41					
Finos de retorno	[pts] / [%]	8,00	/	6,40					
Minério C	[pts] / [%]	6,40	/	5,12					
Minério D	[pts] / [%]	5,60	/	4,48					
subtotal		100,00		80,04					
Calcário	[pts] / [%]	20,390	/	16,32					
Olivina	[pts] / [%]	1,719	/	1,38					
Areia	[pts] / [%]	1,841	/	1,47					
Cal virgem	[pts] / [%]	0,995	/	0,80					
	[pts] / [%]	124,95	/	100,00					
Teste nº		S17786	S17788	S17787	S17790	S17789			
mistura de sinterização	[pts]	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00			
água	[pts]	9,81	9,39	9,81	9,94	10,15			
coque	[pts]	5,50	5,40	5,40	5,40	5,40			
finos de retorno (seco)	[pts]	29,00	29,00	29,00	29,00	29,00			
mistura total alimentada (úmida)	[pts]	144,31	143,79	144,21	144,34	144,55			
umidade da mist. total alimentada	[%]	6,0	5,9	6,1	6,3	6,5			
Dados de sinterização									
temperatura de ignição	[°C]	1220	1220	1220	1220	1220			
energia de ignição	[MJ/t s.f.]	199	199	197	197	196			
temp. de sinterização a 40% da altura do leito	[°C]	n.d.	1305	1310	1320	1330			
vazão do gás de exaustão									
a 60% do tempo do teste	[Nm³/h]	295	300	320	310	330			
no final do teste	[Nm³/h]	605	565	570	640	685			
temperaturas no final do teste									
barra de grelha	[°C]	610	600	570	520	630			
gás de exaustão	[°C]	535	490	540	525	540			
taxa de sinterização	[mm/min]	20,7	21,4	21,2	21,6	21,1			
tempo de sinterização = t [Tmax + 1 min]	[min]	24,1	23,4	23,6	23,2	23,7			
consumo de coque	(kg/t s.f.)	63,5	62,2	62,1	62,2	62,0			
energia total [ignição e sinterização]	[MJ/t s.f.]	2072	2034	2030	2033	2024			
contração do bolo de sínter	[dH %]	12,6	15,0	11,8	11,4	8,6			
retorno de finos sinterizados	[%]	86,6	86,8	86,9	86,8	87,1			
rendimento	[%]	76,9	76,7	76,5	75,2	75,0			
balanço do ret. dos finos sint [ret. ger./ret.adic.]	[%]	96,3	97,3	98,3	103,5	104,7			
produt. final da sinter. [ret. ger./ret.adic.=100]	[t/m².24h]	37,1	38,2	38,3	38,9	38,5			
conteúdo de magnetita (pré-amostrado)	[%]	21,0	19,0	21,0	18,3	20,7			
conteúdo de FeO (pré-amostrado)	[%]	7,2	6,8	7,3	6,3	7,1			
Nota: ***avaliação das propriedades químicas, físicas e metalúrgicas.									
Granulometria das misturas		> 3,15	< 1,0	< 0,1	< 0,04				
		mm	mm	mm	mm				
Minérios	[%]	31,4	50,4	24,3	15,0				
Minérios + aditivos	[%]	25,7	51,5	22,5	14,7				
Minérios + aditivos + coque	[%]	26,1	50,6	21,8	14,2				
Minérios + aditivos + coque + finos de retorno	[%]	30,5	46,2	18,9	11,3				

5.3.4 Série 4 – Séries com a adição de 30% de *pellet screenings* na mistura de referência da Europa Ocidental

Os resultados de testes de sinterização da série 4 com adição de 30% de *pellet screenings* na mistura de referência estão listados na tabela V.18. Foram realizadas um total de cinco queimas. Para essa série de testes de sinterização, a adição de 5,4 partes de coque e 28 partes de finos de retorno alcançou o objetivo do teor de FeO. A umidade da mistura de sinterização variou entre 6,0 e 6,5%. Esses testes de sinterização alcançaram uma produtividade média de $40,4\text{t/m}^2\cdot 24\text{h}$, com uma taxa de coque entre 61,9 a 62,2kg/t de sínter final. O melhor teste (S17794) alcançou uma produtividade de $41,9\text{t/m}^2\cdot 24\text{h}$. O sínter desse teste foi o escolhido para a análise química, física e metalúrgica.

Tabela V.18 – Resultados dos testes de sinterização da série 4

Séries de sinterização	Série 4 - Mist. da EU Ocid. c/ 30% Samarco pellet screenings.								
Condições de sinterização									
sucção na ignição / sinterização	[mbar]	40 a 120 / 160							
tempo de ignição / temperatura	[s] / [°C]	90 / 1220							
leito de sínter / camada de forramento	[mm] / [mm]	500 / 20							
trat. do sínter, tamboramento e peneiramento	[rev] / [mm]	70 / 6,3							
Mistura									
<i>Samarco Pellet screenings</i>	[pts] / [%]	30,00	/	23,91					
Minério A	[pts] / [%]	28,00	/	22,32					
Minério B	[pts] / [%]	24,50	/	19,53					
Finos de retorno	[pts] / [%]	7,00	/	5,58					
Minério C	[pts] / [%]	5,60	/	4,46					
Minério D	[pts] / [%]	4,90	/	3,91					
subtotal		100,00		79,70					
Calcário	[pts] / [%]	20,60	/	16,42					
Olivina	[pts] / [%]	1,75	/	1,39					
Areia	[pts] / [%]	2,13	/	1,70					
Cal virgem	[pts] / [%]	1,00	/	0,80					
	[pts] / [%]	125,48	/	100,00					
Teste n°		S17791	S17792	S17793	S17794	S17795			
mistura de sinterização	[pts]	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00			
água	[pts]	9,81	9,81	9,53	10,12	10,42			
coque	[pts]	5,40	5,35	5,40	5,40	5,40			
finos de retorno (seco)	[pts]	29,00	28,00	28,00	28,00	28,00			
mistura total alimentada (úmida)	[pts]	144,21	143,16	142,93	143,52	143,82			
umidade da mist. total alimentada	[%]	6,1	6,2	6,0	6,3	6,5			
Dados de sinterização									
temperatura de ignição	[°C]	1220	1220	1220	1220	1220			
energia de ignição	[MJ/t f.s.]	201	196	198	197	196			
temp. de sinter. a 40% da altura do leito	[°C]	n.d.	1285	1340	1265	1350			
vazão do gás de exaustão									
a 60% do tempo do teste	[Nm³/h]	300	315	315	335	330			
no final do teste	[Nm³/h]	565	665	610	640	640			
temperaturas no final do teste									
barra de grelha	[°C]	585	515	555	555	490			
gás de exaustão	[°C]	470	465	475	460	440			
taxa de sinterização	[mm/min]	20,6	22,1	21,7	23,1	22,0			
tempo de sinterização = t [Tmax + 1 min]	[min]	24,3	22,6	23,0	21,6	22,7			
consumo de coque	(kg/t FS)	62,3	61,5	62,2	62,2	61,9			
energia total [ignição e sinterização]	[MJ/t f.s.]	2039	2010	2033	2033	2022			
contração do bolo de sínter	[dH %]	14,6	11,8	13,2	12,4	10,6			
retorno de finos sinterizados	[%]	86,7	87,0	86,8	86,8	87,2			
rendimento	[%]	77,0	75,8	77,4	77,1	76,5			
bal. do ret. dos finos sint. [ret. ger./ret.adic.]	[%]	95,8	103,9	96,8	98,3	101,0			
produt. final sinter. [ret. ger./ret.adic.=100]	[t/m².24h]	36,5	40,3	39,1	41,9	40,1			
conteúdo de magnetita (pré-amostrado)	[%]	20,7	18,1	18,5	18,9	19,7			
conteúdo de FeO (pré-amostrado)	[%]	7,1	6,5	6,6	6,8	6,8			
Nota: **avaliação das propriedades químicas, físicas e metalúrgicas.									
Granulometria das misturas									
		> 3,15	< 1,0	< 0,1	< 0,04				
		mm	mm	mm	mm				
Minérios	[%]	34,0	47,6	24,0	15,5				
Minérios + aditivos	[%]	27,6	49,3	22,3	15,0				
Minérios + aditivos + coque	[%]	28,0	48,5	21,6	14,5				
Minérios + aditivos + coque + finos de retorno	[%]	29,8	46,0	19,3	12,0				

5.3.5 Série 5 – Séries com a adição de 40% de *pellet screenings* na mistura de referência da Europa Ocidental

Os resultados de testes de sinterização da série 5 com adição de 40% de *pellet screenings* na mistura de referência estão listados na tabela V.19. Foram realizadas um total de cinco queimas. Para essa série de testes de sinterização, a adição de 5,4 partes de coque e 27 partes de finos de retorno alcançou o objetivo do teor de FeO. A umidade da mistura de sinterização variou entre 6,1 e 6,6%. Esses testes de sinterização alcançaram uma produtividade média de $41,1\text{t/m}^2\cdot 24\text{h}$, com uma taxa de coque entre 61,9 a 62,3kg/t de sínter final. O melhor teste (S17798) alcançou uma produtividade de $42,2\text{t/m}^2\cdot 24\text{h}$. O sínter desse teste foi o escolhido para a análise química, física e metalúrgica.

Tabela V.19 – Resultados dos testes de sinterização da série 5

Séries de sinterização		Série 5 - Mist. da EU Ocid. c/ 40% Samarco pellet screenings .						
Condições de sinterização								
sucção na ignição / sinterização	[mbar]	40 a 120 / 160						
tempo de ignição / temperatura	[s] / [°C]	90 / 1220						
leito de sínter / camada de forramento	[mm] / [mm]	500 / 20						
trat. do sínter, tamboramento e peneiramento	[rev] / [mm]	70 / 6,3						
Mistura								
<i>Samarco Pellet screenings</i>	[pts] / [%]	40,00	/	31,75				
Minério A	[pts] / [%]	24,00	/	19,05				
Minério B	[pts] / [%]	21,00	/	16,67				
Finos de retorno	[pts] / [%]	6,00	/	4,76				
Minério C	[pts] / [%]	4,80	/	3,81				
Minério D	[pts] / [%]	4,20	/	3,33				
subtotal		100,00		79,37				
Calcário	[pts] / [%]	20,800	/	16,51				
Olivina	[pts] / [%]	1,777	/	1,41				
Areia	[pts] / [%]	2,406	/	1,91				
Cal virgem	[pts] / [%]	1,010	/	0,80				
	[pts] / [%]	125,99	/	100,00				
Teste nº		S17796	S17797	S17800	S17798	S17799		
mistura de sinterização	[pts]	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00		
água	[pts]	9,78	9,95	10,12	10,29	10,58		
coque	[pts]	5,40	5,40	5,40	5,40	5,40		
finos de retorno (seco)	[pts]	28,00	27,00	27,00	27,00	27,00		
mistura total alimentada (úmida)	[pts]	143,18	142,35	142,52	142,69	142,98		
umidade da mist. total alimentada	[%]	6,1	6,2	6,3	6,4	6,6		
Dados de sinterização								
temperatura de ignição	[°C]	1220	1220	1220	1220	1220		
energia de ignição	[MJ/t s.f.]	199	196	197	200	196		
temp. de sinter. a 40% da altura do leito	[°C]	n.d.	1270	1365	1360	1365		
vazão do gás de exaustão								
a 60% do tempo do teste	[Nm³/h]	315	330	345	355	335		
no final do teste	[Nm³/h]	585	645	695	650	625		
temperaturas no final do teste								
barra de grelha	[°C]	520	610	570	505	560		
gás de exaustão	[°C]	475	560	455	410	470		
taxa de sinterização	[mm/min]	22,2	22,4	22,7	23,7	22,2		
tempo de sinterização = t [Tmax + 1 min]	[min]	22,5	22,3	22,0	21,1	22,5		
consumo de coque	(kg/t s.f.)	62,1	62,1	61,9	62,3	61,9		
energia total [ignição e sinterização]	[MJ/t s.f.]	2031	2028	2025	2037	2022		
contração do bolo de sínter	[dH %]	15,0	13,6	11,6	14,0	12,0		
retorno de finos sinterizados	[%]	86,9	87,0	87,2	86,7	87,3		
rendimento	[%]	77,4	76,8	76,6	77,3	76,7		
bal. do ret. dos finos sint [ret. ger./ret.adic.]	[%]	97,0	102,6	103,4	100,0	103,0		
produt. final sinter. [ret. ger./ret.adic.=100]	[t/m².24h]	39,8	40,7	41,1	42,2	40,3		
conteúdo de magnetita (pré-amostrado)	[%]	18,6	20,4	17,6	20,9	18,4		
conteúdo de FeO (pré-amostrado)	[%]	6,6	7,0	6,2	7,3	6,5		
Nota: ***avaliação das propriedades químicas, físicas e metalúrgicas.								
Granulometria das misturas		> 3,15	< 1,0	< 0,1	< 0,04			
		mm	mm	mm	mm			
Minérios	[%]	36,5	44,8	23,8	15,9			
Minérios + aditivos	[%]	29,5	47,2	22,1	15,3			
Minérios + aditivos + coque	[%]	29,8	46,5	21,4	14,8			
Minérios + aditivos + coque + finos de retorno	[%]	28,8	46,9	19,6	11,9			

5.4 Testes de sinterização de *pellet screenings* com as misturas da Ásia

5.4.1 Série 6- Séries de referência da mistura Ásia

Os resultados dos testes de sinterização da série 6 de referência estão listados na tabela V.20. Para essa série nenhum *pellet screenings* foi adicionado. Foram realizados um total de sete queimas, e mais um teste para gerar finos de retorno. O balanço da relação de retorno de finos foi baseada no teor de FeO do sínter obtido em quatro testes com 6 partes de coque e a adição de 36 partes de finos de retorno, baseado em 100 partes da mistura de minérios e aditivos. A umidade da mistura de sinterização variou entre 6,1 a 6,8%. Nesses testes a média de produtividade foi de 32,2t/m².24h com uma taxa de coque entre 72,7 a 72,9kg/t de sínter final. O melhor teste (S17692) alcançou uma produtividade de 33.6t/m².24h. O sínter desse teste foi o escolhido para a análise química, física e metalúrgica.

Tabela V.20 – Resultados dos testes de sinterização da série 6

Séries de sinterização		Série 6 - Mistura referência da Ásia							
Condições de sinterização									
sucção na ignição / sinterização	[mbar]	40 a 120 / 160							
tempo de ignição / temperatura	[s] / [°C]	90 / 1220							
leito de sínter / camada de forramento	[mm] / [mm]	500 / 20							
trat. do sínter, tamboramento e peneiramento	[rev] / [mm]	70 / 6,3							
Mistura									
Samarco Pellet screenings	[pts] / [%]	0,00	/	0,00					
Minério G	[pts] / [%]	50,00	/	41,59					
Minério E	[pts] / [%]	20,00	/	16,64					
Minério F	[pts] / [%]	15,00	/	12,48					
Minério H	[pts] / [%]	5,00	/	4,16					
Minério I	[pts] / [%]	5,00	/	4,16					
Minério J	[pts] / [%]	5,00	/	4,16					
	subtotal	100,00		83,19					
Calcário	[pts] / [%]	17,190	/	14,300					
Olivina	[pts] / [%]	1,810	/	1,506					
Areia	[pts] / [%]	0,008	/	0,007					
Cal virgem	[pts] / [%]	1,202	/	1,000					
Cal hidratada	[pts] / [%]	0,000	/	0,000					
	[pts] / [%]	120,21	/	100,00					
teste nº		S17687	S17688	S17689	S17690	S17691	S17694	S17692	S17693
mistura de sinterização	[pts]	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
água	[pts]	7,40	9,58	10,06	10,39	10,39	10,96	10,77	11,16
coque	[pts]	4,00	5,80	5,90	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00
finos de retorno (seco)	[pts]	RF-test	32,00	32,00	32,00	36,00	36,00	36,00	36,00
mistura total alimentada (úmida)	[pts]	111,40	147,38	147,96	148,39	152,39	152,96	152,77	153,16
umidade da mist. total alimentada	[%]		5,7	5,9	6,4	6,1	6,3	6,4	6,8
Dados de sinterização									
temperatura de ignição	[°C]	1220	1220	1220	1220	1220	1220	1220	1220
energia de ignição	[MJ/t s.f.]	237	238	242	244	248	245	245	245
temp. de sinterização a 40% da altura do leito	[°C]	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1315	1385	1385	
vazão do gás de exaustão									
a 60% do tempo do teste	[Nm³/h]	245	n.d.	230	225	205	180	250	
no final do teste	[Nm³/h]	485	530	575	515	540	535	525	
temperaturas no final do teste									
barra de grelha	[°C]	515	340	515	525	440	235	340	
gás de exaustão	[°C]	375	365	440	395	420	370	395	
taxa de sinterização	[mm/min]	19,2	21,9	21,6	21,2	21,5	23,1	22,9	
tempo de sinterização = t [Tmax + 1 min]	[min]	26,1	22,8	23,1	23,6	23,3	21,6	21,8	
consumo de coque	(kg/t s.f.)	70,0	70,1	72,5	72,8	72,8	72,9	72,7	
energia total [ignição e sinterização]	[MJ/t s.f.]	2302	2307	2382	2393	2396	2395	2389	
contração do bolo de sínter	[dH %]	25,6	23,6	25,2	24,0	23,0	23,0	21,6	
retorno de finos sinterizados	[%]	82,9	84,1	82,7	82,4	82,4	82,3	82,6	
rendimento	[%]	71,4	70,5	71,0	71,2	71,0	70,8	69,7	
balanço do ret. dos finos sint [ret. ger./ret.adic.]	[%]	108,1	112,5	109,5	99,6	100,4	100,9	104,8	
produt. final da sinter. [ret. ger./ret.adic.=100]	[t/m².24h]	28,8	32,8	31,9	30,9	30,9	33,6	33,4	
conteúdo de magnetita (pré-amostrado)	[%]	19,7	24,8	26,6	23,0	24,8	26,3	23,8	
conteúdo de FeO (pré-amostrado)	[%]	6,9	8,2	8,5	7,6	8,0	8,4	8,2	
Nota: ***avaliação das propriedades químicas, físicas e metalúrgicas.									
Granulometria das misturas		> 3,15	< 1,0	< 0,1	< 0,04				
		mm	mm	mm	mm				
Minérios	[%]	24,2	49,1	19,1	12,9				
Minérios + aditivos	[%]	20,6	49,8	18,9	13,3				
Minérios + aditivos + coque	[%]	21,4	48,9	18,4	12,8				
Minérios + aditivos + coque + finos de retorno	[%]	30,0	42,6	15,3	9,9				

5.4.2 Série 7 – Séries com a adição de 10% de *pellet screenings* na mistura de referência da Ásia

Os resultados de testes de sinterização da série 7 com adição de 10% de *pellet screenings* na mistura de referência estão listados na tabela V.21. Foram realizados um total de cinco queimas. Para essa série de testes de sinterização, a adição de 5,9 partes de coque e 33 partes de finos de retorno alcançou o objetivo do teor de FeO. A umidade da mistura de sinterização variou entre 5,7 e 6,5%. Esses testes de sinterização alcançaram uma produtividade média de $32,2\text{t/m}^2\cdot 24\text{h}$, com uma taxa de coque entre 69,7 a 70,7kg/t de sínter final. O melhor teste (S17803) alcançou uma produtividade de $34,0\text{t/m}^2\cdot 24\text{h}$. O sínter desse teste foi o escolhido para a análise química, física e metalúrgica.

Tabela V.21 – Resultados dos testes de sinterização da série 7

Séries de sinterização		Série 7 - Mistura da Ásia c/ 10% Samarco pellet screenings .						
Condições de sinterização								
sucção na ignição / sinterização	[mbar]	40 a 120 / 160						
tempo de ignição / temperatura	[s] / [°C]	90 / 1220						
leito de sínter / camada de forramento	[mm] / [mm]	500 / 20						
trat. do sínter, tamboramento e peneiramento	[rev] / [mm]	70 / 6,3						
Mistura								
Samarco Pellet screenings	[pts] / [%]	10,00	/	8,29				
Minério G	[pts] / [%]	45,00	/	37,31				
Minério E	[pts] / [%]	18,00	/	14,93				
Minério F	[pts] / [%]	13,50	/	11,19				
Minério H	[pts] / [%]	4,50	/	3,73				
Minério I	[pts] / [%]	4,50	/	3,73				
Minério J	[pts] / [%]	4,50	/	3,73				
	subtotal	100,00		82,92				
Calcário	[pts] / [%]	17,220	/	14,278				
Olivina	[pts] / [%]	1,820	/	1,509				
Areia	[pts] / [%]	0,356	/	0,295				
Cal virgem	[pts] / [%]	1,206	/	1,000				
	[pts] / [%]	120,60	/	100,00				
teste n.º		S17801	S17802	S17805	S17803	S17804		
mistura de sinterização	[pts]	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00		
água	[pts]	10,13	10,61	10,78	10,95	11,24		
coque	[pts]	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90		
finos de retorno (seco)	[pts]	33,00	33,00	33,00	33,00	33,00		
mistura total alimentada (úmida)	[pts]	149,03	149,51	149,68	149,85	150,14		
umidade da mist. total alimentada	[%]	5,7	6,1	6,2	6,3	6,5		
Dados de sinterização								
temperatura de ignição	[°C]	1220	1220	1220	1220	1220		
energia de ignição	[MJ/t s.f.]	233	234	234	234	236		
temp. de sinterização a 40% da altura do leito	[°C]	n.d.	1335	1355	1275	1380		
vazão do gás de exaustão								
a 60% do tempo do teste	[Nm³/h]	280	290	315	579	315		
no final do teste	[Nm³/h]	600	630	600	305	520		
temperaturas no final do teste								
barra de grelha	[°C]	530	535	615	545	455		
gás de exaustão	[°C]	420	440	405	435	435		
taxa de sinterização	[mm/min]	18,6	21,5	22,1	22,3	22,4		
tempo de sinterização = t [Tmax + 1 min]	[min]	26,9	23,3	22,6	22,4	22,3		
consumo de coque	(kg/t s.f.)	70,5	70,5	70,7	69,7	70,5		
energia total [ignição e sinterização]	[MJ/t s.f.]	2314	2314	2318	2290	2316		
contração do bolo de sínter	[dH %]	26,2	25,2	24,0	26,0	26,4		
retorno de finos sinterizados	[%]	83,6	83,7	83,5	84,6	83,7		
rendimento	[%]	72,5	72,4	72,1	72,1	71,6		
balanço do ret. dos finos sint [ret. ger./ret.adic.]	[%]	102,0	102,5	103,6	104,4	105,4		
produt. final da sinter. [ret. ger./ret.adic.=100]	[t/m².24h]	28,5	32,6	33,7	34,0	33,8		
conteúdo de magnetita (pré-amostrado)	[%]	25,2	25,6	26,1	23,9	27,6		
conteúdo de FeO (pré-amostrado)	[%]	8,2	8,1	8,3	7,9	8,9		
Nota: ***avaliação das propriedades químicas, físicas e metalúrgicas.								
Granulometria das misturas		> 3,15	< 1,0	< 0,1	< 0,04			
		mm	mm	mm	mm			
Minérios	[%]	27,0	47,0	19,5	13,4			
Minérios + aditivos	[%]	22,8	48,2	19,2	13,7			
Minérios + aditivos + coque	[%]	23,5	47,4	18,6	13,2			
Minérios + aditivos + coque + finos de retorno	[%]	29,4	41,6	15,7	10,5			

5.4.3 Série 8 – Séries com a adição de 20% de *pellet screenings* na mistura de referência da Ásia

Os resultados de testes de sinterização da série 8 com adição de 20% de *pellet screenings* na mistura de referência estão listados na tabela V.22. Foram realizadas um total de seis queimas. Para essa série de testes de sinterização, a adição de 6,0 partes de coque e 34 partes de finos de retorno alcançou o objetivo do teor de FeO. A umidade da mistura de sinterização variou entre 6,0 e 6,5%. Esses testes de sinterização alcançaram uma produtividade média de 33,4t/m².24h, com uma taxa de coque entre 71,7 a 71,8kg/t de sínter final. O melhor teste (S17809) alcançou uma produtividade de 34,5t/m².24h. O sínter desse teste foi o escolhido para a análise química, física e metalúrgica.

Tabela V.22 – Resultados dos testes de sinterização da série 8

Séries de sinterização		Série 8 - Mistura da Ásia c/ 20% Samarco pellet screenings .					
Condições de sinterização							
sucção na ignição / sinterização	[mbar]	40 a 120 / 160					
tempo de ignição / temperatura	[s] / [°C]	90 / 1220					
leito de sínter / camada de forramento	[mm] / [mm]	500 / 20					
trat. do sínter, tamboramento e peneiramento	[rev] / [mm]	70 / 6,3					
Mistura							
Samarco Pellet screenings	[pts] / [%]	20,00	/	16,53			
Minério G	[pts] / [%]	40,00	/	33,06			
Minério E	[pts] / [%]	16,00	/	13,22			
Minério F	[pts] / [%]	12,00	/	9,92			
Minério H	[pts] / [%]	4,00	/	3,31			
Minério I	[pts] / [%]	4,00	/	3,31			
Minério J	[pts] / [%]	4,00	/	3,31			
	subtotal	100,00		82,64			
Calcário	[pts] / [%]	17,270	/	14,272			
Olivina	[pts] / [%]	1,831	/	1,513			
Areia	[pts] / [%]	0,696	/	0,575			
Cal virgem	[pts] / [%]	1,210	/	1,000			
	[pts] / [%]	121,01	/	100,00			
teste n.º.		S17806	S17807	S17808	S17811	S17809	S17810
mistura de sinterização	[pts]	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
água	[pts]	10,78	10,93	10,93	10,35	10,74	11,08
coque	[pts]	5,90	5,95	6,00	6,00	6,00	6,00
finos de retorno (seco)	[pts]	33,00	33,00	33,00	34,00	34,00	34,00
mistura total alimentada (úmida)	[pts]	149,68	149,88	149,93	150,35	150,74	151,08
umidade da mist. total alimentada	[%]	6,2	6,4	6,3	6,0	6,3	6,5
Dados de sinterização							
temperatura de ignição	[°C]	1220	1220	1220	1220	1220	1220
energia de ignição	[MJ/t s.f.]	234	234	234	235	236	237
temp. de sinterização a 40% da altura do leito	[°C]	n.d.	1365	1425	1325	1290	1285
vazão do gás de exaustão							
a 60% do tempo do teste	[Nm³/h]	310	310	320	280	315	320
no final do teste	[Nm³/h]	545	565	510	530	580	485
temperaturas no final do teste							
barra de grelha	[°C]	510	480	440	500	455	555
gás de exaustão	[°C]	490	385	400	380	400	485
taxa de sinterização	[mm/min]	22,4	23,4	22,9	21,2	22,8	22,2
tempo de sinterização = t [Tmax + 1 min]	[min]	22,3	21,4	21,8	23,6	21,9	22,5
consumo de coque	(kg/t s.f.)	70,8	71,2	71,3	71,7	71,7	71,8
energia total [ignição e sinterização]	[MJ/t s.f.]	2322	2336	2337	2350	2351	2354
contração do bolo de sínter	[dH %]	25,0	24,4	25,2	25,6	25,6	24,8
retorno de finos sinterizados	[%]	83,4	83,5	84,1	83,7	83,7	83,6
rendimento	[%]	72,3	72,6	72,1	73,7	72,7	72,5
balanço do ret. dos finos sint [ret. ger./ret.adic.]	[%]	102,6	101,9	104,2	95,7	99,3	99,9
produt. final da sinter. [ret. ger./ret.adic.=100]	[t/m².24h]	33,1	34,5	33,4	32,2	34,5	33,5
conteúdo de magnetita (pré-amostrado)	[%]	23,8	23,4	27,3	25,9	25,7	27,1
conteúdo de FeO (pré-amostrado)	[%]	7,6	7,6	8,5	8,1	8,0	8,5
Nota: ***avaliação das propriedades químicas, físicas e metalúrgicas.		*** z					
Granulometria das misturas		> 3,15	< 1,0	< 0,1	< 0,04		
		mm	mm	mm	mm		
Minérios	[%]	29,8	44,8	19,8	14,0		
Minérios + aditivos	[%]	25,0	46,6	19,4	14,2		
Minérios + aditivos + coque	[%]	25,6	45,9	18,9	13,6		
Minérios + aditivos + coque + finos de retorno	[%]	30,5	40,2	15,4	10,6		

5.4.4 Série 9 – Séries com a adição de 30% de *pellet screenings* na mistura de referência da Ásia

Os resultados de testes de sinterização da série 9 com adição de 30% de *pellet screenings* na mistura de referência estão listados na tabela V.23. Foram realizadas um total de seis queimas, incluindo o teste de retorno de finos. Para essa série de testes de sinterização, a adição de 5,9 partes de coque e 34 partes de finos de retorno, alcançou o objetivo do teor de FeO. A umidade da mistura de sinterização variou entre 6,4 e 7,0%. Esses testes de sinterização alcançaram uma produtividade média de 36,2t/m².24h, com uma taxa de coque entre 69,8 a 70,1kg/t de sínter final. O melhor teste (S17816) alcançou uma produtividade de 38,1t/m².24h. O sínter desse teste foi o escolhido para a análise química, física e metalúrgica.

Tabela V.23 – Resultados dos testes de sinterização da série 9

Séries de sinterização		Série 9 - Mistura da Ásia c/ 30% Samarco pellet screenings .						
Condições de sinterização								
sucção na ignição / sinterização	[mbar]	40 a 120 / 160						
tempo de ignição / temperatura	[s] / [°C]	90 / 1220						
leito de sínter / camada de forramento	[mm] / [mm]	500 / 20						
trat. do sínter, tamboramento e peneiramento	[rev] / [mm]	70 / 6,3						
Mistura								
Samarco Pellet screenings	[pts] / [%]	30,00	/	24,71				
Minério G	[pts] / [%]	35,00	/	28,83				
Minério E	[pts] / [%]	14,00	/	11,53				
Minério F	[pts] / [%]	10,50	/	8,65				
Minério H	[pts] / [%]	3,50	/	2,88				
Minério I	[pts] / [%]	3,50	/	2,88				
Minério J	[pts] / [%]	3,50	/	2,88				
	subtotal	100,00		82,37				
Calcário	[pts] / [%]	17,320	/	14,266				
Olivina	[pts] / [%]	1,843	/	1,518				
Areia	[pts] / [%]	1,028	/	0,847				
Cal virgem	[pts] / [%]	1,214	/	1,000				
	[pts] / [%]	121,41	/	100,00				
teste n.º		S17812	S17813	S17814	S17815	S17816	S17817	
mistura de sinterização	[pts]	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	
água	[pts]	10,86	11,23	11,03	11,33	11,67	12,01	
coque	[pts]	6,00	6,00	5,90	5,90	5,90	5,90	
finos de retorno (seco)	[pts]	34,00	34,00	34,00	34,00	34,00	34,00	
mistura total alimentada (úmida)	[pts]	150,86	151,23	150,93	151,23	151,57	151,91	
umidade da mist. total alimentada	[%]	6,3	6,6	6,4	6,5	6,7	7,0	
Dados de sinterização								
temperatura de ignição	[°C]	1220	1220	1220	1220	1220	1220	
energia de ignição	[MJ/t s.f.]	235	235	236	234	233	232	
temp. de sinterização a 40% da altura do leito	[°C]	n.d.	1335	1345	1430	1395	1330	
vazão do gás de exaustão								
a 60% do tempo do teste	[Nm³/h]	320	345	330	325	345	335	
no final do teste	[Nm³/h]	510	600	580	525	620	600	
temperaturas no final do teste								
barra de grelha	[°C]	565	460	595	595	490	525	
gás de exaustão	[°C]	435	400	495	515	420	465	
taxa de sinterização	[mm/min]	22,3	25,1	23,5	23,4	24,9	23,3	
tempo de sinterização = t [Tmax + 1 min]	[min]	22,4	19,9	21,3	21,4	20,1	21,5	
consumo de coque	(kg/t s.f.)	71,4	71,4	70,0	70,1	69,8	69,8	
energia total [ignição e sinterização]	[MJ/t s.f.]	2342	2341	2302	2301	2292	2292	
contração do bolo de sínter	[dH %]	24,6	22,6	23,6	24,4	23,0	20,6	
retorno de finos sinterizados	[%]	84,0	84,1	84,2	84,2	84,5	84,5	
rendimento	[%]	72,7	73,2	73,3	72,8	73,3	72,4	
balanço do ret. dos finos sint [ret. ger./ret.adic.]	[%]	99,5	97,6	95,7	99,5	97,9	101,0	
produt. final da sinter. [ret. ger./ret.adic.=100]	[t/m².24h]	33,8	38,1	35,4	35,6	38,1	35,8	
conteúdo de magnetita (pré-amostrado)	[%]	26,5	28,2	26,3	24,8	28,1	25,4	
conteúdo de FeO (pré-amostrado)	[%]	8,3	8,8	8,3	8,0	8,8	7,9	
Nota: ***avaliação das propriedades químicas, físicas e metalúrgicas.								
Granulometria das misturas		> 3,15	< 1,0	< 0,1	< 0,04			
		mm	mm	mm	mm			
Minérios	[%]	32,5	42,7	20,1	14,5			
Minérios + aditivos	[%]	27,2	45,0	19,6	14,6			
Minérios + aditivos + coque	[%]	27,7	44,4	19,1	14,0			
Minérios + aditivos + coque + finos de retorno	[%]	37,9	36,6	15,3	10,8			

5.4.5 Série 10 – Séries com a adição de 40% de *pellet screenings* na mistura de referência da Ásia

Os resultados de testes de sinterização da série 10 com adição de 40% de *pellet screenings* na mistura de referência estão listados na tabela V.24. Foram realizadas um total de sete queimas. Para essa série de testes de sinterização, a adição de 5,9 partes de coque e 34 partes de finos de retorno alcançou o objetivo do teor de FeO. A umidade da mistura de sinterização variou entre 6,4 e 7,4%. Esses testes de sinterização alcançaram uma produtividade média de $38,8\text{t/m}^2\cdot 24\text{h}$, com uma taxa de coque entre 69,8 a 70,1kg/t de sínter final. O melhor teste (S17823) alcançou uma produtividade de $39,7\text{t/m}^2\cdot 24\text{h}$. O sínter desse teste foi o escolhido para a análise química, física e metalúrgica.

Tabela V.24 – Resultados dos testes de sinterização da série 10

Séries de sinterização		Série 10 - Mistura da Ásia c/ 40% <i>Samarco pellet screenings</i> .							
Condições de sinterização									
sucção na ignição / sinterização	[mbar]	40 a 120 / 160							
tempo de ignição / temperatura	[s] / [°C]	90 / 1220							
leito de sínter / camada de forramento	[mm] / [mm]	500 / 20							
trat. do sínter, tamboramento e peneiramento	[rev] / [mm]	70 / 6,3							
Mistura									
Samarco Pellet screenings	[pts] / [%]	40,00 / 32,84							
Minério G	[pts] / [%]	30,00 / 24,63							
Minério E	[pts] / [%]	12,00 / 9,85							
Minério F	[pts] / [%]	9,00 / 7,39							
Minério H	[pts] / [%]	3,00 / 2,46							
Minério I	[pts] / [%]	3,00 / 2,46							
Minério J	[pts] / [%]	3,00 / 2,46							
	subtotal	100,00 / 82,10							
Calcário	[pts] / [%]	17,350 / 14,245							
Olivina	[pts] / [%]	1,854 / 1,522							
Areia	[pts] / [%]	1,377 / 1,131							
Cal virgem	[pts] / [%]	1,218 / 1,000							
	[pts] / [%]	121,80 / 100,00							
teste n°.		S17818	S17819	S17820	S17821	S17822	S17823	S17824	
mistura de sinterização	[pts]	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	
água	[pts]	10,85	11,18	11,52	11,86	12,20	12,69	13,08	
coque	[pts]	5,80	5,85	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90	
finos de retorno (seco)	[pts]	36,00	35,00	34,00	34,00	34,00	34,00	34,00	
mistura total alimentada (úmida)	[pts]	150,75	151,08	151,42	151,76	152,10	152,59	152,98	
umidade da mist. total alimentada	[%]	6,4	6,8	7,0	7,1	7,3	7,4	7,4	
Dados de sinterização									
temperatura de ignição	[°C]	1220	1220	1220	1220	1220	1220	1220	
energia de ignição	[MJ/t s.f.]	230	233	229	230	229	228	226	
temp. de sinterização a 40% da altura do leito	[°C]	n.d.	1280	1340	1340	1280	1405	1355	
vazão do gás de exaustão									
a 60% do tempo do teste	[Nm³/h]	330	335	330	330	335	355	325	
no final do teste	[Nm³/h]	615	635	590	555	555	590	590	
temperaturas no final do teste									
barra de grelha	[°C]	480	480	490	485	540	510	515	
gás de exaustão	[°C]	375	400	425	460	450	430	390	
taxa de sinterização	[mm/min]	22,5	22,8	24,9	24,9	24,9	25,4	24,4	
tempo de sinterização = t [Tmax + 1 min]	[min]	22,2	21,9	20,1	20,1	20,1	19,7	20,5	
consumo de coque	(kg/t s.f.)	69,6	70,2	69,7	69,5	69,5	69,3	69,1	
energia total [ignição e sinterização]	[MJ/t s.f.]	2284	2305	2284	2280	2280	2272	2263	
contração do bolo de sínter	[dH %]	23,6	21,6	19,8	20,0	20,0	16,6	19,2	
retorno de finos sinterizados	[%]	84,8	84,0	84,7	85,0	84,9	85,2	85,5	
rendimento	[%]	72,7	72,6	73,4	73,4	73,7	72,3	72,9	
balanço do ret. dos finos sint [ret. ger./ret.adic.]	[%]	100,2	99,8	97,5	97,9	96,5	101,8	99,8	
produt. final da sinter. [ret. ger./ret.adic.=100]	[t/m².24h]	34,9	35,0	38,7	38,5	38,8	39,7	38,4	
conteúdo de magnetita (pré-amostrado)	[%]	23,2	25,6	23,3	26,6	27,5	26,2	29,2	
conteúdo de FeO (pré-amostrado)	[%]	7,3	7,8	7,4	8,1	8,4	8,0	9,1	
Nota: ***avaliação das propriedades químicas, físicas e metalúrgicas.									
Granulometria das misturas		> 3,15	< 1,0	< 0,1	< 0,04				
		mm	mm	mm	mm				
Minérios	[%]	35,3	40,6	20,5	15,1				
Minérios + aditivos	[%]	29,4	43,4	19,9	15,0				
Minérios + aditivos + coque	[%]	29,7	42,9	19,3	14,5				
Minérios + aditivos + coque + finos de retorno	[%]	36,5	36,4	15,7	11,1				

O resumo dos testes de sinterização selecionados de cada série dos sínteres da mistura da Europa Ocidental é apresentado na tabela V.25 e para os testes de sinterização selecionados de cada série dos sínteres da mistura da Ásia na tabela V.26.

Tabela V.25 - Resumo dos testes de sinterização selecionados de cada série dos sínteres da mistura da Europa Ocidental

Séries de sinterização		1	2	3	4	5
Samarco pellet screenings	[%]	-	10	20	30	40
Minério A	[%]	40	36	32	28	24
Minério B	[%]	35	31,5	28	24,5	21
Finos de retorno	[%]	10	9	8	7	6
Minério C	[%]	8	7,2	6,4	5,6	4,8
Minério D	[%]	7	6,3	5,6	4,9	4,2
Teste nº		S17641	S S17783	S S17790	S S17794	S S17798
Umidade da mistura total alimentada	[%]	6,0	5,8	6,3	6,3	6,4
Finos de retorno	[pts./100 pts.mist.total alim.]	32,0	29,0	29,0	28,0	27,0
Coque	[pts./100 pts.mist. total alim.]	5,6	5,5	5,4	5,4	5,4
Consumo esp. de coque	[kg/t s.f.]	65,4	63,8	62,2	62,2	62,3
Temp. de sint. a 40% da alt. do leito	[°C]	1320	1325	1320	1265	1360
Taxa de sinterização	[mm/min]	20,3	21,5	21,6	23,1	23,7
Vazão gás exaust. 60% tempo teste	[Nm³/h]	275	300	310	335	355
Produtividade	[t/m².24 h]	35,4	38,5	38,9	41,9	42,2
Produtividade média das séries	[t/m².24 h]	34,5	37,4	38,5	40,4	41,1
Análise química						
Fe _{tot}	[%]	56,23	56,25	56,24	56,23	56,36
FeO	[%]	7,30	7,33	7,25	7,35	7,07
SiO ₂	[%]	5,89	5,99	5,99	6,04	5,94
Al ₂ O ₃	[%]	1,14	1,06	1,04	0,99	0,95
CaO	[%]	11,60	11,60	11,58	11,65	11,57
MgO	[%]	1,03	1,04	1,02	1,04	1,04
P	[%]	0,028	0,029	0,031	0,033	0,033
S	[%]	0,018	0,017	0,015	0,014	0,013
Na ₂ O	[%]	0,019	0,022	0,024	0,027	0,025
K ₂ O	[%]	0,039	0,041	0,040	0,037	0,040
Mn	[%]	0,330	0,300	0,280	0,265	0,250
TiO ₂	[%]	0,071	0,066	0,066	0,066	0,065
V	[%]	0,004	0,004	0,004	0,004	0,003
L.O.I.	[%]	0,08	0,05	0,08	0,06	0,08
Basicidade CaO/SiO ₂		1,97	1,94	1,93	1,93	1,95
Análise química, 10-12,5mm						
Fe _{tot}	[%]	56,90	56,25	56,32	56,22	56,49
FeO	[%]	7,55	7,56	7,44	7,45	7,15
Granulometria						
> 50 mm	[% / acum.%]	0 / 0	0 / 0	0 / 0	1 / 1	1 / 1
50 - 40 mm	[% / acum.%]	17 / 17	4 / 4	4 / 4	2 / 3	2 / 3
40 - 25 mm	[% / acum.%]	11 / 28	15 / 19	15 / 19	15 / 18	17 / 20
25 - 20 mm	[% / acum.%]	10 / 38	13 / 32	12 / 31	14 / 32	13 / 33
20 - 16 mm	[% / acum.%]	14 / 52	15 / 47	16 / 47	14 / 46	15 / 48
16 - 10 mm	[% / acum.%]	27 / 79	29 / 76	27 / 74	30 / 76	28 / 76
10 - 6,3 mm	[% / acum.%]	21 / 100	24 / 100	26 / 100	24 / 100	24 / 100
Teste de tamboramento, ISO 3271						
resistência > 6,3 mm	[%]	78,9	80,9	80,6	80,5	81,0
abrasão < 0,5 mm	[%]	4,6	4,4	4,7	4,4	4,3
Teste de redução, ISO 4695 [950°C]						
redutibilidade (dR/dt)40	[%/min]	1,13	1,15	1,16	1,13	1,17
grau de redução após 65%	[min]	53,7	52,9	52,1	52,9	51,9
Degradação estática, ISO 4696-1, 500°C						
resistência > 6,3 mm	[%]	53,0	52,5	48,4	50,7	54,4
índice < 3,15 mm	[%]	17,8	18,6	19,2	18,6	16,6
abrasão < 0,5 mm	[%]	4,1	4,3	4,4	4,3	3,7

Tabela V.26 - Resumo dos testes de sinterização selecionados de cada série dos sínteres da mistura da Ásia

Séries de sinterização		6	7	8	9	10
Samarco pellet screenings	[%]	-	10	20	30	40
Minério G	[%]	50	45	40	35	30
Minério E	[%]	20	18	16	14	12
Minério F	[%]	15	13,5	12	10,5	9
Minério H	[%]	5	4,5	4	3,5	3
Minério I	[%]	5	4,5	4	3,5	3
Minério J	[%]	5	4,5	4	3,5	3
teste n°		S17692	S17803	S17809	S17816	S17823
Umidade da mistura total alimentada	[%]	6,4	6,3	6,3	6,7	7,4
Finos de retorno	[pts./100 pts.mist.total alim.]	36,0	33,0	34,0	34,0	34,0
Coque	[pts./100 pts.mist. total alim.]	6,0	5,9	6,0	5,9	5,9
Consumo esp. de coque	[kg/t s.f.]	72,9	69,7	71,7	69,8	69,3
Temp. de sint. a 40% da alt, do leito	[°C]	1385	1275	1290	1395	1405
Taxa de sinterização	[mm/min]	23,1	22,3	22,8	24,9	25,4
Vazão gás exhaust. 60% tempo teste	[Nm³/h]	180	579	315	345	355
Produtividade	[t/m².24 h]	33,6	34,0	34,5	38,1	39,7
Produtividade média das séries	[t/m².24 h]	32,2	32,2	33,4	36,2	38,8
Análise química						
Fe _{tot}	[%]	57,68	57,73	57,75	57,75	57,88
FeO	[%]	8,32	8,23	8,61	8,69	8,72
SiO ₂	[%]	5,45	5,48	5,52	5,50	5,48
Al ₂ O ₃	[%]	1,46	1,39	1,33	1,24	1,18
CaO	[%]	9,90	9,78	9,97	10,05	10,00
MgO	[%]	1,01	1,03	1,03	1,03	1,02
P	[%]	0,039	0,040	0,041	0,040	0,041
S	[%]	0,008	0,007	0,005	0,008	0,005
Na ₂ O	[%]	0,021	0,024	0,025	0,027	0,030
K ₂ O	[%]	0,031	0,033	0,031	0,035	0,031
Mn	[%]	0,210	0,195	0,170	0,150	0,135
TiO ₂	[%]	0,076	0,072	0,064	0,067	0,065
V	[%]	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
Basicidade CaO/SiO ₂		1,82	1,78	1,81	1,83	1,82
Análise química						
Fe _{tot} 18-20 mm	[%]	57,77	57,92	57,86	57,92	58,18
FeO 18-20 mm	[%]	8,55	8,10	8,49	8,75	8,67
Granulometria						
> 50 mm	[% / acum.%]	1 / 1	1 / 1	1 / 1	0 / 0	1 / 1
50 - 40 mm	[% / acum.%]	3 / 4	4 / 5	4 / 5	3 / 3	2 / 3
40 - 25 mm	[% / acum.%]	16 / 20	19 / 24	16 / 21	14 / 17	14 / 17
25 - 20 mm	[% / acum.%]	13 / 33	14 / 38	15 / 36	13 / 30	12 / 29
20 - 16 mm	[% / acum.%]	14 / 47	14 / 52	14 / 50	12 / 42	14 / 43
16 - 10 mm	[% / acum.%]	30 / 77	26 / 78	27 / 77	32 / 74	29 / 72
10 - 6,3 mm	[% / acum.%]	23 / 100	22 / 100	23 / 100	26 / 100	28 / 100
Teste de tamboramento, ISO 3271						
resistência > 6,3 mm	[%]	74,7	76,7	76,4	76,5	76,3
abrasão < 0,5 mm	[%]	5,5	5,6	5,4	5,1	5,1
Teste de redução, ISO 7215 [900°C]						
reducibilidade (dR/dt)40	[%/min]	0,40	0,37	0,34	0,32	0,32
índice reducibilidade final do teste	[%]	71,7	66,8	65,2	62,7	63,7
Desintegração estática, ISO 4696-2, 550°C						
resistência > 6,3 mm	[%]	41,7	44,9	48,9	47,8	49,6
índice < 3,15 mm	[%]	30,4	30,0	26,0	25,8	22,2
índice < 2,8 mm	[%]	27,7	28,0	24,2	24,1	20,7
abrasão < 0,5 mm	[%]	8,7	8,6	8,0	7,8	6,5

6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

6.1 Testes de sinterização de *pellet feed* com as misturas da Europa Ocidental

No processo convencional de sinterização, sem pré-aglomeração, a produtividade média de sinterização reduziu de $34,5\text{t/m}^2\cdot 24\text{h}$ para $33,1$ e $32,1\text{t/m}^2\cdot 24\text{h}$, respectivamente, com 10% e 20% de adição de *pellet feed* Samarco na mistura de sinterização. O consumo de coque foi praticamente idêntico ao da referência, $65,4\text{kg/t}$, ficando em $65,5$ e $65,8\text{kg/t}$ respectivamente, para 10% e 20% de adição de *pellet feed* Samarco na mistura de sinterização. A figura 6.1 mostra esses resultados.

Quando o *pellet feed* é pré-aglomerado com 10% de cal hidratada em um misturador intensivo, tipo EIRICH, a produtividade média de sinterização aumentou de $34,5\text{t/m}^2\cdot 24\text{h}$ para $37,6$ e $39,2\text{t/m}^2\cdot 24\text{h}$, respectivamente, com a adição 20% e 30% de *pellet feed* Samarco pré-aglomerado na mistura de sinterização. Com a adição de 40% de *pellet feed* Samarco pré-aglomerado na mistura de sinterização, a produtividade de sinterização média reduziu para $36,7\text{t/m}^2\cdot 24\text{h}$. Entretanto, essa produtividade média ainda é maior que a produtividade média de referência sem a adição de *pellet feed* Samarco. Houve também a redução do consumo de coque que ficou em $62,3$ e $62,4\text{kg/t}$, respectivamente, para 20% e 30% de adição de *pellet feed* Samarco na mistura de sinterização. Para 40% de adição o consumo de coque ainda ficou abaixo da referência com o valor de $63,8\text{kg/t}$.

Esses resultados estão representados na figura 6.2, que mostra claramente a vantagem da pré-aglomeração do *pellet feed* Samarco, tanto na produtividade quanto no consumo de coque.

As composições químicas dos sínteres foram intencionalmente ajustadas para os mesmos níveis de Fe e SiO_2 , para manter a mesma qualidade química e com isso não provocar alterações nos resultados. Como o *pellet feed* Samarco é mais rico em ferro foi adicionada sílica na forma de areia na mistura. Portanto, a utilização de *pellet feed* Samarco na mistura de sinterização permite a utilização de minérios mais pobres em

ferro ou proporcionar um aumento do teor de ferro do sinter. Com isso o produtor de sinter pode ter mais flexibilidade para adquirir minérios de ferro para seu consumo.

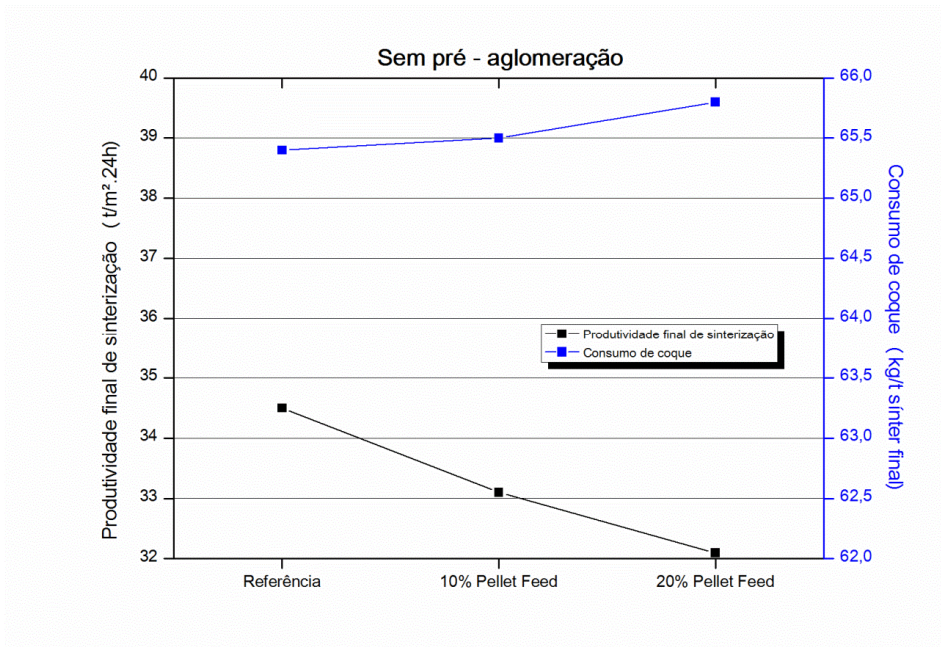


Figura 6.1 – Efeito da adição de *pellet feed* sem pré-aglomeração na mistura de sinterização da Europa Ocidental na produtividade e consumo de coque.

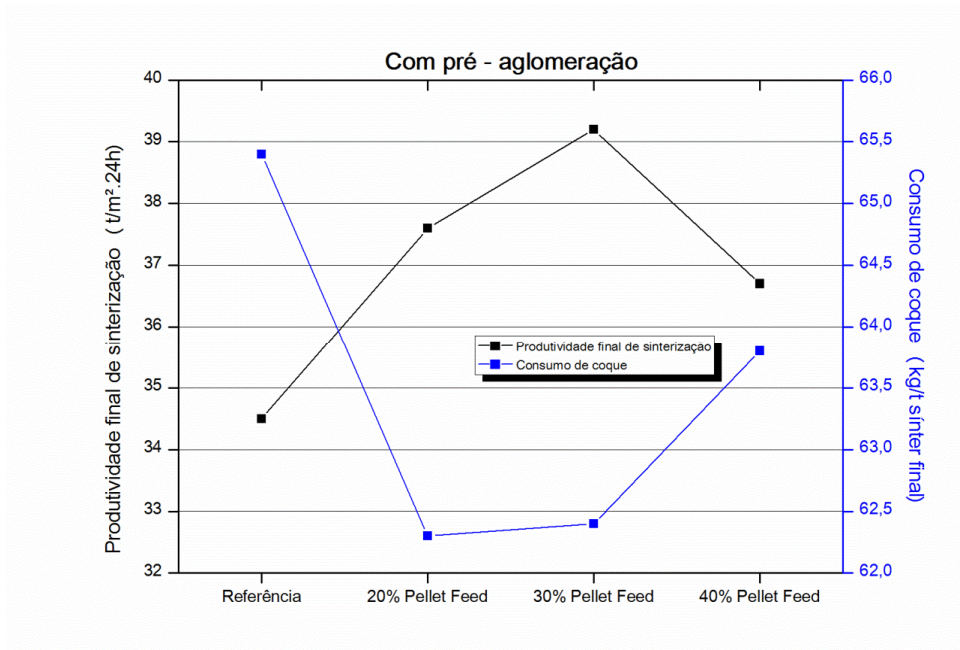


Figura 6.2 – Efeito da adição de *pellet feed* com pré-aglomeração na mistura de sinterização da Europa Ocidental na produtividade e consumo de coque.

Para a avaliação da característica física do sinter foi utilizada a norma ISO 3271:2007 *Iron Ores for Blast Furnace and Direct Reduction Feedstocks-Determination of Tumble Strength and Abrasion Indices*. Para as adições de 10 e 20% de *pellet feed* Samarco sem pré-aglomeração na mistura de sinterização houve uma melhoria de ~1% na resistência ao tamboramento, como pode ser visto na figura 6.3. Para os testes com pré-aglomeração, com a adição de 20% de *pellet feed* não houve alteração na resistência ao tamboramento, entretanto para as adições de 30 e 40% de *pellet feed* Samarco na mistura de sinterização houve um decréscimo de ~1-1,5% na resistência ao tamboramento. Esse efeito pode ser mitigado na máquina de sinterização industrial com uma pequena redução da produtividade. Em relação ao índice de abrasão, não houve alteração em todos os casos. A figura 6.4 mostra esse comportamento.

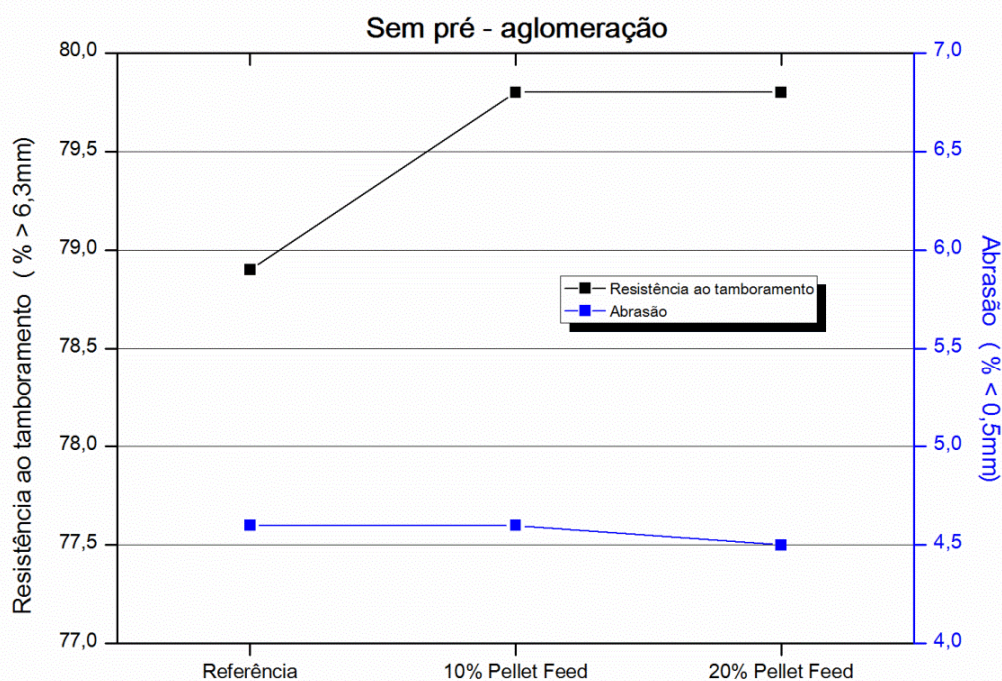


Figura 6.3 – Efeito da adição de *pellet feed* sem pré-aglomeração na mistura de sinterização da Europa Ocidental na resistência ao tamboramento e abrasão.

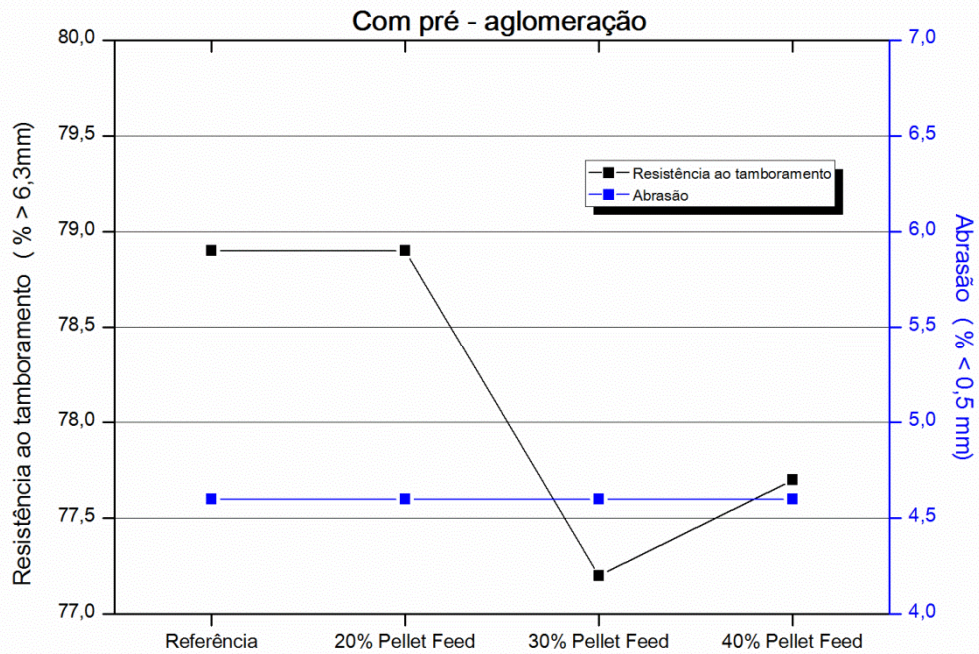


Figura 6.4 – Efeito da adição de *pellet feed* com pré-aglomeração na mistura de sinterização da Europa Ocidental na resistência ao tamboramento e abrasão.

A figura 6.5 demonstra que a adição de *pellet feed* Samarco sem pré-aglomeração aumenta a redutibilidade de acordo a norma ISO 4695:2007 *Iron Ores for Blast Furnace Feedstocks — Determination of Reducibility by the Rate of Reduction Index*, em relação ao sinter de referência. Esse efeito também foi encontrado para a sinterização com pré-aglomeração, conforme mostrado na figura 6.6. Uma redutibilidade superior pode proporcionar um menor *coke rate* no alto-forno.

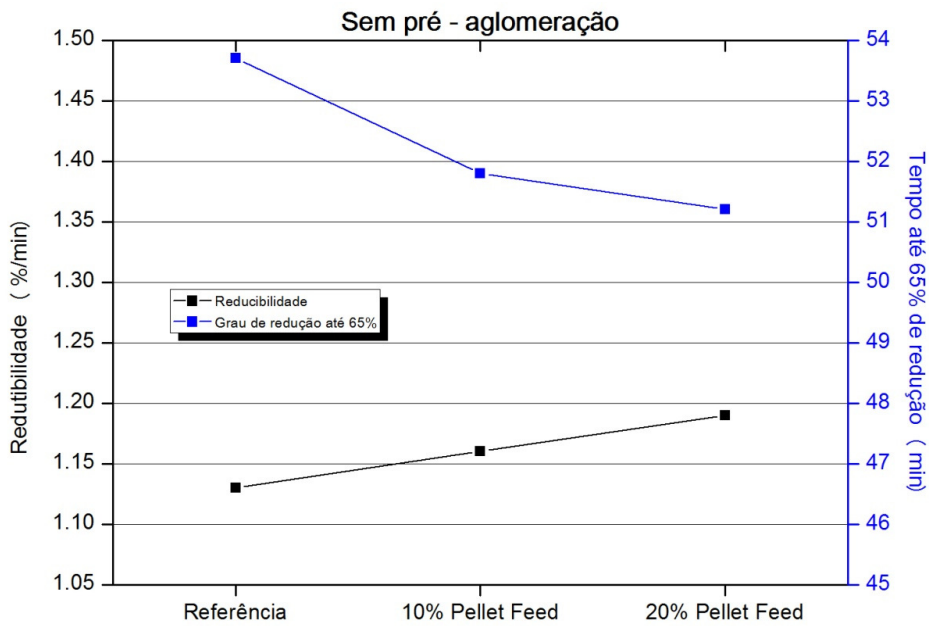


Figura 6.5 – Efeito da adição de *pellet feed* sem pré-aglomeração na mistura de sinterização da Europa Ocidental na redutibilidade e no tempo de redução.

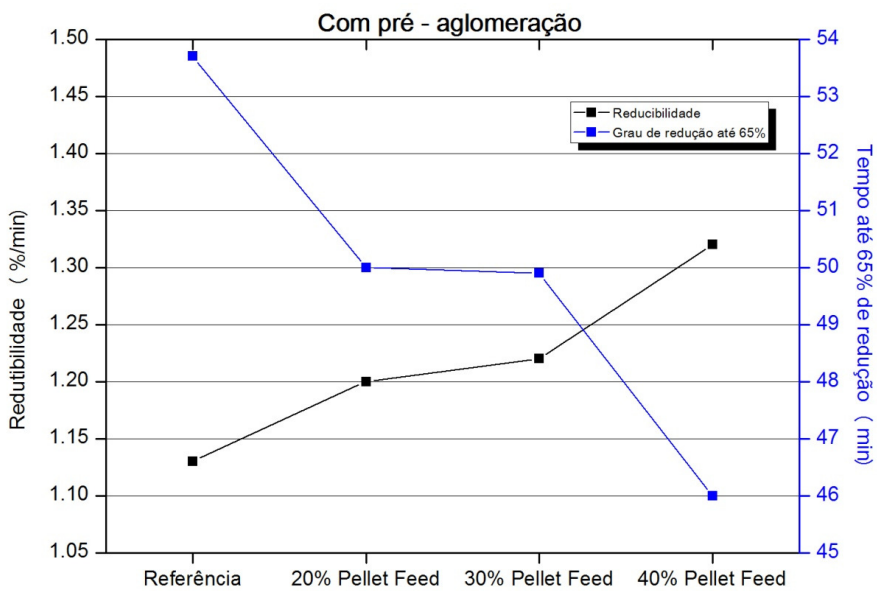


Figura 6.6 – Efeito da adição de *pellet feed* com pré-aglomeração na mistura de sinterização da Europa Ocidental na redutibilidade e no tempo de redução.

Todos os sínteres produzidos alcançaram excelentes resultados de RDI de acordo com a norma ISO 4696-1:2007 *Iron Ores for Blast Furnace Feedstocks – Determination of*

Low-temperature Reduction Disintegration Indices by Static Method - Part 1: Reaction with CO, CO₂, H₂ and N₂, como mostrado nas figuras 6.7 e 6.8. Os resultados indicam também uma melhoria do valor do RDI<3,5mm, com o aumento de adição do *pellet feed* Samarco, muito provavelmente devido ao decréscimo do teor de alumina nos sinteres.

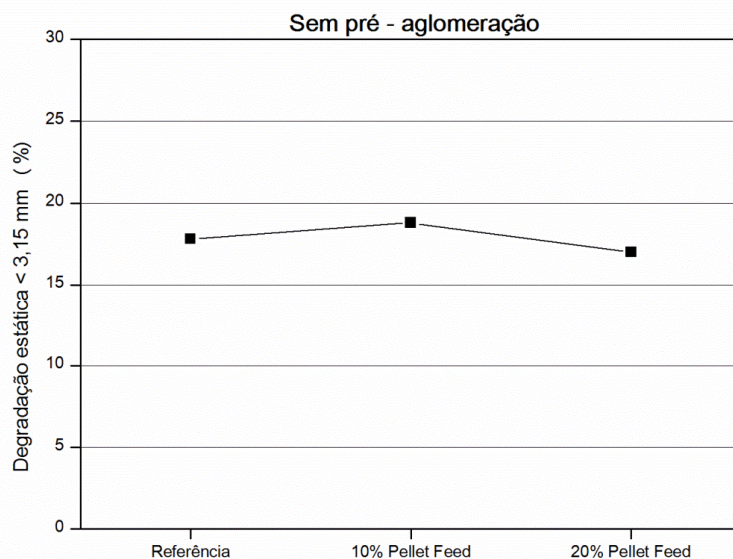


Figura 6.7 – Efeito da adição de *pellet feed* sem pré-aglomeração na mistura de sinterização da Europa Ocidental na degradação estática <3,15mm.

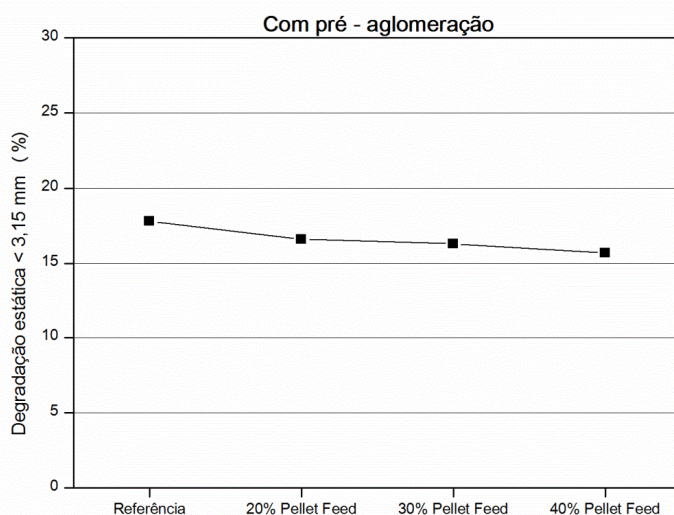


Figura 6.8 – Efeito da adição de *pellet feed* com pré-aglomeração na mistura de sinterização da Europa Ocidental na degradação estática <3,15mm.

6.2 Testes de sinterização de *pellet feed* com as misturas da Ásia

No processo convencional de sinterização, sem pré-aglomeração, a produtividade média de sinterização reduziu de 32,2t/m².24h para 31,0 e 29,5t/m².24h, respectivamente, com 10% e 20% de adição de *pellet feed* Samarco na mistura de sinterização. O consumo de coque foi praticamente idêntico ao da referência, 72,9kg/t ficando em 72,4 e 72,6kg/t, respectivamente, para 10% e 20% de adição de *pellet feed* Samarco na mistura de sinterização, como pode ser observado na figura 6.9.

Quando o *pellet feed* é pré-aglomerado com 10% de cal hidratada em um misturador intensivo, tipo EIRICH, a produtividade média de sinterização aumentou de 32,2t/m².24h para 32,5t/m².24h com a adição 20% e reduziu para 31,1 e 30,5t/m².24h, respectivamente com 30% e 40% de *pellet feed* Samarco pré-aglomerado na mistura de sinterização. Houve também a redução do consumo de coque que ficou em 71,2, 69,0 e 67,7kg/t, respectivamente, para 20%, 30% e 40% de adição de *pellet feed* Samarco na mistura de sinterização. Apesar da pré-aglomeração o aumento da participação de *pellet feed* Samarco afeta a produtividade. Entretanto o consumo de coque diminui na medida que aumenta a participação de *pellet feed* Samarco na mistura a ser sinterizada. Esses resultados estão representados graficamente na figura 6.10.

As composições químicas dos sínteres foram intencionalmente ajustadas para os mesmos níveis de Fe e SiO₂ mantendo-se a mesma qualidade química, para não provocar alterações nos resultados. Como o *pellet feed* Samarco é mais rico em ferro, foi adicionada sílica na forma de areia na mistura. Portanto, a utilização de *pellet feed* Samarco na mistura de sinterização permite a utilização de minérios mais pobres em ferro ou proporcionar um aumento do teor de ferro do sínter. Com isso o produtor de sínter pode ter mais flexibilidade para adquirir minérios de ferro para seu consumo.

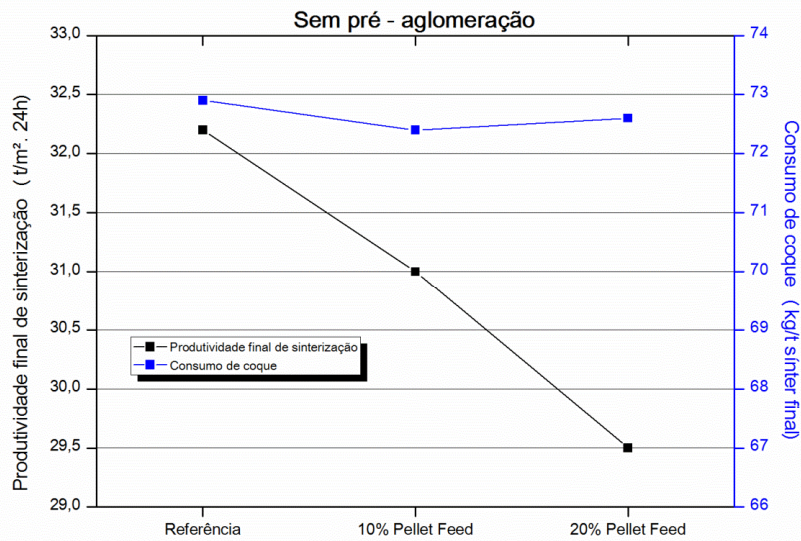


Figura 6.9 – Efeito da adição de *pellet feed* sem pré-aglomeração na mistura de sinterização da Ásia na produtividade e consumo de coque.

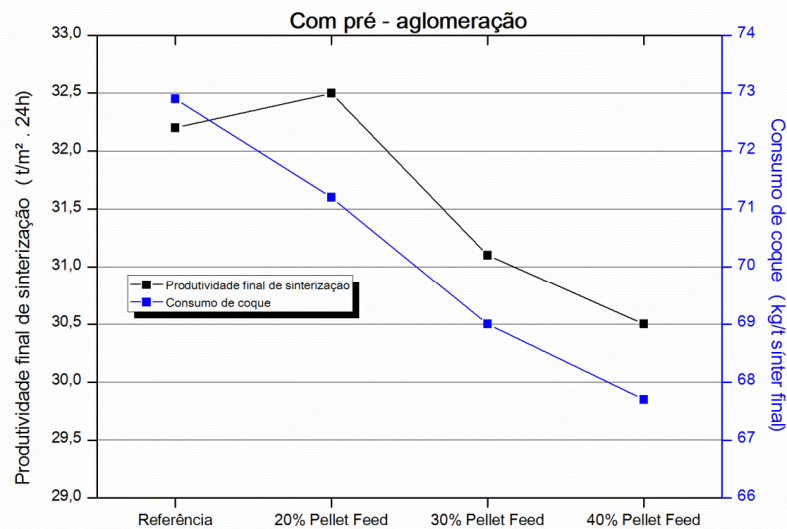


Figura 6.10 – Efeito da adição de *pellet feed* com pré-aglomeração na mistura de sinterização da Ásia na produtividade e consumo de coque.

Para a avaliação da característica física do sinter foi utilizada a norma ISO 3271:2007 *Iron Ores for Blast Furnace and Direct Reduction Feedstocks-Determination of Tumble Strength and Abrasion Indices*. Para as adições de 10 e 20% de *pellet feed* Samarco na mistura de sinterização sem pré-aglomeração houve uma melhoria de ~1,47 a 2,94% na

resistência ao tamboramento. Para os testes com pré-aglomeração, para as adições de 20, 30 e 40% de *pellet feed* Samarco na mistura de sinterização houve um aumento de ~1,2 a 1,6% na resistência ao tamboramento. Em relação ao índice de abrasão, não houve alteração significativa nos experimentos sem pré-aglomeração, com pré-aglomeração houve ligeiro aumento do índice de abrasão. As figuras 6.11 e 6.12 mostram esse comportamento.

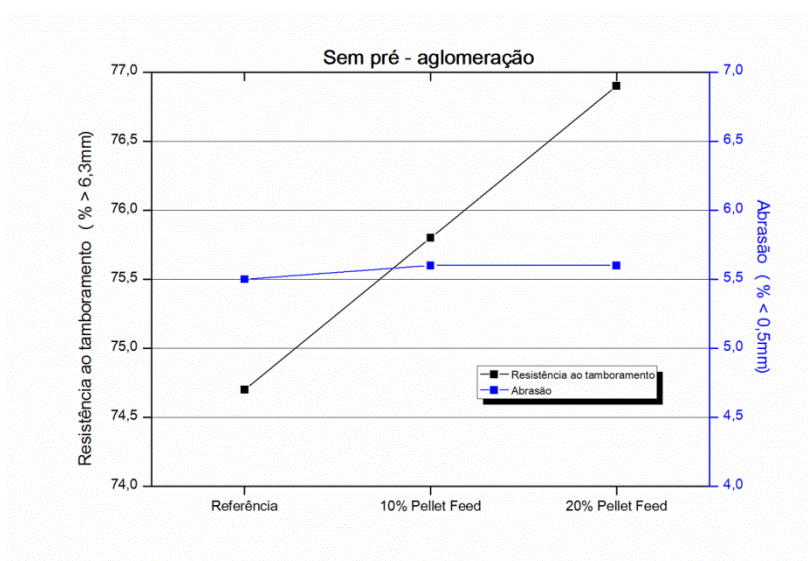


Figura 6.11 – Efeito da adição de *pellet feed* sem pré-aglomeração na mistura de sinterização da Ásia na resistência ao tamboramento e abrasão.

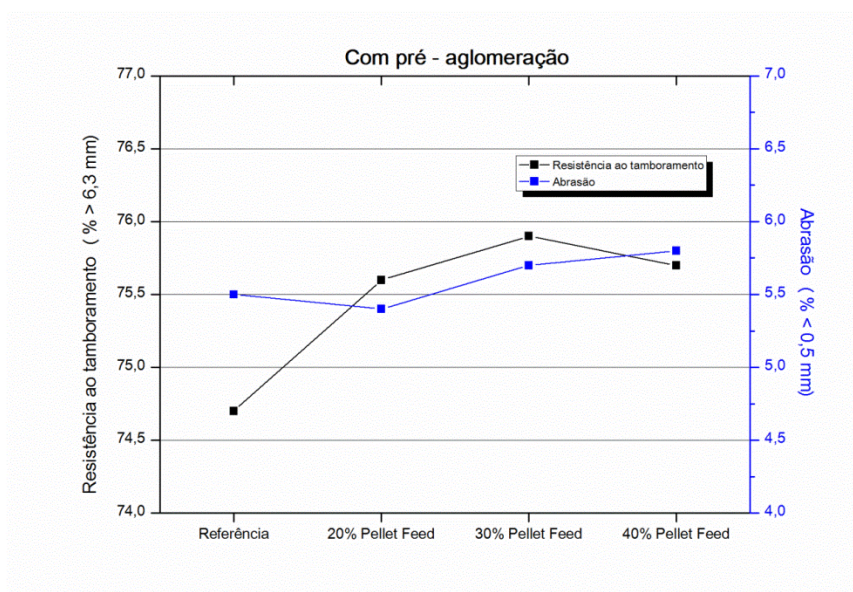


Figura 6.12 – Efeito da adição de *pellet feed* com pré-aglomeração na mistura de sinterização da Ásia na resistência ao tamboramento e abrasão

O índice de redução, de acordo com a ISO 7215:2007 *Iron Ores for Blast Furnace Feedstocks — Determination of the Reducibility by the Final Degree of Reduction Index*, foi similar para todos os sínteres testados, sem e com pré-aglomeração. O comportamento de degradação, de acordo com a norma ISO 4696-2:2007 *Iron Ores for Blast Furnace Feedstocks – Determination of Low-temperature Reduction Disintegration Indices by Static Method - Part 2: Reaction with CO and N₂*, melhora com a participação do *pellet feed* Samarco na mistura de sinterização sem e com pré-aglomeração, muito provavelmente devido ao decréscimo de alumina nas misturas de sinterização. As figuras 6.13 e 6.14 mostram graficamente os efeitos. Uma menor degradação pode proporcionar uma melhor permeabilidade da carga no alto-forno e com isso uma marcha mais estável do equipamento.

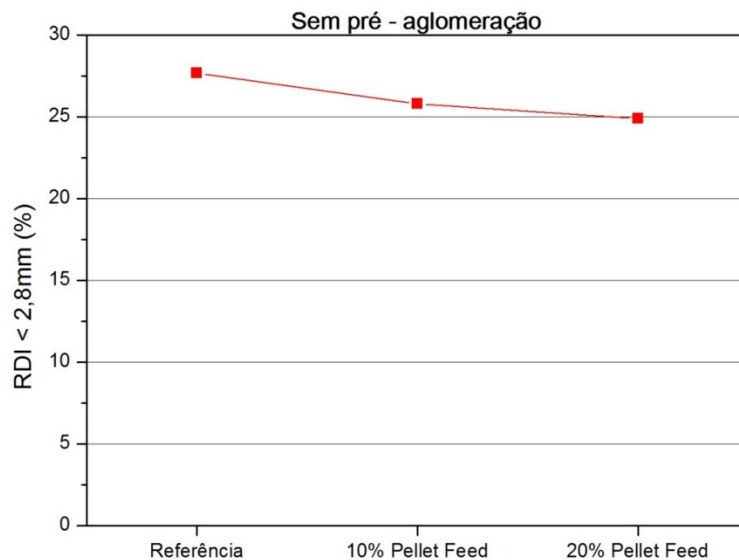


Figura 6.13 – Efeito da adição de *pellet feed* sem pré-aglomeração na mistura de sinterização da Ásia na degradação estática <2,8mm.

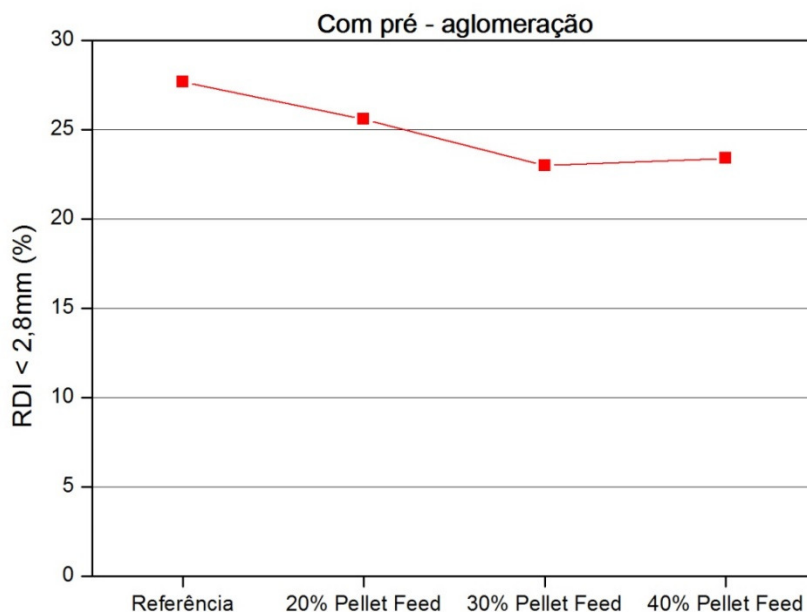


Figura 6.14 – Efeito da adição de *pellet feed* com pré-aglomeração na mistura de sinterização da Ásia na degradação estática <2,8mm.

6.3 Testes de sinterização de *pellet screenings* com as misturas da Europa Ocidental

A produtividade média de sinterização aumentou de 34,5t/m².24h para 37,4, 38,5, 40,4 e 41,1t/m².24h, respectivamente, com 10, 20, 30 e 40% de adição de *pellet screenings* Samarco na mistura de sinterização. O consumo de coque reduziu sensivelmente em comparação com o valor de referência, 65,4kg/t ficando em 63,8, 62,2, 62,2 e 62,3kg/t respectivamente, para 10, 20, 30 e 40% de adição de *pellet screenings* Samarco na mistura de sinterização.

Esses resultados estão representados na figura 6.15 que mostra claramente a vantagem da adição do *pellet screenings* Samarco, tanto na produtividade quanto no consumo de coque.

As composições químicas dos sínteres foram intencionalmente ajustadas para os mesmos níveis de Fe e SiO₂, para manter a mesma qualidade química e com isso não

provocar alterações nos resultados. Como o *pellet screenings* Samarco é mais rico em ferro, foi adicionada sílica na forma de areia na mistura. Portanto, a utilização de *pellet screenings* Samarco na mistura de sinterização permite a utilização de minérios mais pobres em ferro ou proporcionar um aumento do teor de ferro do sinter. Com isso o produtor de sinter pode ter mais flexibilidade para adquirir minérios de ferro para seu consumo.

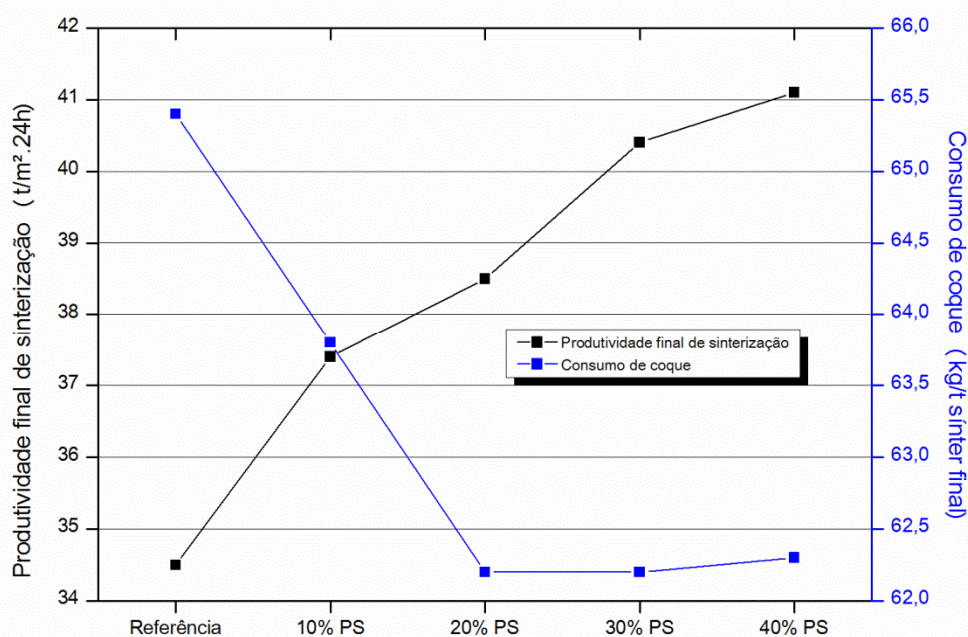


Figura 6.15 – Efeito da adição de *pellet screenings* com na mistura de sinterização da Europa Ocidental na produtividade e consumo de coque.

Para a avaliação da característica física do sinter foi utilizada a norma ISO 3271:2007 *Iron Ores for Blast Furnace and Direct Reduction Feedstocks-Determination of Tumble Strenght and Abrasion Indices*. Para as adições de 10, 20, 30 e 40% de *pellet screenings* Samarco na mistura de sinterização houve uma melhoria de ~1,5 a 2% no índice de tamboramento. Em relação ao índice de abrasão, houve uma ligeira melhora na maioria dos casos. A figura 6.16 mostra esse comportamento.

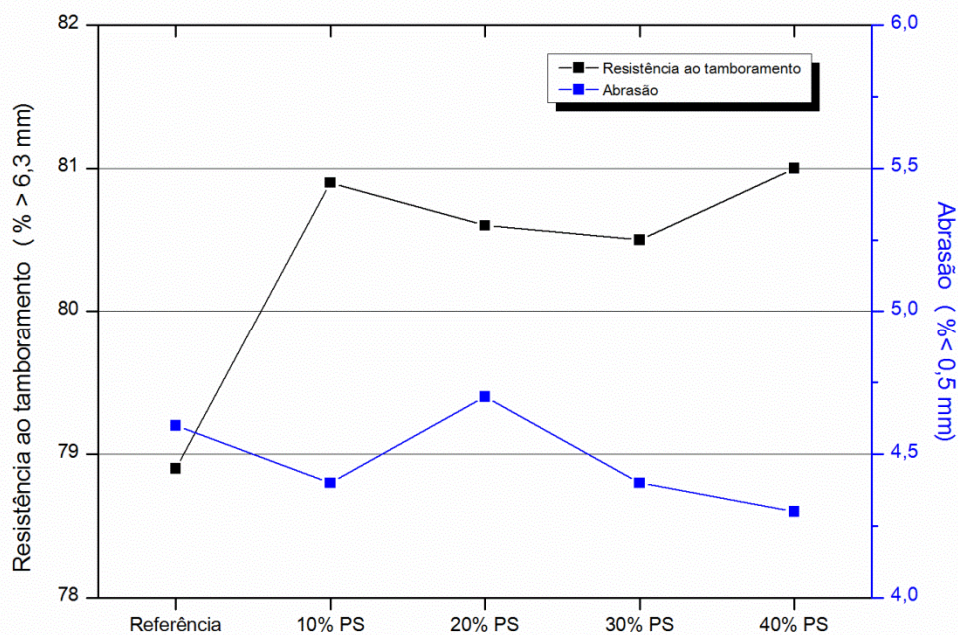


Figura 6.16 – Efeito da adição de *pellet screenings* na mistura de sinterização da Europa Ocidental na resistência ao tamboramento e abrasão.

A adição de *pellet screenings* Samarco ocasionou uma ligeira melhoria na redutibilidade da maioria dos sínteres produzidos de acordo a norma ISO 4695:2007 *Iron Ores for Blast Furnace Feedstocks — Determination of Reducibility by the Rate of Reduction Index*, em relação ao síter de referência.

Todos os sínteres produzidos alcançaram excelentes resultados de RDI de acordo com a norma ISO 4696-1:2007 *Iron Ores for Blast Furnace Feedstocks – Determination of Low-temperature Reduction Disintegration Indices by Static Method - Part 1: Reaction with CO, CO₂, H₂ and N₂*, como mostrado na figura 6.17.

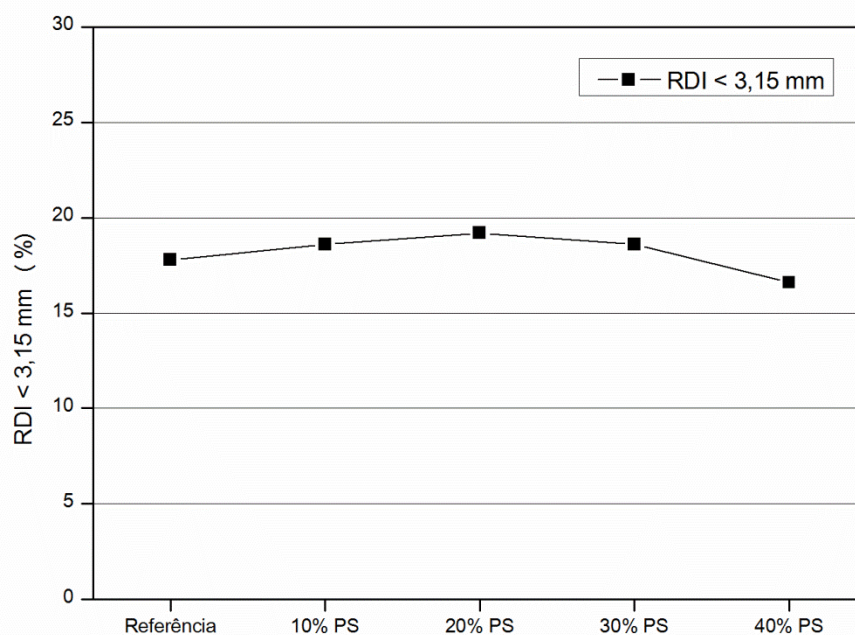


Figura 6.17 – Efeito da adição de *pellet screenings* na mistura de sinterização da Europa Ocidental na degradação estática <3,15mm.

6.4 Testes de sinterização de *pellet screenings* com as misturas da Ásia

A produtividade média de sinterização aumentou de 32,2t/m².24h para 32,2, 33,3, 36,2 e 38,8t/m².24h, respectivamente, com 10, 20, 30 e 40% de adição de *pellet screenings* Samarco na mistura de sinterização. O consumo de coque reduziu sensivelmente do valor de referência, 72,9kg/t, ficando em 69,7, 71,7, 69,8 e 69,3kg/t respectivamente, para 10, 20, 30 e 40% de adição de *pellet screenings* Samarco na mistura de sinterização.

Esses resultados estão representados na figura 6.18 que mostra claramente a vantagem da adição do *pellet screenings* Samarco, tanto na produtividade quanto no consumo de coque.

As composições químicas dos sínteres foram intencionalmente ajustadas para os mesmos níveis de Fe e SiO₂, para manter a mesma qualidade química e com isso não

provocar alterações nos resultados. Como o *pellet screenings* Samarco é mais rico em ferro, foi adicionada sílica na forma de areia na mistura. Portanto, a utilização de *pellet screenings* Samarco na mistura de sinterização permite a utilização de minérios mais pobres em ferro ou proporcionar um aumento do teor de ferro do sinter. Com isso o produtor de sinter pode ter mais flexibilidade para adquirir minérios de ferro para seu consumo.

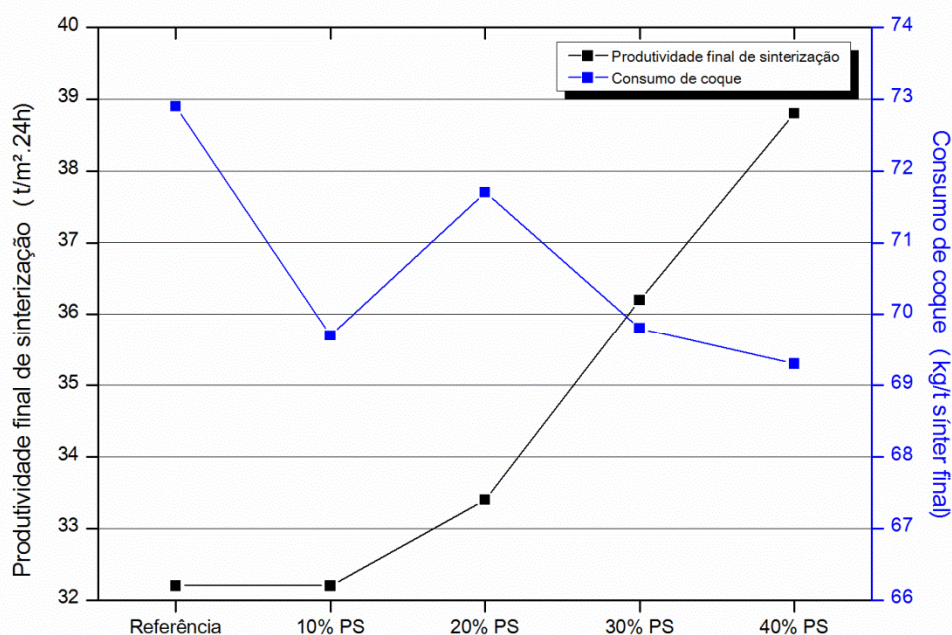


Figura 6.18 – Efeito da adição de *pellet screenings* com na mistura de sinterização da Ásia na produtividade e consumo de coque.

Para a avaliação da característica física do sinter foi utilizada a norma ISO 3271:2007 *Iron Ores for Blast Furnace and Direct Reduction Feedstocks-Determination of Tumble Strenght and Abrasion Indices*. Para as adições de 10, 20, 30 e 40% de *pellet screenings* Samarco na mistura de sinterização houve uma melhoria de ~2,14 a 2,67% na resistência ao tamboramento. Em relação ao índice de abrasão, houve também uma ligeira melhora na maioria dos casos. A figura 6.19 mostra esse comportamento.

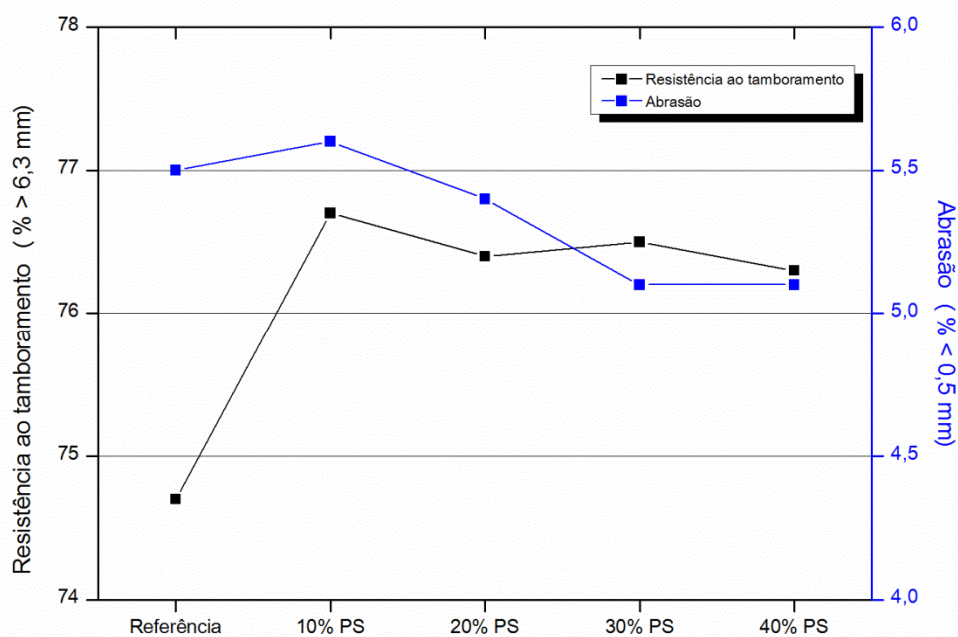


Figura 6.19 – Efeito da adição de *pellet screenings* na mistura de sinterização da Ásia na resistência ao tamboramento e abrasão.

A adição de *pellet screenings* Samarco ocasionou uma queda na redutibilidade da maioria dos sínteres produzidos de acordo a norma ISO 7215:2007 *Iron Ores for Blast Furnace Feedstocks — Determination of the Reducibility by the Final Degree of Reduction Index*, em relação ao síter de referência.

Em relação a desintegração de acordo com a norma ISO 4696-2:2007 *Iron Ores for Blast Furnace Feedstocks – Determination of Low-temperature Reduction Disintegration Indices by Static Method - Part 2: Reaction with CO and N₂*, houve uma melhora em relação ao síter de referência quando foi adicionado *pellet screenings* Samarco na mistura, muito provavelmente devido ao baixo teor de alumina dos sínteres produzidos. Alcançando excelentes resultados de RDI como mostrado na figura 6.20.

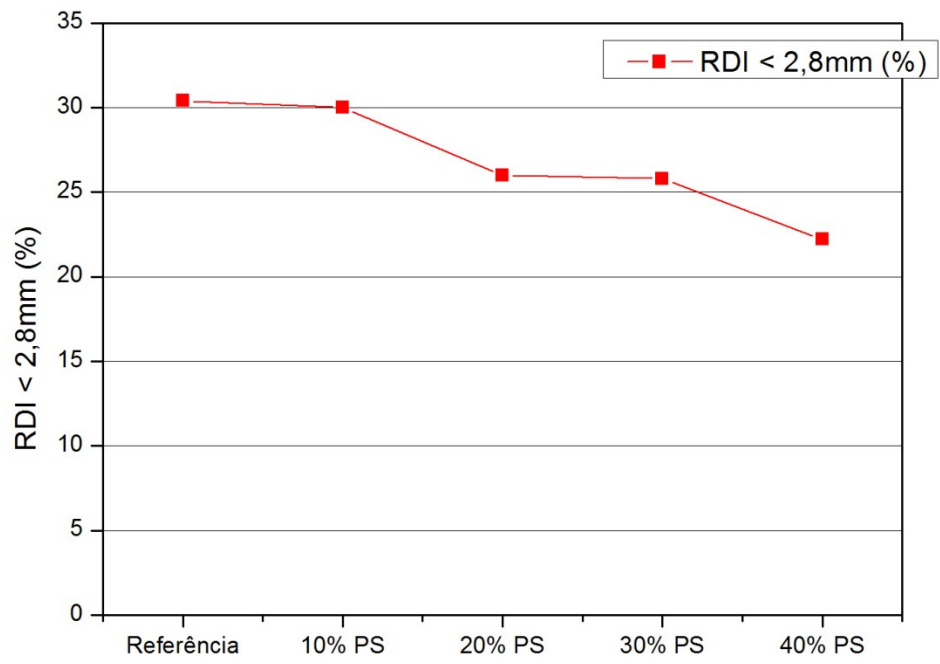


Figura 6.20 – Efeito da adição de *pellet screenings* na mistura de sinterização da Ásia na degradação estática <2,8mm.

7. CONCLUSÕES

7.1 Testes de sinterização de *pellet feed* em misturas da Europa Ocidental

Com base nos resultados, para as adições de 10% e 20% do produto *pellet feed*, sem pré-aglomeração, houve uma queda da produtividade média de sínter de 6,9% quando foram adicionados 20% de *pellet feed*, sem pré-aglomeração. Isso representa uma queda de 2,4t/m².24h. O consumo específico de coque foi praticamente o mesmo. Para os parâmetros de resistência ao tamboramento e índice de abrasão do sínter houve uma ligeira melhora com a adição de 20% de *pellet feed*, sem pré-aglomeração. Na qualidade metalúrgica do sínter houve um leve aumento da redutibilidade e o índice de degradação estática ligeiramente menor, também para a adição de 20% de *pellet feed*, sem pré-aglomeração, isso provavelmente se deve ao fato da maior porosidade do *pellet feed* e de seu menor teor de Al₂O₃.

No entanto, com o tratamento de pré-aglomeração, foi possível atingir uma produtividade máxima de sínter com a adição de 30% de *pellet feed*, pré-aglomerado em substituição aos outros minérios da mistura de referência estudada. Houve um acréscimo de 13,6%, ou seja, um ganho de 4,7t/m².24h. Com a adição de 30% de *pellet feed*, pré-aglomerado foi possível também reduzir o consumo de coque específico em 3% ou 2kg/t de sínter. Na qualidade física do sínter não foi experimentada grandes alterações na resistência ao tamboramento e índice de abrasão. Os parâmetros metalúrgicos do sínter também foram favoráveis, para a adição de 30% de *pellet feed*, pré-aglomerado. O sínter obteve ganhos na redutibilidade e no índice de degradação estática.

Com base nos resultados dos testes, o melhor desempenho do *pellet feed* em uma mistura de referência da Europa Ocidental foi com pré-aglomeração numa dosagem de 30%.

7.2 Testes de sinterização de *pellet feed* com as misturas da Ásia

Com base nos resultados, para as adições de 10% e 20% do produto *pellet feed*, sem pré-aglomeração, houve uma queda da produtividade de sínter. A adição de 20% de *pellet feed* na mistura provocou uma queda de 8,4% ou 2,7t/m².24h. O consumo específico de coque foi praticamente o mesmo. Para os parâmetros de resistência ao tamboramento e índice de abrasão do sínter, houve pouca alteração com a adição de 20% de *pellet feed*, sem pré-aglomeração. Na qualidade metalúrgica do sínter não houve alteração da redutibilidade e o índice de degradação estática foi um pouco menor, também para a adição de 20% de *pellet feed*, sem pré-aglomeração.

Com a adição de *pellet feed* pré-aglomerado em substituição aos outros minérios da mistura de referência estudada, não foi obtido ganho de produtividade para as adições de 30% e 40%, para a adição de 20% a produtividade atingiu praticamente o mesmo valor da mistura de referência. Com o *pellet feed* pré-aglomerado, foi possível reduzir ligeiramente o consumo específico de coque. Não houve mudanças significantes nos resultados de características físicas e metalúrgicas do sínter.

A adição de *pellet feed* na mistura de referência da Ásia necessita ser estudada com maior profundidade para melhor entendimento do fenômeno de interação dos minérios da mistura.

7.3 Testes de sinterização de *pellet screenings* com as misturas da Europa Ocidental

Os testes mostram que é possível atingir uma elevada produtividade de sínter, com o aumento da adição do *pellet screenings* de 10% até 40% em substituição aos outros minérios da mistura estudada. Uma adição de 40% de *pellet screenings* elevou o valor de produtividade do sínter em 6,6t/m².24h ou 19,1% superior ao alcançado com a mistura de referência. Com adição de 40% de *pellet screenings* foi possível reduzir o consumo específico de coque em 3,1kg/t de sínter ou 4,9%. As características físicas e

metalúrgicas do sinter não sofreram grandes alterações com a adição de 40% de *pellet screenings*.

Portanto, para a mistura de referência da Europa Ocidental a participação de 40% de *pellet screenings* é a que apresenta os melhores resultados.

7.4 Testes de sinterização de *pellet screenings* com as misturas da Ásia

Com base nos resultados dos testes, é possível atingir uma elevada produtividade de sinter, com o aumento da adição do *pellet screenings* de 10% até 40% em substituição aos outros minérios da mistura de referência estudada. Uma adição de 40% de *pellet screenings* elevou o valor de produtividade de sinter em 6,6t/m².24h ou 20,5% superior ao alcançado com a mistura de referência. Com adição de 40% de *pellet screenings* foi possível reduzir o consumo específico de coque em 3,6kg/t de sinter ou 5,2%. As características físicas do sinter foram ligeiramente melhores com a adição de 40% de *pellet screenings*. Houve uma pequena queda na redutibilidade do sinter, e por outro lado o índice de degradação estática <2,8mm do sinter reduziu em 7% com a adição de 40% de *pellets screenings* na mistura de referência.

Consequentemente, para a mistura de referência da Ásia a participação de 40% de *pellet screenings* é a que apresenta os melhores resultados.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Realizar estudos de sinterização utilizando aglomerantes orgânicos para pré-aglomerar materiais ultrafinos, como concentrados e *pellet feed*.

Realizar testes de amolecimento e fusão com os sínteres do experimento para comparar suas propriedades a altas temperaturas.

Investigar a razão da menor redutibilidade quando o *pellet screenings* foi adicionado na mistura de referência da Ásia.

Pesquisar a razão da queda na produtividade quando o *pellet feed* foi adicionado na mistura de referência da Ásia.

Cabe aprofundar o estudo com a mistura da Ásia, com o intuito de se desenvolver técnicas para aumentar a produtividade com a adição de *pellet feed* pré-aglomerado, mantendo-se o seu menor consumo energético e características físicas e metalúrgicas do sínter.

8. RELEVÂNCIA

Cada vez mais a siderurgia mundial é desafiada a encontrar soluções inovadoras para fazer frente à rápida degradação das reservas de minério de ferro, notadamente dos *sinter feeds* tradicionais do mercado, que estão a cada dia com seus teores de ferro mais baixos e apresentando uma distribuição granulométrica mais fina. Diante desse cenário, o trabalho avaliou o comportamento dos produtos da Samarco Mineração S/A, *pellet screenings* e *pellet feed* com e sem pré-aglomeração com mistura intensiva no processo de sinterização em escala piloto. Foi avaliado o impacto de certos níveis de substituição desses produtos em misturas padrão de sinterização. Os resultados serão úteis para que a Samarco Mineração S/A possa ofertar esses produtos no mercado como uma alternativa aos produtores de sinter com o objetivo de melhorar suas características. Este estudo também é útil para o meio acadêmico, proporcionado aumento do conhecimento nesta nova tecnologia de produção de sinter.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, D. R. Desenvolvimento de um Modelo Computacional de Otimização e Predição do Valor de Uso de Pelotas de Minério de Ferro na Rota Redução Direta – Aciaria Elétrica. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2007. 204p. (Tese, Doutorado em Ciência dos Materiais e Metalurgia).

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.; MAGALHÃES, J. A. e HONORATO, E.P. 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.

BURCHART-KOROL, D.;KOROL, J. e FRANCIK, P. Application of the New Mixing and Granulation Technology of Raw Materials for Iron Ore Sintering Process. In: Metalurgija, Vol.51, 2012, N°2. p.187-190.

CORES, A.; MUÑIZ, M.; FERREIRA, S.; ROBLA, J.I. e MOCHÓN, J. Relationship Between Sinter Properties and Iron Ore Granulation Index. In: Ironmaking and Steelmaking, Vol. 39 , 2012, N° 2. p. 85 – 94.

CROMPTON, P. e LESOURD, J.-P. Economies of Scale in Global Iron-Making. Resources Policy, Amsterdam, v.33, n.2. p. 74–82, Jun. 2008.

CSE-Centre for Science and Environment, Best Available Techniques for Indian Iron and Steel Sector, New Delhi, 2012. p.22-23.

CRU- Iron Ore Long Term Market Outlook, 2012. p.182-183

CRU- Iron Ore Long Term Market Outlook, 2013. p.193-198

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

DUTTA, D.K.; BORDOLOI, D.; GUPTA, S.; BORTHAKUR, P.C.; SRINI, V. e PATIL, J.B. Investigation on Cold Bonded Pelletization in Iron Ore Fines Using Indian Slag-Cement. In: International Journal of Mineral Processing, 34, 1992. p. 149-159.

ELLIS, B. G.; LOO, C. E. e WITCHARD, D. Effect of Ore Properties on Sinter Bed Permeability and Strength. In: Ironmaking and Steelmaking, Vol. 34 , 2007, N° 2. p. 99 – 108.

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.

FERREIRA, V.M. Avaliação da Produção de um Super-Concentrado de Minério de Ferro. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2002. 196p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Mineral).

FONSECA, M. C. Influência da Distribuição Granulométrica do *Pellet Feed* no Processo de Aglomeração e na Qualidade da Pelota de Minério de Ferro para Redução Direta. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2004. 126p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia de Materiais).

FORMOSO, A.; MORO, A.; PELLO, G. F.; MENENDEZ, J. L.; MINIZ, M. e CORES, A. 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.; IYAMA, S.; TAMURA, S.; KONISHI, Y.; NITTA, S. e ISHIKAWA, H. Construction and Operation of Vibration Granulation Equipament. In: Ironmaking Conference Proceedings, 1990. p. 615-621.

GAGGIATO, V. C. A Competitividade no Mercado Transoceânico de Pelotas de Minério de Ferro, seus Delineadores e o Posicionamento dos Integrantes deste Mercado. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2010. 154p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

GAN, M.; FAN, X. H.; JI, Z. Y.; CHEN, X. L.; YIN, L.; JIANG, T.; YU, Z. Y. e HUANG, Y. S. Optimising Method for Improving Granulation Effectiveness of Iron Ore Sintering Mixture. In: Ironmaking and Steelmaking, 2015, Vol.42, Nº5. p. 351-357.

HAGA, T.; OSHIO, A.; SHIBATA, D.; KASAMA, S.; KOSONO, T. e HIDA, Y. 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.

HARA, M., KAWAGUSHI, T., MATSUMURA, M. e KAMIJO, C. Analysis of Raw Material Flow in Large-scale Simulator of Continuous Drum Mixer for Sintering Process. In: METEC InSteelCon 2011, Sintering : Session 12, Düsseldorf, 27 June-1July 2011.

HSIEH, L. Effect of Using a High Speed Agitating Mixer on Sintering Properties. In: METEC InSteelCon 2011. Sintering: Session 12, Düsseldorf, 27 June-1July 2011.

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

ISO 3271:2007 Iron Ores for Blast Furnace and Direct Reduction Feedstocks — Determination of Tumble Strength and Abrasion Indices.

ISO 3082:2009 Iron ores – Sampling and Sample Preparation Procedures.

ISO 3087:2011 Iron ores – Determination of the Moisture.

ISO 4695:2007 Iron Ores for Blast Furnace Feedstocks — Determination of Reducibility by the Rate of Reduction Index.

ISO 4696-1:2007 Iron Ores for Blast Furnace Feedstocks – Determination of Low-temperature Reduction Disintegration Indices by Static Method - Part 1: Reaction with CO, CO₂, H₂ and N₂.

ISO 4696-2:2007 Iron Ores for Blast Furnace Feedstocks – Determination of Low-Temperature Reduction Disintegration Indices by Static Method - Part 2: Reaction with CO and N₂.

ISO 4701:2008 Iron Ores and Direct Reduced Iron – Determination of Size Distribution by Sieving.

ISO 7215:2007 Iron Ores for Blast Furnace Feedstocks — Determination of the Reducibility by the Final Degree of Reduction Index.

JINGMING, 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.

KAMIJO, C.; HARA, M.; YAMAGUCHI, Y.; YOSHIKAWA, M.; KANO, J.; MATSUMURA, M.; e KAWAGUCHI, T. Technology for Productivity Improvement of Sintering Based on Designing of Composite Granulation and Bed Structure of Sinter Mixture. In: ISIJ International, Vol. 53, 2013, N°9. p.1497-1502.

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

KHOSA, J. e MANUEL, J. Predicting Granulation Behaviour of Iron Ores Based on Size Distribution and Composition. In: ISIJ International, Vol. 4, 2007, N°7. p. 965-972.

KIN, J. e PARK, T. Tecnology for Using Fine Materials in the Sinter Process. In: METEC InSteelCon 2011. Sintering: Sinter plant operation and automation, Session 2, Düsseldorf, 27 June-1July 2011.

KONG, L.; LIANG, D. e XU, J. An Industrial Practice of Sinter Produced from Magnetite Concentrate. In: 61st Ironmaking Conference Proceedings, 2002, Nashville, Tennessee: ISS. p. 715 – 720.

KUROSAWA, S.; MURAI, R.; SATO, M.; ARIYAMA, T. e MORI, K. Recent Advanced in Sintering Technologies by NKK. In: Ironmaking Conference Proceedings, 1989. p. 451-457.

LIMA, F.F.A.M.; TERES, J.P.; DOUCE, J.F.; LUMEN, W.; VAN DE VELDE, F.; VAN LOO, F.; PIERRET, J.C. e PIEZANOWSKI, L. Improvement of Sinter Raw Materials Preparation by Intensive Mixer to Cope with High Level of Fine Iron Ores. In: 1st Estad & 31st JSI, 7-8 April 2014, Paris.

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 e 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.; 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.

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

LUDIVINE, P.; GILLES, N.D.; SVEN, H.; WOUTER, L.; FREDERICK, V.V.; JEAN-FRANÇOIS, D. e FRÉDÉRIQUE, V.L. Vertical Intensive Mixing for Processing Finer Iron Ore in Sinter Plant In: 44th Ironmaking and Raw Materials Seminar, 15th Brazilian Symposium on Iron Ore, 2nd Brazilian Symposium on Agglomeration of Iron Ore. Agglomeration Session 05, September 15th to 18th, 2014, Belo Horizonte: ABM.

LÜNGEN, H.B.; PETERS, M. e SCHMÖELE, P. Iron Making in Western Europe. In: METEC InSteelCon 2011, Plenary Session 6th ECIC : Session 1, 27 June-1July 2011, Düsseldorf.

LÜNGEN, H.B.; PETERS, M. e SCHMÖELE, P. Iron Making in Western Europe-Status Quo and Future Trends. In: METEC & 2nd ESTAD 2015, Track B, Session 2, Blast Furnance Ironmaking Overview, June 16, 14:30h, Düsseldorf.

MAEDA, T.; FUKUMOTO, C.; MATSUMURA, T.; NISHIOKA, K. e SHIMIZU ,M. Effect of Adding Moisture and Wettability on Granulation of Iron Ore. In: ISIJ International, Vol. 45, 2005, N°4. p.477-484.

MAO, H.; ZHANG, R.; LV, X.; BAI, C. e HUANG, X. Effect of Surface Properties of Iron Ores on their Granulation Behavior. In: ISIJ International, Vol. 53, 2013, N°9. p.1491-1496.

MATSUMOTO, K.; MATSUDA, K.; NAKAJIMA, Y. e AKIZUKI, H. High Bed Operation at Mizushima N°4 Sinter Plant. In: Ironmaking Conference Proceedings, 1988. p.613 – 616.

MATSUMURA, T.; MAKI, T.; AMANO, S.; SAKAMOTO, M. e IWASAKI, N. Effect of Moisture Absorption Behavior on Optimal Granulation Moisture Value of Sinter Raw Material. In: ISIJ International, Vol. 49, 2009, N°5. p.618-624.

MIWA, T. e KURIHARA, K. Iron-making Technology Progress in Japan. In: METEC InSteelCon 2011. Plenary Session 6th ECIC, Düsseldorf, 27 June-1July 2011.

MONTES CANO, J. A. e MILANEZ, J. J. Evolução da Produção e da Qualidade das Pelotas de Redução Direta na Samarco Mineração. In: II Encontro do Hemisfério Sul sobre Tecnologia Mineral e XII Encontro Nacional de Minérios e Hidrometalurgia, 1987, Rio de Janeiro. p. 684 – 702.

NAITO, M. ; TAKEDA, K.; e MATSUI, Y. Ironmaking Technology for the Last 100 Years: Deployment to Advanced Technologies from Introduction of Technological Know-kow, and Evolution to Next-generation Process . In: ISIJ International, Vol. 55, 2015, N°1. p.7-35.

NANDY, B. e 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.

NEPPER,J.; SNEYD, S.; STEFAN, T. e Weckes, J. Outotec's Innovative Technologies for Sustainable Iron and Steelmaking. In: METEC InSteelCon 2011. Plenary Session 6th ECIC : Session 1, Düsseldorf, 27 June-1July 2011.

NIWA, Y.; KOMATSU, O.; NODA, H.; SAKAMOTO, N. e OGAWA, S. 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. e SAKAMOTO, N. Commercial 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.

NOLDIN JR, J.H.; LÜNGEN, H.B. e SCHMÖELE, P. Trends in Iron-Making Given the New Reality of Iron Ore and Coal Resources. In: METEC & 2nd ESTAD 2015, Track B, Session 2, Blast Furnance Ironmaking Overview June 16, 14:50h, Düsseldorf.

OBOSONO, A.; SHOUHO, T.; TAJIRI, K.; ONE, K. e MATSUMURA, M. Operation Results of Separated Granulation Equipament at Wakayama N°4 Sintering Plant. In: ICSTI/Ironmaking Conference Proceedings, 1998, Toronto: ISS. p. 1327-1336.

OKAZAKI, J.; NAKANO, M. e HIGUCHI, K. Marra Mamba Ore, Its Mineralogical Properties and Evaluation for Utilization. In: Nippon Steel Technical Report, N°94, July 2006. p.29.

OKOCHI, I.; MAKI, A.; SAKAI, A.; SHIMOMURA, A.; SATO, M. e MURAI, R. 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.

OLIVEIRA, J. L. R.; DORNELAS, F. C.; FARIA, J. A. e BISPO, E. T. Developments in Ironmaking in South America. In: AISTech 2015 Proceedings, Cleveland, OH, 4-7 May 2015. p.1452-1462.

OYAMA, N.; SATO, H.; TAKEDA, K.; ARIYAMA, T.; MATSUMOTO, S.; JINNO, T. e FUJII, N. Development of Coating Granulation Process at Commercial Sintering Plant for Improving Productivity and Reducibility. In: ISIJ International, Vol. 45, 2005, N°6. p. 817-826.

OYAMA, N.; HIGUCHI, T.; MACHIDA, S.; SATO, H.; e TAKEDA, K. Effect of High-phosphorus Iron Ore Distribution in Quasi-particle on Melt Fluidity and Sinter

Bed Permeability during Sintering. In: ISIJ International, Vol. 49, 2009, N°5. p. 650-658.

PAMMER, O; PILLMAIR, G.; STIASNY, H.; WURM, J. e GOULD, L. Perfect Sinter - The Dream of the Blast Furnace Operator. In: 2002 AISE Annual Convention and Steel Expo. p. 1 – 9.

PEREIRA, H. C. 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. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2004. 131p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

PIMENTA, H.P.; PACHECO, T. A. e CARDOSO, M. B. Caracterização Tecnológica de Minérios de Ferro para Sinterização. In: II Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro, 1999, Ouro Preto: ABM. p. 1-21.

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.

REIDETSCHLAEGGER, J.; HOETZINGER S. e FULGENCIO, A. Course: Intensive Mixing and Granulation System: Solutions for Ultra-Fines in Sintering. In: 43rd Ironmaking and Raw Materials Seminar, 12th Brazilian Symposium on Iron Ore and 1st Brazilian Symposium on Agglomeration of Iron Ore, 2013, Belo Horizonte: ABM.

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.; SAITO, H.; SHIBOBARA, M.; HASHIMOTO, K. e YAMASHITA, K. 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.; NODA, H; ICHKAWA, K.; SATO, H e KAWATA, H. 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.

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.

SCHWALM, T. e GERLACH, W. New Developments in Agglomeration Technologies. In: Asia Steel International Conference, 2003, Jamshedpur.

SILVA, T. P. e HONORATO, E. P. Avaliação do Efeito da Adição de *Pellet Feed* Usando Misturamento Intensivo em Sinterização Piloto. In: 43° Seminário de redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas, 14° Seminário Brasileiro de Minério de Ferro e 1° Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 2013, Belo Horizonte: ABM. p. 89-99.

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. e 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.

TAKAMATSU, N.; HATANAKA, A.; KAKU, H.; KURIHARA, K. e SAITOH, G. Development of Iron-making Tecnology. In: Nippon Steel Technical Report, N°101, November 2012.p 84-85.

UMADEVI, T; BRAHMACHARYULU, A.; ROY,A.K.; MAHAPATRA, P.C.; PRABHU, M. e RANJAN, M. Influence of Iron Ore Fines Feed Size on Microstructure, Productivity and Quality of Iron Ore Sinter. In: ISIJ International, Vol. 51, 2011, N°6. p.922-929.

UNCTAD - UNITED NATIONS CONFERENCE ON TRADE AND DEVELOPMENT. The Iron Ore Market: 2012-2014. Genebra: United Nations Publication, 2014. 141p.

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

YONGZHI, S. e JUN, C. Technological Improvements of Ironmaking in China. In: METEC InSteelCon 2011. Plenary Session 6th ECIC: Session 1, Düsseldorf, 27 June-1July 2011.

YONGZHI, S. Perspective and Challenges of Ironmaking in China. In: AISTech 2015 Proceedings, Cleveland, OH, 4-7 May 2015. P. 1207-1217.

WOOD MAKENZIE. Iron Ore Market Service 2014. London. p. 123-124.

ZANDI, M.; MARTINEZ-PACHECO, M. e FRAY, T. A. T. Biomass for iron ore sintering. *Minerals Engineering*, Amsterdam, v.23, n.14, p. 1139-1145, Nov. 2010.

ZHANG, C.; SHAN, J.; WANG, Z. e MA, Y. Small Pellet Sintering Process of Fine Concentrate. In: *ICSTI/Ironmaking Conference Proceedings*, 1998, Toronto: ISS. p. 1317-1323.