

SANDRA LÚCIA DE MORAES

**COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DE AGLOMERANTE ORGÂNICO EM
RELAÇÃO À BENTONITA NA OPERAÇÃO DE PELOTIZAÇÃO DE
CONCENTRADOS DE MINÉRIO DE FERRO BRASILEIROS DE
DIVERSAS PROCEDÊNCIAS**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
Título de Mestre em Engenharia.

São Paulo

2004

SANDRA LÚCIA DE MORAES

**COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DE AGLOMERANTE ORGÂNICO EM
RELAÇÃO À BENTONITA NA OPERAÇÃO DE PELOTIZAÇÃO DE
CONCENTRADOS DE MINÉRIO DE FERRO BRASILEIROS DE
DIVERSAS PROCEDÊNCIAS**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
Título de Mestre em Engenharia.

Área de concentração:

Engenharia Mineral

Orientador:

Prof. Livre-Docente
José Renato Baptista de Lima

São Paulo

2004

Moraes, Sandra Lúcia de

Comparação do desempenho de aglomerante orgânico em relação à bentonita na operação de pelotização de concentrados de minério de ferro brasileiros de diversas procedências / Sandra Lúcia de Moraes. -- São Paulo, 2004.

80 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo.

**1. Minerais metálicos ferrosos (Brasil) 2. Concentração de minerais
3. Processos químicos I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo II.t.**

Aos meus queridos pais José, *in*
memorian, e Ruth.

AGRADECIMENTOS

Expresso meus mais sinceros agradecimentos a todos que contribuíram na elaboração deste trabalho, com especial destaque àquelas pessoas e entidades que mais diretamente comigo colaboraram:

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT, pela liberação das horas de trabalho.

Aos amigos do Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais, aos estagiários de engenharia de minas Gabor de Oliveira Cezaretti e Jairo Viotto Belli, ao técnico Rafael de Almeida Melchior e, em especial, à Dra. Monica Speck Cassola, pelo constante incentivo, carinho e amizade.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP pelo apoio financeiro, para realização das análises e aquisição de equipamentos.

A Companhia Vale do Rio Doce – CVRD, na pessoa do Eng. João Júlio Ruschid Tolentino pela disponibilização das amostras e constantes esclarecimentos de dúvidas e orientação na condução dos trabalhos.

A Samarco Mineração Ltda, nas pessoas dos engenheiros Vinícius Fonseca, Maurício Cota Fonseca e ao técnico Philippe Ferreira, que sempre tão prontamente atenderam a todas as solicitações.

Ao Laboratório de Tecnologia das Partículas do IPT, que através do Eng. Silas Derenzo, possibilitou a realização da análise granulométrica por espalhamento de laser.

A Dra. Maria Cristina Martinez Bonesio pelas revisões na forma de apresentação da lista de referências.

Ao estimado amigo e Prof. Arthur Pinto Chaves pelo incentivo e carinho, numa fase especialmente difícil de minha vida.

Ao Prof. José Renato Baptista de Lima pelo incentivo e dedicação na orientação deste trabalho.

RESUMO

Este estudo visou comparar o desempenho dos diferentes aglomerantes, quais sejam, bentonita e *Peridur*, aglomerante orgânico de uso comercial, na estrutura das pelotas confeccionadas com concentrado de minério de ferro. Com este objetivo foram estudadas três diferentes amostras de concentrados de minério de ferro de diferentes procedências de minas brasileiras. Foram ensaiadas pelotas produzidas em disco de pelotização de laboratório através da rotina de ensaios que incluíram: compressão simples das pelotas úmidas e secas e tratadas termicamente à temperatura de 1350°C, quedas repetidas das pelotas úmidas e ensaios de choque térmico. Os resultados obtidos permitiram concluir que a adição dos aditivos (calcário e carvão) melhora as propriedades físicas de resistência das pelotas e que para cada tipo de concentrado existe um aglomerante que apresenta melhor resultado.

ABSTRACT

This study aimed to compare the performance of two different binders, bentonite and Peridur, this an organic binder of commercial use, in the iron ore pellet structure. With this goal were studied three distinct samples of iron ore concentrate, from different Brazilian mines. Pellets made in a laboratory pelletizing disc were tested, the tests routine included simple compression of green, dried pellets and in 1350°C thermally treated pellets, wet-knock test, and shock temperature. From the obtained results it is possible to conclude that the application of additives (limestone and coal) enhance the resistance properties of the pellets and for each iron ore concentrate there is a binder that presents a better result.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	iv
LISTA DE FIGURAS.....	v
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	vi
LISTA DE SÍMBOLOS.....	vii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVO.....	3
3. JUSTIFICATIVA DO TEMA.....	4
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
4.1 Importância econômica do ferro no Brasil.....	5
4.2 Pelotização.....	8
4.2.1 Histórico da pelotização.....	8
4.2.2 Processo de pelotização.....	10
4.2.3 Tratamento térmico das pelotas (“queima”).....	15
4.2.4 Propriedades mecânicas das pelotas.....	16
4.2.5 Aglomerantes.....	18
4.2.5.1 Bentonita.....	20
4.2.5.2 Aglomerantes orgânicos.....	24
4.3 Caracterização de concentrados de minérios e aglomerados.....	27
4.4 Processos de obtenção de ferro metálico.....	31
5. MATERIAIS E MÉTODOS.....	42
5.1 Amostras de concentrado de minério, aditivos e aglomerantes.....	42
5.2 Homogeneização e redução de massa das amostras.....	43
5.3 Ensaios de caracterização das amostras de concentrado de minério de ferro.....	43
5.3.1 Análise granulométrica.....	43
5.3.2 Determinação da umidade, densidade real e análise química.....	44
5.3.3 Análise mineralógica.....	44
5.4 Ensaios de pelotização.....	44
5.4.1 Ensaios de caracterização das pelotas conforme procedimento adotado pela CVRD.....	47
5.4.2 Tratamento térmico das pelotas (“Queima”).....	49

6. RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	51
6.1 Ensaios de caracterização dos concentrados de minério de ferro.....	51
6.2 Ensaios de pelotização.....	54
6.2.1 Concentrado da Samarco.....	56
6.2.2 Concentrado SPL-1.....	61
6.2.3 Concentrado RM-15.....	65
6.2.4 Comparação entre os concentrados.....	67
7. CONCLUSÕES.....	74
LISTA DE REFERÊNCIAS.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Reserva e produção mundial de minério de ferro (2002).....	6
Tabela 2 – Composição química típica de bentonita.....	21
Tabela 3 – Principais características dos tipos básicos de minério de ferro.....	27
Tabela 4 – Principais morfologias dos minérios que alimentam a pelotização na Companhia Vale do Rio Doce – CVRD.....	29
Tabela 5 – Algumas especificações técnicas de pelotas comercializadas pela Samarco Mineração.....	41
Tabela 6 – Valores de umidade e demais informações dos aditivos e da bentonita.....	43
Tabela 7 – Dosagem dos aditivos e dos aglomerantes.....	46
Tabela 8 – Condições dos ensaios de tratamento térmico.....	49
Tabela 9 – Resultados de análise química, umidade e densidade real.....	52
Tabela 10 – Resultado da análise mineralógica por difração de raios-X.....	54
Tabela 11 – Resultados e condições experimentais dos ensaios de pelotização.....	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Reservas nacionais de minério de ferro por estado (%).....	5
Figura 2 – Diagrama esquemático de um disco pelletizador de laboratório (BALL <i>et al.</i> , 1973).....	12
Figura 3 – Influência das forças capilares nos mecanismos de ligação (MENDONÇA <i>et al.</i> , 1985).....	13
Figura 4 – Influência da água na formação de pelotas “cruas” (MENDONÇA <i>et al.</i> , 1985).....	13
Figura 5 – Fotomicrografias de grânulos de vidro misturados com bentonita antes (5a) e após (5b) a passagem pela prensa de rolos (KAWATRA <i>et al.</i> , 2001).....	23
Figura 6 – Minério não hidratado com grão médio (6a) e minério hidratado com grão pequeno (6b) (CARNEIRO <i>et al.</i> , (2003).....	30
Figura 7 – Fluxo de minério de ferro na siderurgia (SOUZA NETO <i>et al.</i> , 2001)...	31
Figura 8 – Corte esquemático de um alto-forno e zonas internas – adaptada de ARAÚJO (1967) e QUITES (2001).....	33
Figura 9 – Disco de pelletização utilizado nos ensaios.....	45
Figura 10 – Misturador de laboratório tipo <i>Sympson Mix Muller</i>	46
Figura 11 – Desagregação do material homogeneizado a pelletizar.....	47
Figura 12 - Plataforma de aço usada para determinação do número de quedas.....	47
Figura 13 – Forno tipo mufla utilizado nos ensaios de choque térmico.....	48
Figura 14 – Máquina Universal de Ensaios para ensaios de resistência à compressão.....	50
Figura 15 – Resultado da análise granulométrica por peneiramento a úmido.....	51
Figura 16 – Resultado da análise granulométrica por espalhamento de laser.....	52
Figura 17 – Resultados obtidos com as pelotas “verde” e seca – Concentrado Samarco.....	56
Figura 18 – Resultados de resistência a quedas – Concentrado Samarco.....	57
Figura 19 – Resultados de resistência à compressão sem adição de aditivos – Concentrado Samarco.....	57
Figura 20 – Resultados de resistência à compressão com adição de aditivos – Concentrado Samarco.....	58
Figura 21 – Resultados de choque térmico – Concentrado Samarco.....	59

Figura 22 – Resultados dos ensaios de tratamento térmico – concentrado Samarco.....	60
Figura 23 – Resultados obtidos com as pelotas “verde” e seca – Concentrado SPL-1.....	61
Figura 24 – Resultado da determinação do número de quedas repetidas – Concentrado SPL-1.....	62
Figura 25 – Resultados do ensaio de choque térmico – Concentrado SPL-1.....	63
Figura 26 – Resultados dos ensaios de tratamento térmico – concentrado SPL-1....	64
Figura 27 – Resultados obtidos com as pelotas “verde” e seca – Concentrado RM-15.....	65
Figura 28 – Resultados de choque térmico – Concentrado RM-15.....	66
Figura 29 – Resultados dos ensaios de tratamento térmico – Concentrado RM-15.....	66
Figura 30 – Resultado da determinação do número de quedas repetidas.....	67
Figura 31 – Resultados de resistência à compressão e de choque térmico com concentrados puros.....	68
Figura 32 – Resultados de resistência à compressão e de choque térmico com concentrados e bentonita.....	69
Figura 33 – Resultados de resistência à compressão e de choque térmico com concentrados e <i>Peridur</i>	70
Figura 34 – Resultados de resistência à compressão e de choque térmico com concentrados, bentonita e aditivos.....	70
Figura 35 – Resultados de resistência à compressão e de choque térmico com concentrados, <i>Peridur</i> e aditivos.....	71
Figura 36 – Resultados dos ensaios de tratamento térmico realizados na Série 1.....	72
Figura 37 – Resultados dos ensaios de tratamento térmico realizados na Série 2.....	72
Figura 38 – Resultados dos ensaios de tratamento térmico realizados na Série 3.....	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

cm:	Centímetro
mm:	Milímetro
t:	Tonelada
kgf	Quilograma força
m:	Metro
m ² /g:	Metro quadrado por grama
mm/min:	Milímetro por minuto
µm:	Micrômetro
g/cm ³ :	Gramas por centímetro cúbico
min:	Minuto
rpm:	Revolução por minuto
quedas/pel:	Número de queda por pelota
kgf/pel:	Quilograma força por pelota
meq/100g:	Miliequivalente por 100 gramas
n.d.:	Não determinado
PF:	Perda ao fogo
PPC:	Perda por calcinação
JIS:	Japanese International Standard
ISO:	Internacional Organization Standard
CTC:	Capacidade de troca iônica
TPP:	Tripolifosfato de sódio
CMC:	Carboximetilcelulose
AF:	Alto forno
RD:	Redução direta
RDI:	Reduction Desintegration Index
LTD:	Low Temperature Desintegration
ZRT:	Zona de reserva térmica
FOB:	Free on Board
US\$:	Dólar Americano
Fe _t :	Ferro total

LISTA DE SÍMBOLOS

%:	Porcentagem
°C:	Graus Celsius
°:	Graus
σ :	Desvio-padrão
Å:	Ångström (unidade de comprimento de onda)

1. INTRODUÇÃO

A produção de aço em fornos de redução é técnica conhecida há séculos, porém o uso de frações finas sempre foi problemático. Assim, diversos processos de aglomeração dos finos são usados com sucesso.

Os processos de aglomeração de finos de minério de ferro nasceram na Europa, porém a primeira aplicação industrial foi nos Estados Unidos. No Brasil, a tecnologia chegou quase que na década de 70, com o início e consolidação das atividades com minérios de ferro da Companhia Vale do Rio Doce - CVRD.

A aglomeração por pelletização é o método padrão aplicado para transformar frações finas de minério de ferro (menores que 0,1 mm) em um produto adequado para a alimentação dos fornos de redução, onde será transformado em gusa ou ferro esponja.

O Brasil é o segundo maior produtor de minério de ferro e de pelotas do mundo; sua produção total em 2002 foi de cerca de 212 milhões de toneladas.

O minério de ferro brasileiro apresenta naturalmente alto teor de ferro contido, podendo ultrapassar os 60%, e quantidade relativamente pequena de impurezas no material constituinte da camada superficial, logo abaixo da camada de cobertura formada por limonitas, argilominerais, dentre outros. Este minério é normalmente formado por hematitas. O proto-minério, formado por itabiritos, embora apresente teores de Fe menores, vem sendo concentrado desde a década de 70. Os minérios brasileiros superficiais são predominantemente de textura fina e friável, ou seja, geram elevadas quantidades frações finas durante a lavra e transporte. Exigem, por isto, beneficiamento e concentração, operações cuja amplitude e complexidade variam de acordo com as características inerentes aos minérios de cada jazida.

O minério pulverulento beneficiado e os concentrados, denominados *pellet feed*, têm de passar por processo de aglomeração por pelletização para o seu aproveitamento. Essa tendência resultou, principalmente, do fato de os grandes produtores de minério de ferro, com o esgotamento progressivo dos minérios mais ricos, terem de tratar minérios mais pobres, removendo a sílica por flotação ou por outros processos, produzindo concentrados finos em pó; como nesta forma não

podem ser utilizados nos altos-fornos e nos fornos dos processos de redução direta, sua aplicação em siderurgia passou a depender de operações de aglomeração, efetuadas, principalmente, pelo processo de pelotização.

A crescente sofisticação das indústrias siderúrgicas está fazendo com que este processo, antes considerado relativamente simples, ganhe cada vez mais importância na cadeia produtiva (CHEREM, 2003).

Obter pelotas mais adequadas à produção de cada tipo de aço se tornou tão importante que as mineradoras começaram a se preocupar, não apenas com a qualidade e a quantidade de minério de ferro fornecido, como também com a diversidade de tipos de pelotas oferecidas. A busca pelo melhor rendimento possível é feita tanto para as pelotas destinadas ao processo de redução direta, como para as que alimentam o processo de redução nos altos-fornos.

Dois elementos desempenham papéis importantes neste contexto, os quais fornecem diferencial competitivo às empresas: a origem do minério de ferro e os aditivos utilizados quando da etapa de aglomeração, em especial os aglomerantes.

É imprescindível o completo entendimento dos fenômenos associados à mineralogia do minério de ferro e suas alterações durante o processo de tratamento térmico, bem como a sua interação com os aditivos, tendo como foco o seu desempenho técnico e econômico. A microestrutura das pelotas varia de acordo com o aglomerante utilizado, sendo, portanto, fundamental a caracterização detalhada do minério, dos aglomerantes e da pelota para determinação do desempenho. Assim, pode-se considerá-la como um sistema composto de concentrado de minério de ferro, materiais aditivos, aglomerante e água, além do processo de produção ou geração da pelota.

2. OBJETIVO

O objetivo geral deste trabalho é comparar o desempenho das pelotas obtidas quando confeccionadas com minérios de ferro de diferentes minas brasileiras usando como aglomerantes a bentonita e o aglomerante orgânico comercial *Peridur*.

Para isto serão comparados os desempenhos do aglomerante orgânico com relação ao reagente inorgânico clássico (bentonita) na qualidade das pelotas “verdes”, secas a 105°C, quando submetidas ao ensaio de choque térmico e após tratamento térmico à temperatura de 1350°C, bem como avaliar a capacidade de manuseio das mesmas através da determinação da resistência da pelota “verde” a quedas sucessivas de uma altura de 45 cm.

3. JUSTIFICATIVA DO TEMA

A indústria siderúrgica tem evoluído muito nos últimos tempos, aumentando a produtividade dos altos-fornos, diminuindo o consumo de coque e de energia, os teores de impurezas nocivas, as poeiras que afetam o meio ambiente e melhorando as condições de higiene e de segurança do trabalho.

Para atingir estes objetivos os consumidores exigem, entre outros requisitos, teores cada vez menores de sílica e alumina nas pelotas de minério de ferro, o que leva os produtores a esforços enormes no sentido de obter concentrados de minério de ferro tipo *pellet feed* cada vez mais puros. Entretanto, a adição da bentonita como aglomerante na operação de pelotização, torna a incorporar nas pelotas estes contaminantes indesejados.

Além disto, o interesse em utilizar aglomerantes orgânicos tem por motivação principal a utilização de quantidades muito menores destes, da ordem de 0,05% em peso e a não geração de resíduos poluentes, pois estes aglomerantes deverão se volatilizar nas altas temperaturas a que as pelotas são submetidas na operação denominada industrialmente de “queima”, gerando basicamente CO₂ e água.

O estudo comparativo das pelotas confeccionadas com o aglomerante orgânico e com a bentonita se justifica, uma vez que cada tipo de minério possui comportamento diferenciado no processo de pelotização, seja quanto à umidade, seja quanto à resistência mecânica, mesmo em se tratando da bentonita, aglomerante padrão para todas as usinas de pelotização de concentrados de minério de ferro. No caso dos aglomerantes orgânicos, estas diferenças se acentuam.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Importância econômica do ferro no Brasil

A indústria da mineração do ferro tem grande importância econômica na economia mineral brasileira.

Embora abundante no mundo, as jazidas de minério de ferro de boa qualidade concentram-se em poucos países. Das ocorrências totais, apenas sete países detêm cerca de 80%. As reservas mundiais de minério de ferro (medidas+indicadas), segundo dados do Mineral Commodity Summaries (2004), são da ordem de 330 bilhões de toneladas.

No Brasil, as reservas chegam a 19,1 bilhões de toneladas (5,8%), situando o país em sexto lugar em relação às reservas mundiais. Porém, em termos de ferro contido, assume lugar de destaque, devido ao alto teor encontrado nos minérios do tipo hematita (60 a 67% de ferro), predominante nos minérios ricos do Pará, e itabirito (50 a 60% de ferro) predominante em Minas Gerais, devido ao esgotamento das camadas superficiais mais ricas. As reservas provadas de minério de ferro no Brasil estão distribuídas geograficamente na proporção apresentada na figura 1, segundo dados do Balanço Mineral Brasileiro (2001).

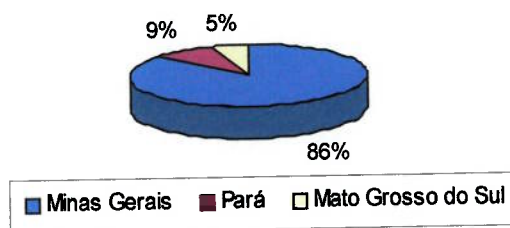


Figura 1 – Reservas nacionais de minério de ferro por estado (%)

O estado de Minas Gerais é o que detém a maior porcentagem das reservas provadas e é, também, o maior produtor, seguido pelos estados de Mato Grosso do Sul e do Pará.

De acordo com dados do Balanço Mineral Brasileiro (2001), a utilização do concentrado de minério de ferro é feita de duas formas: granulados e aglomerados. Os granulados (entre 25 mm e 6 mm) são adicionados diretamente nos fornos de redução, enquanto os aglomerados são os concentrados mais finos que, devido à sua granulometria, necessitam de uniformização. Os principais processos de aglomeração

são a sinterização e a pelletização, indicados, respectivamente, para os concentrados com granulometria entre 6,35 mm e 0,15 mm (*sinter feed*) e menores que 0,15 mm (*pellet feed*). A produção de *sinter* se dá nas mesmas usinas da indústria siderúrgica, fazendo parte da linha de produção das siderúrgicas integradas. A produção de pelotas, com diâmetro em torno de 10 a 15 mm, normalmente se realiza nas usinas pelletização integradas com a mineração.

A produção mundial de minério de ferro em 2002 foi de cerca de 1,1 bilhões de toneladas. A produção brasileira representou 19,6% da produção mundial. Entretanto, conforme o Sumário Mineral Brasileiro (2003), como a produção da China deve referir-se à produção sem tratamento, o Brasil é, provavelmente, o maior produtor mundial de concentrado de minério de ferro. Na tabela 1 têm-se apresentados reserva e produção mundial de minério de ferro em 2002.

Tabela 1 – Reserva e produção mundial de minério de ferro (2002)

Discriminação	Reservas (10 ⁹ t)		Produção (10 ⁶ t)				
	Países	2002 ⁽¹⁾	(%)	2002	(%)	2003 ^(e)	(%)
Estados Unidos		15,0	4,5	52,0	4,8	50,0	4,5
Austrália		40,0	12,1	183,0	16,9	190,0	17,0
Brasil		19,0	5,8	212,0	19,6	215,0	19,2
Canadá		3,9	1,2	31,0	2,9	32,0	2,9
China		46,0	13,9	231,0	21,4	240,0	21,4
Índia		9,8	3,0	80,0	7,4	80,0	7,1
Irã		2,5	0,8	11,0	1,0	11,0	1,0
Cazaquistão		19,	5,8	15,0	1,4	18,0	1,6
Mauritânia		1,5	0,5	10,0	0,9	10,0	0,9
Rússia		56,0	17,0	84,0	7,8	92,0	8,2
África do Sul		2,3	0,7	36,0	3,3	38,0	3,4
Suécia		7,8	2,4	20,0	1,9	21,0	1,9
Ucrânia		68,0	20,6	59,0	5,5	63,0	5,6
Venezuela		6,0	1,8	18,0	1,7	17,0	1,5
Outros países		30,0	9,1	38,0	3,5	40,0	3,6
Total (arredondado)		330,0	100,0	1.080,0	100,0	1.120,0	100,0

Fonte: MINERAL COMMODITY SUMMARIES (2004)

(1) Reservas medidas e indicadas

(e) Dados estimados

Segundo dados do Sindicato Nacional da Indústria da Extração do Ferro e Metais Básicos (2002), as exportações brasileiras de minério de ferro e pelotas em 2002 atingiram 170,0 milhões de toneladas, com um valor FOB de cerca de US\$3,3 bilhões, indicando um aumento de 6,9% na quantidade e de 4,0% no valor das exportações relativamente ao ano anterior. As exportações brasileiras destinaram-se a 38 países, destacando-se como principais compradores China, Japão e Alemanha que juntos somam 43,0% do total embarcado.

Quanto ao tipo de produto, as exportações estão divididas em: pelotas (21,7%), *sinter feed* e *pellet feed* (69,3%) e granulados (9,0%).

A produção está distribuída entre cerca de 30 empresas que operam 80 minas, praticamente todas sendo explotadas pelo método de lavra a céu aberto, e utilizam-se de 43 usinas de beneficiamento. O minério bruto (hematita, com um teor médio de 60,0% de Fe e itabirito, com um teor médio de 50,0% de Fe), após o beneficiamento gera produtos granulados (16,0% da produção), *sinter feed* - 54,0% da produção e *pellet feed* - 30,0%, com teores de ferro variando entre 65,0 e 67,0%.

Em 2002 seis empresas foram responsáveis por 94,4% da produção. A Companhia Vale do Rio Doce S/A e suas coligadas produziram cerca de 187,2 milhões de toneladas, assim distribuídas:

- CVRD (Minas Gerais) – 72,2 milhões de toneladas
- CVRD (Pará) – 51,0 milhões de toneladas
- CVRD (Mato Grosso do Sul) – 1,8 milhões de toneladas
- Minerações Brasileiras Reunidas S/A-MBR – 30,8 milhões de toneladas
- FERTECO Mineração S/A – 16,4 milhões de toneladas
- SAMARCO Mineração S/A – 15,0 milhões de toneladas
- Cia. Siderúrgica Nacional-CSN - 13,1 milhões de toneladas
- V & M Mineração Ltda. - 3,8 milhões de toneladas

A produção brasileira de pelotas em 2002 foi 5,8% superior à de 2001, totalizando 39,4 milhões de toneladas.

A CVRD e suas coligadas (Hispanobras, Itabasco, Nibrasco e Kobrasco) produziram, no complexo de usinas de pelotização instalado no Estado do Espírito Santo, 23,2 milhões de toneladas de pelotas, cerca de 0,6% a menos que em 2001.

As usinas da Samarco (Município de Ubú - ES) e da Ferteco (Município de Congonhas - MG) produziram, respectivamente, 11,7 milhões de toneladas (+17,5% em relação a 2001) e 4,5 milhões de tonelada (+14,3%), conforme o Sumário Mineral (2003).

Ressalta-se que, embora as fontes consultadas apresentem estas empresas, nos últimos cinco anos ocorreram diversas fusões e aquisições, sendo que, atualmente, quase todas as principais empresas citadas pertencem ou são controladas pelo conglomerado da CVRD.

4.2 Pelotização

4.2.1 Histórico da pelotização

A pelotização consiste em duas operações distintas: formação das pelotas em temperatura ambiente e endurecimento das mesmas, o qual se dá pela cura a frio (no caso da aglomeração a frio) ou pela cura a quente (tratamento térmico à temperatura da ordem 1300°C).

Conforme Mantovani (1996), no processo de cura a frio o endurecimento das pelotas se dá pelas mudanças físico-químicas do aglomerante ocorridas em baixas temperaturas. Já no processo de cura a quente, que é o mais comum e vem de mais longa data, o endurecimento se dá pela recristalização ou intercrescimento das partículas e pela fusão da ganga, que desenvolve algum tipo de escória e aglomera as partículas quando submetidas a elevadas temperaturas. Este trabalho versará apenas sobre processo de endurecimento por cura a quente.

As pelotas são formadas pelo rolamento da mistura de finos de minério e água, com ou sem a adição de aglomerante, em um tambor ou em um disco inclinado. Neste estágio, as pelotas são denominadas pelotas “verdes” e têm resistência adequada para permitir o manuseio até a fase de endurecimento (tratamento térmico – “queima”). O tratamento térmico é realizado em fornos, normalmente utilizando gás ou óleo como combustível.

Ball et al. (1973) descrevem que o processo de obtenção de pelotas pelo rolamento de finos de minério úmido em um tambor, seguido de secagem e

tratamento térmico foi patenteado por A. G. Anderson, em 1913, na Suécia, porém sua patente nunca foi comercializada e seu trabalho foi esquecido.

Um processo similar foi usado na Alemanha por volta de 1930. Utilizou-se silicato de sódio como aglomerante. Nesta ocasião foi construída uma usina piloto em Rheinhausen, que deixou de operar logo depois.

Na mesma década, o United States Bureau of Mines desenvolveu um processo de pelletização no qual o minério fino era pelletizado em um tambor sem usar aditivos e as pelotas “verdes” eram tratadas termicamente em temperaturas entre 500°C e a temperatura de fusão do minério (BALL *et al.*, 1973).

Mais ou menos na mesma época, E. W. Davies e colaboradores, na Universidade de Minnesota, investigaram o processo de pelletização usando um tambor para pelletizar concentrados finos de magnetita dos depósitos de taconito de Mesabi, e um forno rotativo (“shaft kiln”) para o tratamento térmico.

E.W. Davies, após trinta anos estudando as etapas de britagem, concentração e aglomeração dos taconitos de Mesabi, encerrou suas atividades em 1943, demonstrando o potencial do processo de pelletização, utilizando um forno vertical na etapa de tratamento térmico.

De acordo com os autores supra-citados, logo após a Segunda Guerra Mundial, trabalhos de pelletização foram realizados na Suécia sob comando do Jernkontoret.

Por volta de 1950, o processo de pelletização estava consolidado e começou a operar comercialmente na Suécia. Foi usado “Vertical-Shaft Kiln” em uma usina com capacidade entre dez mil e sessenta mil toneladas por ano.

Em 1955, a primeira usina com capacidade de seis milhões toneladas por ano começou a operar nos Estados Unidos, utilizando o processo de grelha móvel para tratar termicamente as pelotas.

No Brasil, a pelletização teve início em 1961 com um convênio entre a Companhia Vale do Rio Doce – CVRD e o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT. Sob orientação do Dr. Carlos Dias Brosch, foram feitas extensas pesquisas, gerando em pouco tempo considerável competência técnica nesta área, colocando em operação em 1969 a usina de pelletização industrial (LIMA, 1991).

4.2.2 Processo de pelletização

O processo de pelletização é essencialmente baseado na formação das pelotas “verdes” pelo rolamento dos finos do minério ou concentrado, previamente misturado com os aditivos (calcário, carvão) e o aglomerante. A adição de quantidade adequada de água é uma variável dependente da umidade natural do concentrado de minério e de suas características superficiais.

Estas pelotas são então secadas, pré-aquecidas e tratadas termicamente, sob condições oxidantes, a uma temperatura de 1250-1350°C. Como consequência, são formadas pontes de óxido, crescimento das partículas e ligação por escória, do que decorre o ganho de resistência da pelota, conforme Ball *et al.* (1973).

Inicialmente as pelotas de minério de ferro eram produzidas comercialmente na sua maior parte em tambores. Com o avanço da tecnologia foram desenvolvidos os discos de pelletização; atualmente os dois equipamentos ainda são utilizados.

Um disco de pelletização consiste, essencialmente, em uma base circular, cuja periferia é delimitada por uma parede com altura cerca de quatro vezes menor do que o diâmetro, que gira com uma inclinação com a horizontal da ordem de 45°.

A alimentação de minério no disco ocorre no ponto inferior do disco, ligeiramente acima do ponto de adição da água, a qual é pulverizada por “sprays”.

O crescimento das pelotas no disco ocorre em dois estágios:

- (a) nucleação, em que os núcleos ou as sementes são formadas; e
- (b) crescimento destes núcleos, gerando pelotas no tamanho requerido.

A zona de nucleação ocorre mais próxima à região de pulverização de água, onde há maior possibilidade de saturação da umidade das partículas.

A figura 2 apresenta um esquema de um disco em escala de laboratório. Quando o disco está girando, o material é alimentado, com umidade inferior a requerida para a formação de pelotas; o material é lançado para a parte inferior do disco, onde entrará em contato com a água proveniente dos pulverizadores e, nesta fase, se dará o início a etapa de nucleação.

Nesta fase, os núcleos começam a tomar forma de pequenas pelotas e, então uma ação de rolamento se dá da seção mais baixa, à esquerda do disco esquematizado na figura 2, para o alto.

Enquanto o minério adicionado vai aderindo à superfície das pelotas, as mesmas aumentam de tamanho, o coeficiente de atrito é reduzido e as pelotas adquirem força centrífuga que as carrega para fora da zona de nucleação e sobem ao topo do disco, de onde rolam para descrever uma trajetória semicircular antes de retornar à base do disco.

A altura e a largura da trajetória aumentam com o aumento crescente da pelota até que as mesmas sejam deslocadas para baixo pelas lâminas do raspador, sob os pulverizadores de água e encontram a alimentação nova.

A função dos raspadores é, além de impedir o acúmulo de material no disco, de controlar o fluxo do material no crescimento das pelotas. Quando as mesmas alcançam determinado tamanho, são descarregadas do disco. Assim o disco age como um classificador, embora sua finalidade seja produzir pelotas “verdes”, numa faixa granulométrica em torno de 10 a 16 milímetros. No entanto, os limites exigidos na prática moderna, são bem mais estreitos (12 ± 1 mm). As frações fora desta faixa são eliminadas nesta etapa, por meio de peneiras, são desagregadas e retornam ao disco de pelotização.

Mantovani (1996) cita que a quantidade e a faixa granulométrica das pelotas produzidas num disco de pelotização dependem de vários aspectos:

- a) diâmetro do disco, inclinação e rotações do disco pelotizador;
- b) sistema de carregamento do material a ser pelotizado; e
- c) sistema de umedecimento.

O tamanho do disco influenciará não somente a taxa de produção, mas também, as rotações impostas ao disco. Para altas rotações haverá diminuição do tempo para que as pelotas atinjam o tamanho desejado. O ângulo de inclinação influenciará, tanto a quantidade de pelotas, como o seu tamanho, para uma determinada quantidade de carga. Os sistemas de carregamento e umedecimento influenciam, principalmente, a faixa granulométrica das pelotas.

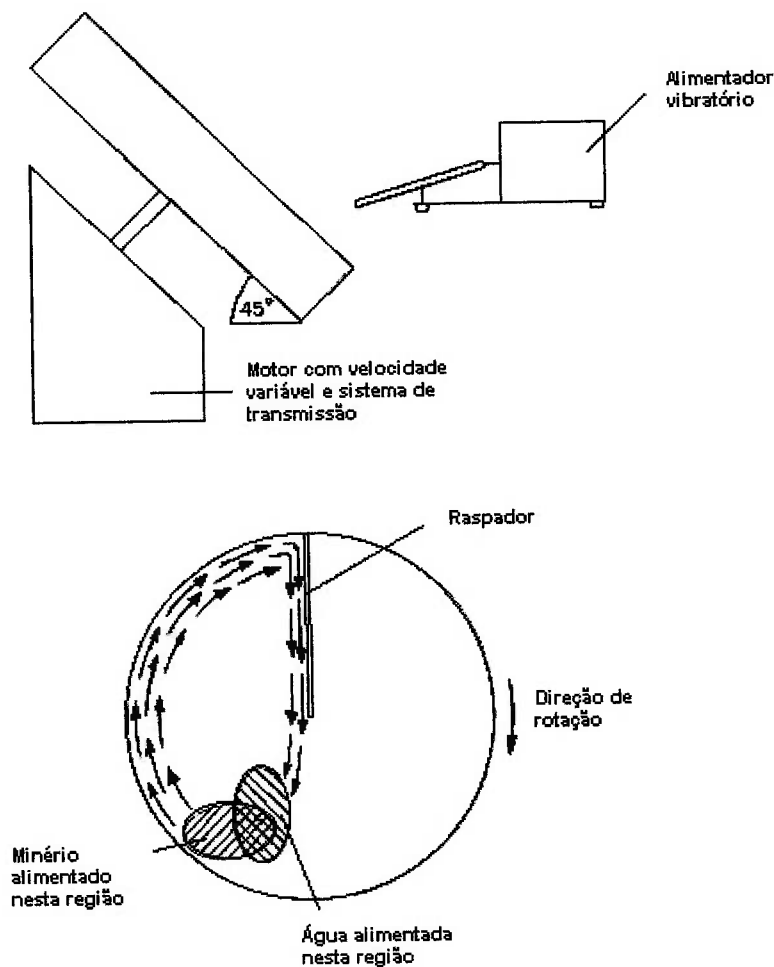


Figura 2 – Diagrama esquemático de um disco pelletizador de laboratório (BALL *et al.*, 1973)

Para a formação das pelotas “verdes” duas fases são essenciais: uma sólida (minério) e outra líquida (água).

Conforme Silva (2003), as forças de interação geradas nas interfaces sólido/líquido têm um efeito coesivo sobre as partículas. As forças responsáveis pela formação dos aglomerados podem resultar de inúmeras fontes, sendo as principais as forças interfaciais e capilares, devido à presença da fase líquida.

As forças que determinam a pressão capilar influenciam a resistência à compressão e a deformação da pelota. Daí sua importância no mecanismo de formação destas.

Pelo efeito da capilaridade, a água penetra através dos vazios e se aloja nos poros dos grãos dos minérios, preenchendo os vazios intersticiais entre as partículas sólidas e revestindo cada grão. Forma-se, então, um sistema capilar. Na aproximação de dois grãos ocorre o contato das películas aquosas que os revestem, situação em que as extremidades dos capilares atingem a superfície externa da pelota (constituindo poros externos), e a sucção capilar desenvolvida na interface ar / água provoca uma reação de igual intensidade sobre os grãos, mantendo as partículas coesas como pode ser visto na figura 3.

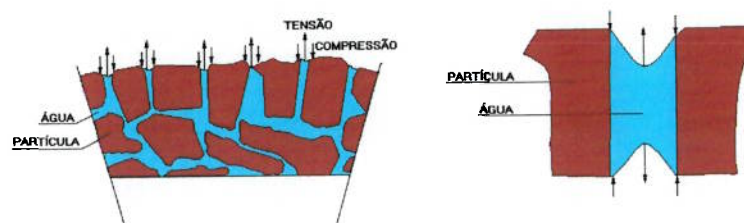


Figura 3 – Influência das forças capilares nos mecanismos de ligação
(MENDONÇA *et al.*, 1985)

Os movimentos relativos entre as partículas favorecem a adesão entre as mesmas, através do aparecimento de diversos pontos de contato entre grãos e de superfícies, nas quais o maior número possível de capilares deve ser formado. Os vários regimes que podem existir em um aglomerado são observados na figura 4.

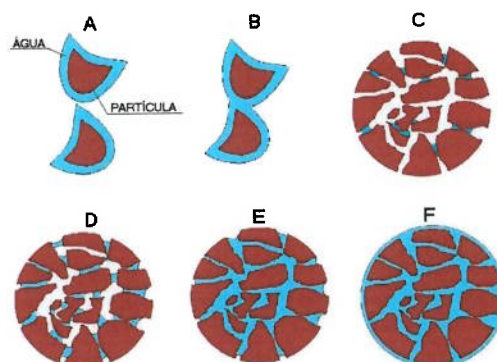


Figura 4 – Influência da água na formação de pelotas “cruas”
(MENDONÇA *et al.*, 1985)

Conforme Mendonça (1985), Pietsch (2002) e Silva (2003), observa-se na figura 4:

- no estágio A as partículas são envolvidas por uma película de água;
- no estágio B, devido à tensão superficial da água, são formadas as pontes líquidas (“primeiro capilar”);
- devido ao rolamento no disco, à medida que mais pontos de contato são formados e os aglomerados crescem, os mesmos passam pelos estado pendular (C) e funicular (D), onde as primeiras pontes líquidas são formadas e o aglomerado é adensado, com o suprimento de água e o efeito do rolamento, antes de atingirem o estado capilar (E);
- a situação (E) é considerada ótima. Nesta fase as forças capilares das pontes líquidas exercem grande ação. Todos os poros internos estão preenchidos com água, sem, contudo ocorrer um recobrimento total da pelota. Para uma quantidade de água além do estado capilar (E), as partículas estão completamente cobertas com água e somente a tensão interfacial da superfície convexa de uma gota contínua de líquido unirá as partículas (F). Esta é uma situação indesejável, pois reduz drasticamente a resistência da pelota, permitindo que estas se deformem com facilidade.

A mistura inicial é formada de agregados liberados que formarão os núcleos durante os primeiros estágios da aglomeração. A tensão superficial do líquido é responsável pelo fenômeno de aglomeração. A redução na energia livre superficial total do sistema, acompanhada pela queda da área interfacial ar-líquido, é a força motriz. A nucleação é mais evidente com partículas menores que 0,045 mm.

Após a nucleação, os mecanismos de crescimento predominantes podem ser a coalescência e o recobrimento por partículas advindas da degradação de outros aglomerados.

O mecanismo de coalescência é favorecido quando se têm partículas menores que 0,045 mm, de distribuição de tamanho ampla e grande área superficial. Isso porque resistem à degradação e ao período de consolidação do aglomerado.

É importante que o crescimento dos aglomerados ocorra de forma a garantir as propriedades desejadas no produto. Um crescimento excessivo e rápido pode gerar um produto sem forma, de alta porosidade interna e de baixa resistência.

Silva (2003) cita alguns dos fatores que influem na taxa de crescimento dos aglomerados e que devem ser controlados, que são:

- ✓ umidade;
- ✓ velocidade de rotação do equipamento utilizado para a aglomeração;
- ✓ parâmetros de processo (posição dos raspadores dentro do disco, posição da descarga da alimentação e ângulo de inclinação do equipamento);
- ✓ taxa de alimentação do material no equipamento;
- ✓ tamanho e distribuição de tamanho das partículas do material da alimentação (mistura de minérios e aglomerantes); e
- ✓ presença de sementes ou micro-núcleos.

A taxa de crescimento dos aglomerados depende da suscetibilidade dos mesmos a deformação, a degradação, ao coalescimento e ao recobrimento por outras partículas, sob condições de impactos constantes que sofrem durante o processo de aglomeração no disco de pelotização.

4.2.3 Tratamento térmico da pelotas (“queima”)

As pelotas obtidas “verdes” têm uma resistência à compressão da ordem de 1 kgf por unidade, a qual é insuficiente para serem utilizadas nos altos fornos. Para tal, as mesmas necessitam de uma resistência da ordem de 250 kgf por pelota, que é atingida no processo de cura a quente, quando são submetidas a aquecimento a temperaturas da ordem 1350°C.

Segundo Araújo (1967), este aquecimento é feito cuidadosamente para evitar o choque térmico e dar tempo para a saída da água. A “queima” das pelotas se faz entre 1250°C e 1350°C, onde se dá a recristalização ou intercrescimento dos grãos.

No processo de “queima” das pelotas são usados fornos verticais, secagem em grelha móvel seguida de “queima” em fornos rotativos como os de cimento, ou esteira de sinterizar, com aquecimento a gás ou a óleo.

Os fornos verticais foram concebidos para tratamento de concentrados de magnetita. Têm cerca de 13 m de altura, seção retangular de 2 x 4,5 m. A parte superior do forno é revestida de tijolos sílico-aluminosos, e a parte inferior de tijolos resistentes à abrasão. Os gases quentes resultantes da combustão do gás ou do óleo usados no processo são introduzidos no forno através das janelas situadas perto da

parte superior das câmaras. As pelotas “verdes” são alimentadas por uma correia transportadora e atravessam o forno em contra corrente com os gases.

O processo de grelha móvel é a aplicação da grelha Lepol, projetada para a indústria de cimento. As pelotas “verdes” são alimentadas sobre uma grelha contínua, para secagem e preaquecimento, aproveitando-se o calor dos gases do forno girante. O material já aquecido vai ao forno, onde é levado à temperatura de aglomeração, passando depois a um resfriador e à instalação de peneiramento.

No caso das esteiras de sinterizar, mediante a adaptação do ciclo térmico, são colocadas zonas de pré-aquecimento e de resfriamento, aproveitando o calor dos gases. As pelotas atravessam várias zonas de temperatura que asseguram, sucessivamente, a secagem e o resfriamento.

4.2.4 Propriedades mecânicas das pelotas

A identificação de parâmetros que caracterizem as propriedades das pelotas tem sido objeto de intensivos estudos desde o princípio dos trabalhos de produção de pelotas.

As pelotas são normalmente transportadas de consideráveis distâncias da unidade de pelotização até os centros consumidores, as quais são escoadas através do transporte transoceânico, fazendo com que muita atenção seja dada para a resistência física destes aglomerados.

As propriedades mecânicas das pelotas “cruas”, não tratadas termicamente, são verificadas através da avaliação do número de quedas sucessivas da pelota “verde” de uma altura de 45 cm, altura esta padronizada e normalizada, e pela determinação da resistência à compressão da pelota “verde” e após secagem à temperatura de 100°C (RIPKE, 2002).

Conforme o autor supracitado, a avaliação do número de quedas que uma pelota suporta é importante para saber se as pelotas foram confeccionadas satisfatoriamente e consistentemente para suportarem o manuseio até o forno de “queima”.

A força de compressão é importante para avaliar o efeito do aglomerante na resistência da pelota. A medição da resistência à compressão é realizada em

equipamento apropriado, onde a força de compressão é medida enquanto uma pelota é esmagada entre dois pratos, sob uma velocidade constante de 20 mm/min e, no momento de ruptura, é registrado o valor da carga final. Isto indica a carga sobrejacente que a pelota suporta no armazenamento ou no forno.

Para o uso da pelota em alto forno, um dos fatores mais importantes é a resistência física da pelota depois de “queimada”, isto é, a resistência do material ao impacto e à abrasão. Informações sobre esta propriedade indicarão se o material possui resistência para ser transportado da unidade de tratamento térmico até a unidade de fabricação de aço (BALL *et al.*, 1973).

A necessidade de tratamento térmico das pelotas significa que, um aglomerante com características satisfatórias, deverá manter a pelota íntegra durante o processo de aquecimento.

Mendonça *et al.* (1985) citam que, no processo de aquecimento, as pelotas “verdes” são expostas, bruscamente, à ação de gases quentes ascendentes e descendentes, em torno de 320 a 350°C, até chegarem à fase final de tratamento a 1350°C. Nestas fases, as pelotas “verdes” sofrem solicitações térmicas e mecânicas, e o aglomerante deve conferir-lhes as características de resistência ao choque térmico, ou seja, à evaporação brusca da água contida nos poros das pelotas, que criam pressões internas, podendo promover trincas e até desintegrar as pelotas. Ainda nesta fase, as pelotas devem ter resistência à compressão, pois as camadas inferiores de pelotas no forno de “queima”, sofrem a ação do peso das camadas superiores, bem como das pressões dinâmica e estática dos gases quentes.

A avaliação da resistência das pelotas antes e após tratamento térmico é complexa, visto que, por exemplo, no caso das pelotas tratadas termicamente, a resistência pode ser medida como resistência à fragmentação por quedas (Shatter Test) ou pela resistência à abrasão e à compressão; como resultado disto, os seguintes ensaios foram propostos:

1. teste de fragmentação por quedas “Shatter Test” (JIS M 8711);
2. determinação da resistência ao tamboramento e à abrasão (ISO 3271);
3. determinação da resistência à compressão (ISO 4700);
4. determinação do número de quedas repetidas;
5. propriedades químicas das pelotas;

6. distribuição granulométrica (ISO 4701);
7. porosidade; e
8. redutibilidade (ISO 7992, ISO 7215, ISO 11257).

A avaliação das propriedades das pelotas é extremamente importante, visto que pelotas de minério de ferro de alta qualidade e alto teor aumentam significativamente a produção do alto-forno.

4.2.5 Aglomerantes

Como dito anteriormente, a pelotização é obtida com a adição aos sólidos de quantidade adequada de água, fator fundamental na formação e no crescimento das pelotas, que cria uma tensão superficial que mantém os grãos minerais coesos, permitindo assim o seu manuseio, conforme Lima (1991).

Esta tensão de coesão de partículas finas devido à água é denominada tensão neutra. A tensão neutra, no entanto, não é suficiente para manter a coesão dos grãos de um minério de densidade tão elevada quanto a de ferro. Além disto, quando esta pelota é aquecida e ocorre a vaporização da água, a pelota tende a se desintegrar. Para prevenir tais efeitos são acrescentados aditivos que visam:

- a) aumentar a resistência da pelota antes do aquecimento (resistência a “verde”);
- b) evitar o colapso destas nas etapas iniciais do aquecimento, quando grande volume de gases gerados pela vaporização de água tende a destruir a pelota.

É de suma importância a avaliação da molhabilidade das partículas minerais para cada tipo de minério.

Conforme estudado por Mourão et al. (1996), a gênese do minério tem influência no teor ótimo de umidade e influi nos níveis de adição de aglomerantes e, conseqüentemente, influi nos indicadores de qualidade das pelotas “verdes”. Deve-se, portanto, ao caracterizar os minérios, atentar para os aspectos texturais, o grau de hidratação de cada tipo, a mineralogia e a forma das partículas.

A adição de alguns aglomerantes melhora as características mecânicas das pelotas. A distribuição regular da umidade e do aglomerante na alimentação contribui decisivamente para melhorar as características das pelotas, sobretudo em

relação à formação de aglomerados indesejáveis antes da pelletização propriamente dita. Se a umidade for excessiva, ocorre a tendência de formação de pelotas de formas irregulares e excessivamente plásticas, com tamanho excessivo e muito frágeis.

Pelotas de minério de ferro, destinadas ao processo de redução nos altos fornos ou nos fornos de redução direta, com composição e diâmetro aceitáveis e possuindo características físicas e metalúrgicas favoráveis, somente podem ser obtidas se, à carga, forem adicionados aditivos e se, em seguida se fizer um processamento térmico em temperatura elevada que assegure a constituição de fases novas e a recristalização, mesmo parcial, da hematita originária (para pelotas tratadas a quente).

Outrossim, como mencionado, com minerais de densidade tão alta como a hematita, a tensão superficial da água, por si só não parece ser suficiente para manter a coesão. Outros produtos, denominados **aglomerantes** precisam ser adicionados à mistura a pelletizar, com os objetivos de:

- a) aumentar a viscosidade da fase líquida dentro dos capilares;
- b) manter a pelota verde coesa (aumentar a resistência a verde); e
- c) auxiliar, durante a “queima”, a formação de pontes cerâmicas ou de óxido de ferro ou ainda a escorificação em pontos discretos, assim contribuindo para a resistência da pelota após a queima.

A tensão de adesão entre os grãos, devido ao meio aglomerante (água+aditivo), apresenta aproximadamente o mesmo valor da tensão de coesão do aglomerante (RUMPF, 1962).

Conforme descrito em Lima (1992), as ligações sólidas que dão resistência às pelotas após tratamento térmico, podem ser formadas pelos seguintes fenômenos:

- a) intercrescimento de grãos cristalinos: esta é a ligação mais importante nas pelotas;
- b) por reações químicas;
- c) por fusão dos pontos de contato das partículas: formam-se ligações de materiais fundidos e a perda da porosidade das pelotas;
- d) por endurecimento dos aglomerantes; e

- e) por cristalização de materiais dissolvidos, materiais estes formados pelos constituintes dos grãos ou por aditivos quaisquer adicionados às pelotas.

O colapso das pelotas por choque térmico ocorre quando a pressão dos vapores produzidos pela vaporização brusca da água e dos reagentes gera tensões superiores à resistência da pelota.

Segundo Lima (1992), os aglomerantes são utilizados no processo de pelletização para auxiliar a formação e manutenção das pelotas e melhorar suas características durante o tratamento térmico, evitando que as pelotas entrem em colapso. Devem ainda melhorar as qualidades finais das pelotas tratadas termicamente, seja pelo aumento da resistência mecânica, seja pela melhora das características de redutibilidade.

De acordo com Bohomoletz *apud* Lima (1992) o aglomerante deve exercer ainda as seguintes funções:

- aumentar a resistência mecânica das pelotas “verdes”;
- incrementar a resistência ao choque térmico nas etapas de secagem e tratamento térmico; e
- possibilitar a formação de compostos químicos de interesse nas etapas posteriores.

Os aglomerantes mais comuns utilizados no processo de pelletização são:

- bentonita;
- outras argilas;
- óxido ou hidróxido de cálcio;
- dolomita;
- diversos sais inorgânicos;
- aglomerantes orgânicos.

4.2.5.1 Bentonita

O aglomerante clássico para a pelletização de minério de ferro é a bentonita. Conforme descrito em Porto *et al.* (2002), bentonita é o nome genérico das argilas constituídas essencialmente de minerais do grupo das esmectitas, independentemente de sua origem ou ocorrência. As esmectitas possuem como características principais

o alto poder de inchamento, até 20 vezes seu volume inicial, atingindo espaços interplanares de até 100 Å, elevada área superficial (até 800 m²/g), capacidade de troca catiônica (CTC) na faixa de 60 a 170 meq/100g e tixotropia, que consiste na capacidade reversível de tornar-se líquida quando agitada ou bombeada e de se tornar gel quando cessado o movimento¹. Estas características conferem à bentonita propriedades bastante específicas, que têm justificado um grande número de aplicações.

Segundo Lira Filho (1973), embora não seja aparente, as argilas são constituídas por minúsculos cristais que podem ser reduzidos a dimensões coloidais por adição de água. A propriedade de plasticidade das argilas está relacionada com sua capacidade de reter água entre as camadas cristalinas.

Na determinação da sua composição química aparecem como elementos essenciais: a sílica (SiO₂) e a alumina (Al₂O₃), além de óxidos de ferro (Fe₂O₃), magnésio (MgO), cálcio (CaO), sódio (Na₂O), potássio (K₂O) e outros, como também quantidades variáveis de água na estrutura. Na tabela 2, está apresentada uma análise típica de composição química de bentonita.

Tabela 2 – Composição química típica de bentonita

Óxidos equivalentes	Concentração (%)
SiO ₂	45-65
Al ₂ O ₃	18-21
Fe ₂ O ₃	4-5
Total (SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃)	67-91
CaO	1,3-4,4
MgO ₂	2-4
Na ₂ O	1-3
K ₂ O	0,3-1,0
TiO ₂	0,1-0,2
MnO ₂	0,0-0,02

Fonte: RIPKE (2002)

De acordo com Ripke (2002), a bentonita aumenta a resistência das pelotas de minério de ferro por dois motivos. Primeiramente, pela ação do material coloidal que diminui as distâncias entre partículas e, então aumenta a força de Van der Waals.

¹ UNIVERSIDADE DE SANTA CATARINA. Florianópolis. Trata de trabalhos realizados em 2001. Disponível em: <http://www.enq.ufsc.br/labs/simpro/ensino/eqa5312/trabalhos/001.1/2001.1equipe04/bentonita.htm>. Acesso em: 23/03/2004.

Segundo, forma uma ligação sólida pelo gel endurecido, que gera resistência das partículas nos pontos de contato.

Quando usada a bentonita, a resistência das pelotas secas ocorre pela dispersão da umidade e pela redeposição das plaquetas de bentonita nos pontos de contato das partículas constituintes das pelotas.

A bentonita tem a capacidade de absorver, através de suas camadas estruturais, líquidos cujas fórmulas químicas apresentem íons hidroxila, tais como água, álcool, entre outros, formando géis. O poder aglomerante das argilas origina-se da atração mútua das partículas (coesão iônica) e na adesão destas às superfícies dos minerais. Somente em presença de água apresentam esta propriedade, pois o líquido serve como veículo e agente coloidizador.

A dosagem típica de adição de bentonita como aglomerante na pelotização de minério de ferro é da ordem de 0,5 a 0,7% em massa. Este nível de dosagem está no limite superior de adição, quantidades maiores não são vantajosas devido ao custo e a incorporação exagerada de sílica nas pelotas.

A principais vantagens da utilização da bentonita como aglomerante na pelotização de minério de ferro são o baixo custo e a estabilidade desta, mesmo em altas temperaturas. Entretanto, apresenta alguns problemas, quais sejam:

- a) a quantidade a ser acrescentada à pelota é ainda relativamente grande, da ordem de 0,5% em peso;
- b) deixa resíduo característico das argila: sílica e alumina, que tem que ser escorificado, diminuindo, portanto, o volume útil do forno; e
- c) não uniformidade no fornecimento.

Pesquisas em nível acadêmico, como as desenvolvidas por Kawatra et al. (2001), estudando os mecanismos de ligação da bentonita, indicam que é possível diminuir a dosagem de bentonita, se esta adquirir uma forma fibrosa durante o processo de mistura. O mecanismo de ligação da bentonita modificada, a “fibrosa”, é completamente diferente do mecanismo clássico da dispersão. Ao passar a bentonita e o concentrado de minério de ferro várias vezes por uma prensa de rolos é favorecida a ação de cisalhamento que desenvolve as fibras na bentonita. Sob condições apropriadas, o mecanismo de fibra dá forma a uma matriz fibrosa que “amarra” as partículas de minério de ferro.

As figuras 5a e 5b mostram o resultado da experiência realizada utilizando grânulos de vidro e bentonita, após terem sido misturados por 30 segundos.

A figura 5a mostra esta mistura sem ter sido passada pela prensa de rolos e a figura 5b após ter passado vinte vezes pela mesma.

Na figura 5a a superfície dos grânulos de vidro está limpa, a bentonita cria uma ponte para ligar os grânulos e não há evidência da formação de fibras, enquanto que na figura 5b a bentonita adquiriu uma estrutura semifibrosa e cobriu a superfície dos grânulos, ligando as partículas.

Como resultado dos trabalhos, foi possível diminuir a dosagem de bentonita de 0,6% para 0,3%. Estes trabalhos não possuem, no entanto, nenhuma referência de aplicação industrial.

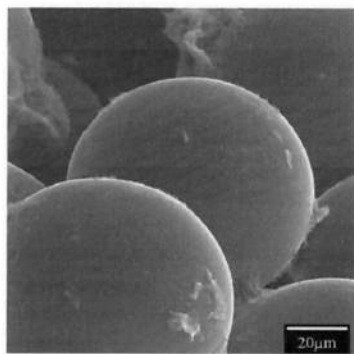


Figura 5a

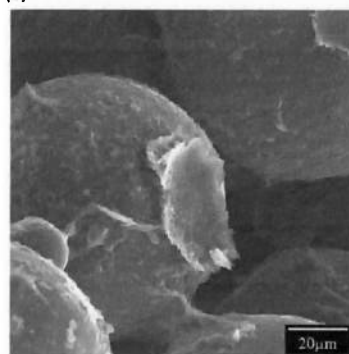


Figura 5b

Figura 5 – Fotomicrografias de grânulos de vidro misturados com bentonita antes (5a) e após (5b) a passagem pela prensa de rolos (KAWATRA *et al.*, 2001)

Mendes *apud* Lima (1991) destaca que a resistência das pelotas quando da utilização da bentonita, durante o tratamento térmico, é obtida por um mecanismo de recristalização, proveniente de reações físicas que ocorrem durante o processo, resultando na ligação dos grãos, dando lugar a grãos maiores. Da formação de escória, resultante das reações químicas que ocorrem entre elementos básicos e ácidos da ganga de minério, da bentonita e o óxido de ferro, resulta uma série de compostos ou “soluções sólidas”. A fase assim formada provoca a ligação, capturando grãos minerais de ferro dentro de uma massa vítrea e, também, por simples reação com a superfície dos grãos.

4.2.5.2 Aglomerantes orgânicos

Aglomerantes utilizados nos processos de pelotização que após tratamento térmico não deixassem resíduos seriam extremamente interessantes. Teriam sobre a bentonita as vantagens de, por serem produtos industrializados, não sofrerem variação de qualidade e a quantidade adicionada ser muito menor, da ordem de 0,05%, o que é importante do ponto de vista logístico (menor volume a ser estocado e transportado) e econômico.

Vários produtos vêm sendo estudados, podendo-se citar dentre eles a carboximetil-celulose (CMC), goma guar, hemicelulose, acrilato de amido, poliacrilamidas dentre outros. As desvantagens verificadas na prática são especialmente o custo, a possibilidade de deterioração de alguns dos produtos e o desempenho no tratamento térmico.

Lima (1991) e Lima e Chaves (1992) estudaram o uso da CMC como aglomerante na pelotização de minério de ferro. Experiências anteriores com o uso de reagentes orgânicos haviam levado a pelotas de propriedades mecânicas fracas, especialmente a quente, a custo de produção muito elevado ou a adição de água na pelotização muito altas - a ponto de causar a deformação da pelota sob seu próprio peso. Estes problemas foram resolvidos pela adição de um aditivo em conjunto com a CMC, no caso o tripolifosfato de sódio (TPP). As pelotas dos estudos foram caracterizadas e as conclusões deste trabalho foram as seguintes:

- a) isoladamente, a CMC não é adequada, pois a pelota não resiste a temperaturas elevadas, desagregando-se. Isto foi resolvido pela adição de um aditivo, TPP. Este melhora as propriedades, tanto para a pelota verde como após a queima. Existe um valor ótimo de adição;
- b) a CMC mais o aditivo TPP apresenta boas possibilidades de utilização como aglomerante de pelotização, apresentando, entretanto, variações significativas de desempenho conforme a variedade ensaiada. Quanto maior a viscosidade da solução de CMC em água, melhor é o poder aglomerante e maior a dificuldade de sua dissolução.

Em 1993, Chaves estudou a aglomeração de finos de calcário. Iniciou o trabalho utilizando o aglomerante identificado nos trabalhos realizados por Lima (1991), ou seja, a mistura: CMC+TPP, bentonita e cimento *portland*.

No esforço de substituir o TPP por produtos mais baratos, diferentes aditivos foram estudados, tendo-se concluído pela vantagem econômica da barrilha. No caso do calcário não havia o tratamento térmico da pelota, apenas a cura: verificou-se que a pelota curada tinha propriedades mecânicas notáveis. Interpretou o comportamento da pelota “verde” como resultado da ação da barrilha sobre partículas coloidais de calcário e dos argilo-minerais presentes neste agregado, e o comportamento após a cura como resultado da reação de dupla troca: $\text{CaCO}_3 + \text{Na}_2\text{CO}_3 = \text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{CaCO}_3$, onde os íons Ca^{++} e Na^+ da solução e da superfície mineral são trocados, formando pontes de carbonato entre uma partícula e outra.

Motivados pelos excelentes indicativos de potencial de utilização da CMC obtidos por Lima (1991), Cassola e Chaves (1998) estudaram aglomerantes para minério de ferro visando a substituição da bentonita; duas linhas de investigação foram iniciadas: a primeira contemplava o *modus operandi* clássico de usar bentonita e CMC+TPP, a segunda contemplava a substituição da bentonita, CMC, e CMC+TPP por produtos alternativos. Os ensaios mostraram que o TPP sozinho era mais efetivo na pelotização que a mistura CMC+TPP. Isto permitiu a elaboração da hipótese de trabalho de que o efeito verdadeiramente importante na aquisição de propriedades mecânicas pela pelota era devido ao efeito do aditivo sobre os finos de minério presentes na amostra, ou seja, ao efeito de cristalização/cimentação de materiais dissolvidos, materiais estes formados pelos constituintes dos grãos.

No entanto, a idéia de se produzir pelotas com aglomerantes alternativos não era nova. O efeito da ação deste aditivo sobre os finos de hematita e limonita presentes no minério de ferro foi que diferenciou os estudos realizados por Cassola e Chaves (1998) e conferiu a estas pelotas a resistência mecânica requerida.

Os trabalhos consistiram da avaliação do comportamento de cinco famílias de aglomerantes orgânicos e inorgânicos, em dosagens variadas e a caracterização dos produtos aglomerados pelo processo de pelotização quanto à sua resistência mecânica. Por estes trabalhos, constatou-se que o efeito da mistura minério+aglomerante é decorrente de dois mecanismos diferentes que se somam para dar o resultado final, qual seja, aumentar a viscosidade da solução e promover a ação dispersante do aditivo sobre as partículas coloidais de limonita presente na superfície

de hematita. Verificou-se que o fenômeno de dispersão das limonitas da superfície das partículas de hematita é o mecanismo fundamental para o processo.

Ele assegura a viscosidade intersticial necessária para manter a pelota verde estável e permite a formação de películas de óxido de ferro intergranulares, que ajudam a estabilidade da pelota queimada. Tudo isto, sem prejuízo da ação dos outros mecanismos de aglomeração, tais como, ligação por escórias, fusão de pontos ou por sinterização de pontos. Esta dispersão pode ser conseguida por quaisquer produtos químicos que possuam esta ação, independente da origem do minério e/ou da granulometria inicial do minério. Em especial, os dispersantes que não aportem contaminações indesejáveis para a pelota (Al, Si, P, S, Na) são os mais indicados.

O aglomerante orgânico mais usado atualmente nas usinas de pelotização é o *Peridur*, um derivado da celulose especialmente desenvolvido pela empresa AKZO – Divisão de Sais e Química Básica, para a pelotização de minério de ferro.

O *Peridur* é composto de carboximetilcelulose – CMC (50%), carbonato de sódio - Na_2CO_3 (30%) e NaCl (20%). É um pó branco de fácil dissolução em água, sendo, geralmente adicionado aproximadamente 10% do valor usado de bentonita (AKZO NOBEL CHEMICALS, 2004).

Lima (1991) cita que Steeghs et al. descreveram ensaios utilizando *Peridur* como aglomerante para concentrados de taconito americano e observaram que o *Peridur* inicialmente dissolve-se na água e associa moléculas de água ao redor de sua estrutura. Sendo assim, quanto maior a quantidade de água que puder ser associada ao *Peridur*, menor será a adição do aglomerante. O *Peridur* resulta em uma solução viscosa com estrutura contínua quando úmido e semelhante a uma ponte, quando seco, do que decorre a resistência das pelotas.

O *Peridur* tem como vantagem sobre a bentonita a não contaminação das pelotas por ganga ácida, pois é eliminado durante o tratamento térmico, conseqüentemente aumenta o teor ferro contido. A dosagem normalmente utilizada é de 0,05% em peso de concentrado úmido. Tem como principais desvantagens o elevado custo e a alta higroscopicidade.

4.3 Caracterização de concentrados de minérios e aglomerados

Os minérios de ferro brasileiros apresentam composições mineralógicas muito variadas, devido às diferentes condições de metamorfismo, tectonismo e intemperismo a que foram sujeitos, ou mesmo em virtude de sua gênese. Desta forma, originaram-se minérios com diferentes constituintes mineralógicos, trama, tamanho e morfologia dos cristais, tamanho e morfologia dos poros, porosidade, forma e superfícies das partículas (VIEIRA *et al.*, 2003).

Entende-se por gênese de um minério de ferro, a sua origem e evolução, isto é a forma como surgiu e foi depositado inicialmente na natureza e pelo que passou ao longo de milhares de anos, como condições de temperatura, pressão, esforços e intempéries.

As condições pelas quais um determinado minério passou é que determinam suas características mineralógicas, sua composição e seu comportamento físico e metalúrgico. De acordo com o grau de metamorfismo e enriquecimento, os minérios de ferro podem ser classificados, segundo Mourão *et al.* (1996), em dois tipos básicos: metassomáticos e supergênicos, cujas principais características são apresentadas na tabela 3.

Tabela 3 – Principais características dos tipos básicos de minério de ferro

	Metassomáticos	Supergênicos
Enriquecimento	Elevado grau de metamorfismo Crescimento e achatamento dos cristais	Baixo grau de metamorfismo Enriquecimento por intemperismo
Características físicas	Minérios compactos Tamanho dos cristais: fino (0,01 a 0,04 mm) grosso (0,22 mm) Coloração azulada	Minérios porosos Tamanho dos cristais: muito fino (<0,01 mm) fino (0,01 a 0,04 mm) Coloração marrom
Características químicas	Pouco hidratados Baixos teores de deletérios	Muito hidratados Altos teores de deletérios
Características metalúrgicas	Elevada crepitação (granulado) Baixa redutibilidade	Baixa crepitação (granulado) Alta redutibilidade
Comportamento na pelotização	Baixa moabilidade Fácil filtração	Alta moabilidade Filtração mais difícil, devido aos altos teores de microfinos

Fonte: MOURÃO *et al.* (1996)

Em seus estudos, Mourão *et al.* (1996) observaram que as diferenças de características entre os minérios resultam em comportamento diferenciado durante a formação das pelotas.

Dentre outras, características como o formato, o tamanho e a textura das partículas, a capacidade de retenção de água, a capilaridade e força de coesão entre partículas de minério determinam a velocidade de crescimento e o grau de compactação das pelotas. Influenciam também na quantidade de aglomerante necessária para a obtenção de pelotas com qualidade satisfatória.

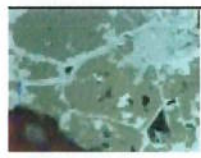

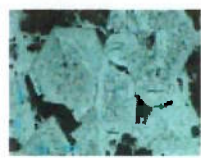

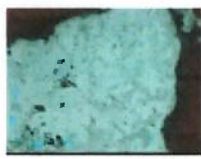

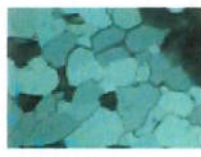
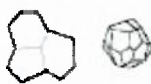




Arias e Mannheimer (1972), em estudos de microscopia eletrônica de varredura com minérios brasileiros, comprovaram as modificações texturais e a alteração da natureza originária do mineral hematita. À temperatura de 1100°C, começam as partículas mais finas, de cerca de 2 µm de diâmetro médio, a recrystalizar e a crescer. Estas partículas se distribuem entre grânulos lamelares maiores; estes, por sua vez, apenas evidenciam a formação de protuberâncias. A esta temperatura, também, os grânulos de sílica (da ganga) e de cal, calcário ou bentonita adicionada, começam a constituir uma nova fase de caráter aglomerante, que Ulrich e Han (1962) atribuem à natureza de ferrato. Aumentando a temperatura até 1370°C, comprova-se apreciável aumento na resistência, acompanhado de aumento do teor de FeO, decorrente de transformação de parte da hematita em magnetita. É, também, apreciável o crescimento da partícula: partículas de 2 a 4 µm de diâmetro a 1315°C crescem à faixa de 7 a 15 µm quando a temperatura chega a 1400°C. A presença de ultrafinos é, portanto, fator importantíssimo para a melhoria das propriedades das pelotas.

Rosière *et al.* (1996) estudaram a influência das características mineralógicas e texturais dos minérios de ferro nos processos metalúrgicos e de beneficiamento. Concluíram que tanto a mineralogia quanto o arranjo dos cristais no minério de ferro são de grande importância na degradação durante a redução a baixas temperaturas, crepitação e redutibilidade, grau de metalização e características de amolecimento e fusão. Concluíram, também pela importância da ‘trama’ na geração de finos durante o tratamento e transporte do minério e alertaram para indispensabilidade do conhecimento da estrutura geológica do depósito, associando-se às microestruturas desenvolvidas como forma de controlar estes parâmetros de maneira a se obter produtos que atendam as necessidades das usinas.

A CVRD iniciou, em 2000, um estudo visando conhecer características intrínsecas dos minérios de ferro utilizados na produção de pelotas e correlacioná-las

com seu comportamento nas principais operações unitárias das usinas de pelotização. Neste estudo selecionaram-se os diferentes minérios das principais jazidas da CVRD (SILVA *et al.*, 2003). Das amostras estudadas, chegaram a uma padronização da nomenclatura das principais morfologias que participam nos minérios que alimentam a pelotização, as quais estão apresentadas na tabela 4.

Tabela 4 – Principais morfologias dos minérios que alimentam a pelotização na Companhia Vale do Rio Doce – CVRD

TIPO	CARACTERÍSTICAS	FORMA/TEXTURA	ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA
MAGNETITA	<ul style="list-style-type: none"> - Cristais euédricos, isolados ou em agregados. - Cristais compactos. 		
MARTITA	<ul style="list-style-type: none"> - Hematita com hábito de magnetita. - Oxidação segundo os planos cristalográficos da magnetita. - Geralmente porosa. 		
HEMATITA LOBULAR	<ul style="list-style-type: none"> - Formatos irregulares, inequidimensionais. - Contatos irregulares, geralmente imbricados. 		
HEMATITA GRANULAR	<ul style="list-style-type: none"> - formatos regulares, equidimensionais. - Contatos retilíneos e junções trípticas. - Cristais compactos. 		
HEMATITA TABULAR E HEMATITA ESPECULAR	<ul style="list-style-type: none"> - Cristais inequidimensionais, hábito tabular. - Contatos retilíneos. - Cristais compactos. 		
OXI-HIDRÓXIDOS DE FERRO (Goethita/Limonita)	<ul style="list-style-type: none"> - Material amorfo e ou criptocristalino. - Estrutura coloforme, hábito botroidal. - Textura porosa. 		 Fonte: CDM

Fonte: SILVA *et al.* (2003)

Neste trabalho, que a CVRD denomina Geosiderurgia, há uma ampla pesquisa na caracterização de seus minérios visando a obtenção de parâmetros que descrevam a estrutura interna dos mesmos, para subsidiar a otimização das características das pelotas fabricadas, podendo assim, otimizar a escolha dos minérios que serão utilizados no desenvolvimento de uma pelota nova.

Com isso, visa-se a maximização de determinadas características exigidas pelos clientes, atuando-se no planejamento da pelletização, selecionando, por exemplo, minérios não hidratados, como mostra a figura 6a, quando se objetiva uma maior resistência física das pelotas. Por outro lado, quando se necessita de elevado grau de moabilidade ou metalização, priorizam-se minérios hidratados, mostrados na figura 6b.

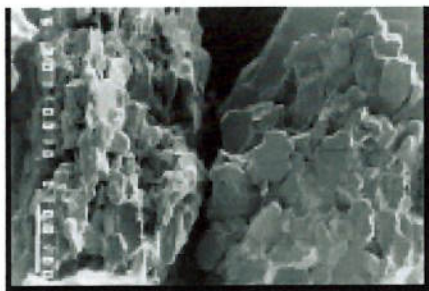


Figura 6a

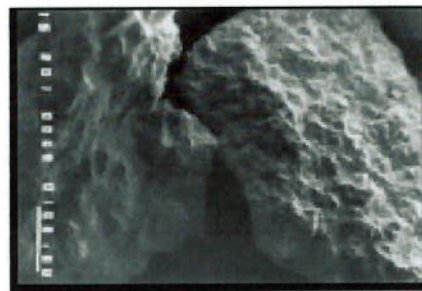


Figura 6b

Figura 6 – Minério não hidratado com grão médio (6a) e minério hidratado com grão pequeno (6b) (CARNEIRO et al., (2003))

Também na área de sinterização, estudos para a otimização vêm sendo conduzidos por Vieira et al. (2003), que fizeram uma análise crítica da metodologia empregada para verificação da técnica rotineira de avaliação de finos de minério de ferro para sinterização, tanto por parte das siderúrgicas, quanto pelas minerações brasileiras, com base apenas no controle granulométrico e químico. Sugere-se a caracterização mineralógica das partículas nucleantes, intermediárias e aderentes do *sinter feed*, visando a otimização dos processos e a melhoria da qualidade intrínseca do produto.

Vale destacar que, em muitos destes trabalhos, a caracterização foi feita pela análise microestrutural dos materiais. Por esta técnica é possível avaliar se o material foi processado de forma correta e, para isto, é importante contar com instrumentos e ferramentas de análise e caracterização que permitam obter informações qualitativas e quantitativas detalhadas sobre os mais diferentes aspectos microestruturais.

4.4 Processos de obtenção de ferro metálico

A metalurgia do ferro consiste, basicamente, na redução dos seus óxidos por meio de um redutor, em geral, um combustível carbonoso (ARAÚJO, 1967).

Segundo Souza Neto *et al.* (2001), como se pode observar na figura 7, o ferro primário é produzido através de duas rotas principais até a obtenção de aço líquido:

- ✓ via alto-forno (gusa) + aciaria a base de oxigênio (conversor); e
- ✓ via reator de redução direta (ferro-esponja) + aciaria elétrica (forno elétrico).

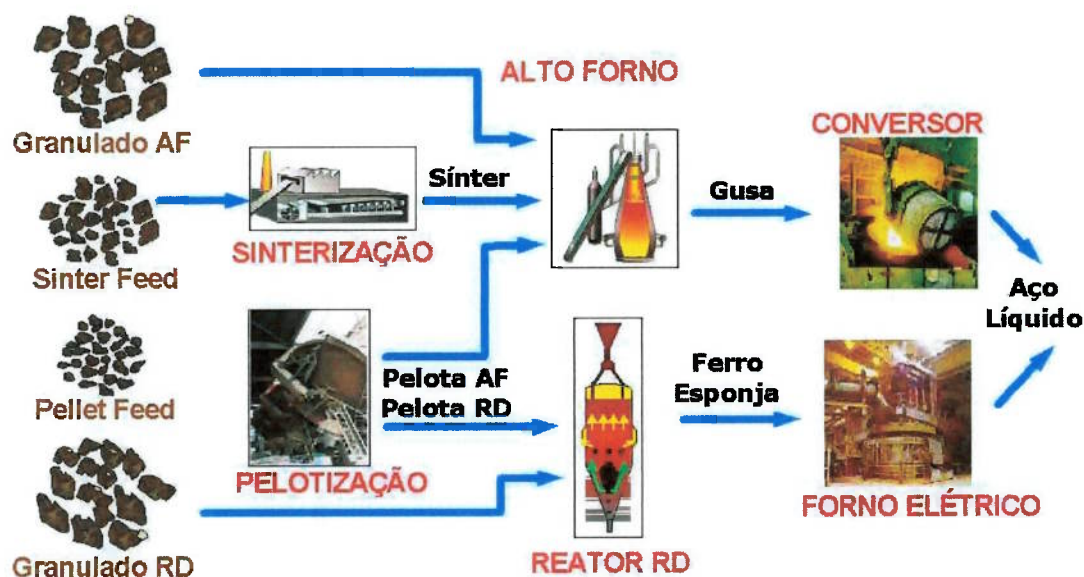


Figura 7 – Fluxo de minério de ferro na siderurgia (SOUZA NETO *et al.*, 2001)

A produção de ferro primário baseada em altos-fornos a coque está fortemente estabelecida, apresentando características técnicas e econômicas excepcionais. Desenvolvimentos recentes visam aprimorar ainda mais o desempenho da rota coqueria-sinterização-alto-forno, dentre os quais pode-se citar injeção de finos de carvão, enriquecimento do sopro com O_2 , operação com 100% de oxigênio (opção ainda muito dispendiosa), além do desenvolvimento de novos processos de aglomeração e coqueificação, mais flexíveis em relação às matérias primas e menos danosos ao meio ambiente (MOURÃO, 2002).

Os altos-fornos, em sua configuração clássica, são equipamentos característicos das empresas siderúrgicas integradas, destinados a produzir gusa em estado líquido a uma temperatura em torno de $1500^{\circ}C$. São estruturas de aproximadamente 100 metros de altura e 13 metros de diâmetro, construídas com chapas de aço e revestidas internamente com materiais refratários.

O alto-forno tem duas funções essenciais: em primeiro lugar, o oxigênio combinado com o ferro do minério deve ser removido e, isto é possível, pela reação química entre os óxidos de ferro e o carbono (sob a forma de coque ou carvão vegetal) que gera CO e obtém a redução do Fe. Em segundo lugar, o processo deve separar o metal assim produzido da parte restante não metálica ou ganga do minério e das cinzas do coque, o que se dá pela fusão da carga, sendo que a escória incorpora os componentes indesejáveis e flutua sobre o metal fundido (TAMBASCO *et al.*, 1976).

As principais zonas internas do alto-forno, segundo Quites (2001), são apresentadas na figura 8, quais sejam:

- zona granular: nesta zona o minério e o coque mantêm a sua configuração em camadas alternadas, tais como carregados. Nesta região existem apenas duas fases (gases e sólidos);
- zona coesiva: é constituída de camadas de coque e de camadas coesivas, as quais são formadas de massas semi-fundidas de partículas de minério de ferro, praticamente impermeáveis ao fluxo gasoso, que passa preferencialmente através das camadas de coque;

- zona de gotejamento: esta região contém coque na forma sólida, em cujos interstícios gotejam o gusa e a escória. Durante a descida das gotas de gusa para o cadinho acontecem importantes reações que incorporam os elementos de liga ao gusa;
- zona de combustão: é uma região parcialmente vazia em frente às ventaneiras, devido à elevada energia cinética do sopro de ar quente. À medida que as partículas de coque circulam, vão sendo queimadas, gerando gás redutor e energia; e
- cadinho: é preenchido com coque granulado, por cujos interstícios se depositam o gusa e a escória, que se separam em duas camadas por diferença de densidade. No cadinho ainda ocorrem importantes reações entre as fases metálicas e escorificada, tais como a dessulfuração do gusa.

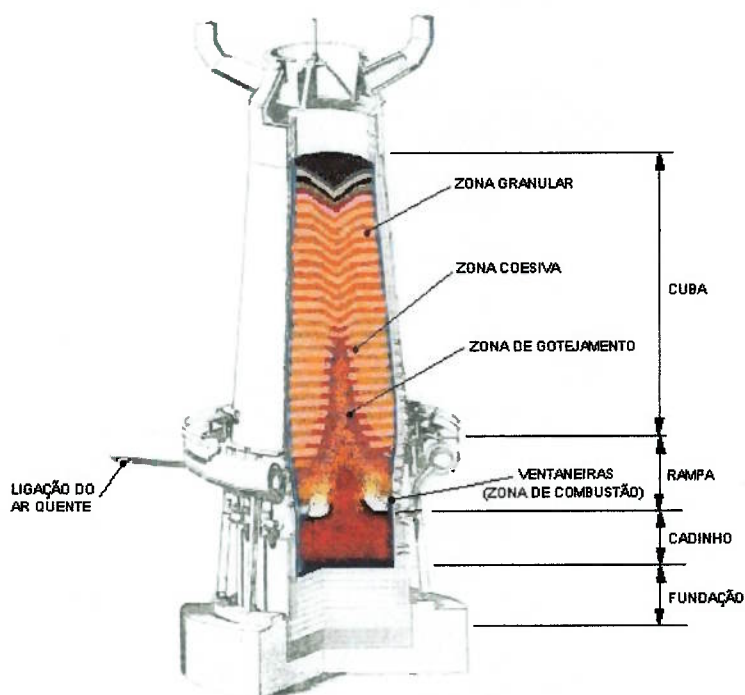


Figura 8 – Corte esquemático de um alto-forno e zonas internas – adaptada de ARAÚJO (1967) e QUITES (2001)

No alto-forno, a redução dos óxidos de ferro se processa à medida que o minério, o agente redutor (coque ou carvão de madeira) e os fundentes (calcário ou dolomito) descem em contra corrente em relação aos gases, provenientes da queima de carbono com o oxigênio do ar quente soprado pelas ventaneiras, localizadas perto da base da coluna da carga. A carga vem descendo no interior do forno, enquanto os gases resultantes da queima do redutor na altura das ventaneiras, ao ascenderem através da coluna de carga, reduzem o minério e pré-aquecem os materiais. Durante o aquecimento, a composição dos componentes da mistura vai se alterando (secagem e calcinação) até se realizarem as reações de redução, quando o oxigênio, combinado com o ferro do minério e passa a fazer parte dos gases, sob a forma de óxido de carbono. O processo de redução é acompanhado de outras reações químicas, como a formação de carbonetos e fusão da ganga e dos fundentes para a formação de escória (ARAÚJO, 1967).

Souza Neto et *al.*, (2001) citam que para serem alimentados no alto-forno, os minérios ou carga metálica (*sinter*, pelota e granulado) devem possuir uma série de qualidades - químicas, granulométricas e metalúrgicas - que são ditadas pelas metas operacionais (produtividade e consumo de combustível) e de qualidade do gusa e escória a serem produzidos. As especificações de qualidade do gusa, por sua vez, são ditadas pela aciaria.

Como já mencionado, a avaliação de resistência antecede a entrada do minério no forno, pois o granulado, pelota e *sinter* têm que possuir resistência suficiente para resistir aos esforços de transporte e manuseio até este, bem como dentro do forno. A resistência das pelotas pode ser avaliada pelos ensaios de compressão ISO 4700 e tamboramento ISO 3271. O tamboramento gera dois índices, sendo um de tamboramento, que é a porcentagem de material retida na malha 6,30 mm e outro de abrasão, porcentagem de material passante na malha 0,50 mm. Uma pelota, tratada termicamente, com valores apropriados para exportação deve apresentar resistência à compressão maior que 280 kgf/pel e índice de abrasão menor que 5%.

Ainda segundo Souza Neto et *al.*, (2001), as demais especificações de qualidade dizem respeito ao desempenho do minério dentro do alto-forno.

O alto-forno é um reator que funciona em regime de contra-corrente, isto é, a carga sólida (minério+coque) é alimentada no topo e desce em direção ao cadinho; no percurso vai sendo gradativamente aquecida pelos gases redutores, que são produzidos na parte inferior do forno e ascendem em direção ao topo.

Os gases são produzidos na “zona das ventaneiras”, em reação de combustão do coque pelo ar (O_2); este é injetado já pré-aquecido e enriquecido com oxigênio e vapor de água. A temperatura de combustão é da ordem de $2000^\circ C$. Os gases redutores são essencialmente monóxido de carbono e hidrogênio, diluídos em nitrogênio (este é neutro e oriundo do ar usado na combustão do coque). Ao ascenderem em direção ao topo do alto-forno, os gases fluem através da carga, transferem calor para a mesma, removem o oxigênio quimicamente ligado ao ferro (redução dos óxidos de ferro) e saem do forno com temperatura na faixa de 120 a $200^\circ C$ (SOUZA NETO, *et al.*, 2001).

Por sua vez, a carga sólida em movimento descendente tem sua temperatura elevada à medida que vai tendo contato com gases cada vez mais quentes. Assim, a primeira exigência para a carga é que ela forme um leito permeável à passagem dos gases, surgindo daí a exigência para a distribuição granulométrica do concentrado de minério de ferro.

Souza Neto *et al.* (2001) descrevem que o alto-forno tem que ser alimentado com minério preponderantemente na faixa de 5 a 50 mm para que os gases possam fluir pelo leito formado. Abaixo de 5 mm, o material fino bloquearia ou dificultaria a passagem dos gases através da carga. Acima de 50 mm, as reações com os gases seriam prejudicadas devido a reduzida área superficial.

Conforme vai descendo, a carga tem sua temperatura elevada até que começam as reações de redução do minério. A primeira reação de redução começa por volta de $400^\circ C$, quando a hematita (Fe_2O_3) inicia sua transformação em magnetita (Fe_3O_4). Como a hematita e a magnetita possuem estruturas cristalinas diferentes, nessa transformação há aumento de volume do minério e o enfraquecimento de sua estrutura que pode se desintegrar em maior ou menor grau, gerando uma quantidade de finos maior que a produzida devido à crepitação. Esse fenômeno é conhecido como desintegração sob ou devido à redução.

Na fabricação do *sinter* e da pelota há necessidade de se atuar na matéria-prima e nos parâmetros do processo de forma a atenuar sua suscetibilidade a essa desintegração. Já no caso do granulado, o que pode ser feito é alimentar o alto-forno com granulados de menor suscetibilidade à desintegração.

Daí surge a exigência de mais uma especificação de qualidade a que os concentrados devem atender, usualmente conhecida como especificação de RDI (*Reduction Desintegration Index*) ou LTD (*Low Temperature Desintegration*) do concentrado. A avaliação do RDI tem sido feita principalmente utilizando-se dois tipos de ensaios, ISO 4696-1 e ISO 4696-2. O ensaio ISO 4696-2 é o mais utilizado pelas usinas siderúrgicas do Brasil e Ásia; seu índice RDI é expresso pela quantidade de material fino (<3,15 mm) gerado no tamboramento da amostra reduzida a 550°C.

Os granulados são considerados de desintegração satisfatória quando apresentam RDI inferior a 20% e pelotas RDI menor que 14%. Todavia, tem sido muito pouco freqüente especificação de RDI para granulados.

No ensaio LTD, a redução é feita a 500°C, simultaneamente com o tamboramento da amostra. Após peneiramento, determina-se a percentagem de material retido em 6,30 mm, bem como a passante em 3,15 mm e 0,50 mm. No caso das pelotas, um resultado satisfatório de LTD é um valor superior a 80% de material retido na malha 6,3.

A medida em que o minério desce no forno e tem sua temperatura aumentada as reações de redução vão se acelerando. Idealmente, o concentrado deve atingir a chamada “zona de reserva térmica” (ZRT) já todo reduzido a FeO (wustita), que é o limite termodinâmico nas condições reinantes na região e isto depende da redutibilidade do minério. A ZRT é a região isotérmica do alto-forno em que a temperatura da carga é igual à do gás e depende da reatividade do combustível: se for alto-forno a coque a ZRT se situa entre 900 a 1000°C; se for alto-forno a carvão vegetal está por volta de 800°C. As reações de redução que ocorrem até o minério chegar a ZRT são ditas indiretas, pois se processam sem consumo de coque, às custas do CO oriundo das reações que ocorrem em temperaturas mais elevadas na parte mais baixa do alto-forno.

Por outro lado, as reações de redução de $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO}$ são termodinamicamente bem mais favoráveis do que a redução final $\text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$.

A quantidade de oxigênio por átomo de ferro a ser removida na reação $\text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$ é bem maior que nas anteriores e as ligações Fe-O a serem quebradas mais fortes. Ocorre, no entanto, que o tempo disponível para essa reação $\text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$, antes de começar o amolecimento do minério, é relativamente curto. De tudo isto, surge a necessidade de controlar mais uma importante qualidade do minério, que é sua redutibilidade, que traduz o grau de facilidade que possui o minério de perder (transferir) seu oxigênio para os gases redutores. Assim, minério de alta redutibilidade pode ser reduzido a ferro mais rapidamente que o de baixa redutibilidade. Em outras palavras, quanto mais redutível o minério, maior a probabilidade de chegar a ZRT como FeO e ao início do amolecimento com o máximo possível de Fe (ou o mínimo de oxigênio).

No caso de pelotas há mais um aspecto que deve ser avaliado durante sua redução, que é sua suscetibilidade ao inchamento. As pelotas incham ao serem reduzidas, mas há certos tipos que incham catastroficamente.

São utilizados dois tipos de ensaios para avaliar a suscetibilidade da pelota ao inchamento: um reduzindo a amostra sem colocação de carga sobre ela; e outro submetendo a amostra a pressão mecânica enquanto é reduzida.

Os ensaios de inchamento livre são mais usados na siderurgia asiática, podendo ser realizados segundo as normas ISO 4698 ou JIS M8715. Mede-se o volume das pelotas antes e depois da redução e calcula-se sua variação percentual. Pelotas devem apresentar inchamento menor que 16%.

O ensaio de inchamento sob carga mecânica é mais usado na Europa, mais particularmente na Alemanha, segundo a norma ISO 7992. Determina-se a perda de carga máxima ocorrida no ensaio (ou seja, inchamento medido por meio de seu efeito na permeabilidade do leito).

Depois de passar pela ZRT, o minério reduzido tem sua temperatura elevada à medida que desce no forno até atingir sua temperatura de amolecimento e, mais tarde, a de fusão. Na grande maioria dos casos a temperatura é maior no centro do que na periferia do forno, porque a vazão de gás no centro é maior. Isto faz com que o amolecimento do minério ocorra primeiro no centro e depois (mais abaixo) nas paredes. Uma vez amolecido, o minério se torna mais “plástico” e assim dificulta a passagem dos gases. Essa é a região do forno em que há maior dificuldade para

escoamento dos gases ou de maior perda de carga. Por isto, o ideal é que o diferencial entre a temperatura de início de amolecimento e a de início de fusão seja o menor possível. Isto é prejudicado quando o concentrado apresenta baixa redutibilidade, pois teor significativo de FeO (por redução incompleta do minério) aumenta a espessura da zona de amolecimento. Por outro lado, no caso de *sinter* e pelota há possibilidade de se interferir no seu comportamento, em especial produzindo-os com basicidade e teor de MgO para favorecer o retardamento do início do amolecimento (e aumentar o tempo para redução completa do concentrado) ou para diminuir a espessura da zona de amolecimento.

Não há ensaio normalizado pela ISO ou por outro organismo de normalização para avaliar comportamento de minérios quanto ao amolecimento. Os ensaios existentes são particulares de cada usina (usados para estudos) e os resultados variam conforme o procedimento utilizado.

Após o amolecimento, vem a fusão do concentrado. A escória e ganga (inclusive do coque) se fundem antes do ferro. Os dois gotejam pelo leito de coque (chamado “homem-morto”) e são recolhidos no cadinho. Ao passar pelo leito de coque, o ferro se enriquece de carbono (carburação) dando origem ao gusa que, grosso modo, é constituído de Fe (95%), C (4%) e Si (1%) e outros elementos. Todo este processo só será bem conduzido se escória e gusa apresentarem composição química adequada. Daí as razões principais para especificações de composição química da carga alimentada no alto-forno.

O volume e composição química da escória e gusa dependem diretamente da composição química da carga (*sinter*, pelota, granulado, adições e cinzas do coque). Assim, a carga deve apresentar composição tal que propicie a produção de escória com:

- fluidez adequada para gotejar livremente através do leito de coque, para favorecer as reações gusa-escória que ocorrem no cadinho e para ser escoada para fora do cadinho;
- composição química – teores de CaO/SiO₂, %Al₂O₃ e %MgO - e volume adequados para remover os elementos deletérios do gusa, especialmente enxofre (dessulfuração) e álcalis;
- volume mais baixo para reduzir o consumo de combustível, o custo de descarte (em especial quando não comercializada como subproduto para a

indústria cimenteira) e para favorecer a operação dos altos-fornos que injetam alto volume de carvão pelas ventaneiras; e

- produção de gusa com teores de Si, Mn, Ti e elementos deletérios dentro das especificações acordadas com a aciaria.

Desta forma, tendo a siderúrgica adquirido pelota e granulado da indústria mineradora e estabelecido sua percentagem na carga do alto-forno, cabe à sua usina de sinterização produzir o *sinter* com a composição química, volume e comportamento metalúrgico compatíveis com as necessidades do alto-forno.

Segundo Mourão (2002) apesar das enormes vantagens apresentadas pela rota tradicional (alto-forno) há um esforço no sentido de se desenvolverem processos alternativos de obtenção de ferro e aço. Este esforço é estimulado por algumas características intrínsecas do processo clássico que podem impedir ou inviabilizar a sua aplicação dentro de certas circunstâncias, tais como alta escala de produção (maior que 1,5 milhões toneladas por ano), necessidade de aglomeração do minério, necessidade de coque metalúrgico, degradação ao meio ambiente.

De acordo com o autor supracitado, atualmente, além dos altos-fornos a coque, ferro primário é obtido em escala industrial por processos de redução direta, sendo que, os mais bem sucedidos, são baseados no uso de gás natural como fonte de redutor e combustível.

Conforme Tolentino (2004)², no caso da CVRD, por exemplo, do total de aproximadamente 24 milhões de toneladas por ano de pelotas produzidas, cerca de 7 milhões de toneladas são para redução direta, sendo que deste total, 1,5 milhões de toneladas são pelotas confeccionadas com aglomerante orgânico.

Entendem-se por processos de redução direta aqueles nos quais a redução do minério de ferro a ferro metálico é efetuada sem que ocorra, em nenhuma fase do processo, a fusão da carga do reator, sendo o produto obtido na fase sólida e denominado ferro-esponja, que em geral são reprocessados em fornos elétricos para obtenção de aço.

Os processos de redução direta são, em geral, mais exigentes quanto às características de carga que os altos-fornos e, assim, é necessário ajustar as condições

² TOLENTINO, J. J. R. Pelotas com aglomerante orgânico. [Mensagem pessoal]. Mensagem recebida por: <sandralm@ipt.br> em 7 de jan. 2004.

de fabricação das pelotas para que estas atendam ao desejado. Há, naturalmente, diferenças sensíveis nas exigências desses fornos, o que explica o fato de cada processo ter sua própria especificação para as pelotas.

Os concentrados necessários à produção de pelotas, principalmente às destinadas aos fornos de redução direta, têm limite admissível muito baixo de impureza. De acordo com Mourão (1986), nos processos de redução direta, a reação química básica consiste na remoção de oxigênio, não havendo a ocorrência de fusão e nem de refino e toda a ganga e impurezas permanecem no produto reduzido. Neste ínterim, o minério deve apresentar o maior teor de ferro possível e um nível muito baixo de ganga e impurezas para atender aos requisitos da aciaria. Com a eliminação do oxigênio do minério, há um aumento no teor de ferro, ganga e elementos deletérios no ferro-esponja. Uma quantidade excessiva de ganga, principalmente $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$, prejudica o desempenho dos fornos elétricos a arco, o que se dá pelo aumento do volume de escória. Este fato gera maiores consumos de energia elétrica, de refratário, de eletrodo e, conseqüentemente, um aumento nos custos do aço produzido.

Segundo Moraes et al. (1996), no caso da Samarco Mineração para utilização de pelotas no processo de redução direta, os seguintes tens devem ser considerados:

- o Fe total deveria ser tão alto quanto possível, sendo de preferência com um mínimo de 67%;
- a ganga ácida como sílica e alumina deveria ser mantida num limite máximo de 2,2%. Alguns processos aceitam um limite de até 3,0%;
- as porcentagens de CaO e MgO são geralmente determinadas pelas características da escória, sendo que valores de até 2,0% para CaO e 1,0% para MgO são aceitáveis na pelota;
- o limite de fósforo no gusa ou no ferro-esponja depende do tipo de aço a ser produzido e da técnica empregada na fabricação destes. Valores de até 0,040% de P na pelota são aceitáveis, porém algumas usinas aceitam até 0,045%;
- o conteúdo de enxofre deve ser o menor possível; e
- elementos como titânio devem ser controlados, sendo o limite de 0,15%.

Como já mencionado, é grande a diversidade de especificação técnica de pelotas produzidas atualmente, as quais são ditadas pela aciaria. Resumidamente, são apresentadas na tabela 5, algumas especificações técnicas de pelotas comercializadas pela Samarco Mineração (2004).

Tabela 5 – Algumas especificações técnicas de pelotas comercializadas pela Samarco Mineração

Parâmetros	Pelota para redução direta			Pelota para alto-forno				
	Padrão	Alto teor de MgO	Basicidade alta	Padrão	Basicidade alta	Basicidade média		
Análise química	Fe	67,9	67,9	67,8	66,8	66,2	67,31	
	FeO	0,15	0,15	0,15	0,14	0,15	0,16	
	SiO ₂	1,25	1,25	1,22	2,00	2,11	2,02	
	Al ₂ O ₃	0,45	0,45	0,45	0,45	0,47	0,45	
	CaO	0,8	1,0	0,9	0,66	2,2	0,88	
	MgO	0,09	0,35	0,1	0,16	0,22	0,12	
	P	0,039	0,039	0,04	0,048	0,048	0,048	
	S	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002	0,001	
	Basicidade (CaO/SiO ₂)	0,60	0,6	0,72	1,32	1,0	0,30	
Análise física	Distribuição de tamanho (%)	+16 mm	8,0	8,0	-	8,5	8,5	8,5
		-16+8 mm	88,0	88,0	-	87,0	88,0	88,0
		-6,3 mm	2,0	2,0	-	2,0	2,0	2,0
	Resistência à compressão (-16 +12,5 mm) (kgf/pel)	300	300	300	300	260	280	
	Índice de tamboramento (%)	+ 6,3 mm	93,5	-	93,5	93,5	93,5	93,2
-0,5 mm		5,6	-	5,6	5,8	5,6	5,8	
Análise metalúrgica	Grau de metalização a 760° (%)		96	-	96	-	-	-
	LTD	+ 6,3 mm	-	-	-	86,0	83,0	80,0
		-0,5 mm	-	-	-	10,0	12,0	11,0
	Inchamento (%)		-	-	-	15	-	-
Redutibilidade relativa (%)		-	-	-	77,0	77,0	67	

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho contou com o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP e os ensaios foram realizados no Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S/A – IPT.

5.1 Amostras de concentrado de minério, aditivos e aglomerantes

Foram ensaiadas diferentes amostras de concentrado de minério de ferro, originárias do processo, cedidas pela Companhia Vale do Rio Doce - CVRD e pela Samarco Mineração, quais sejam:

1. “pellet feed” para redução direta, mina de Germano - Samarco Mineração;
2. concentrado de minério de ferro SPL-1, mina de Carajás - CVRD; e
3. mistura de minérios para redução direta (RM-15), Vitória-ES - CVRD.

A mistura de minérios RM-15 é composta dos concentrados: PECA de Itabira (60,42%), PFCM de Capanema (20,18%) e SPL-1 (16,68%), adicionada de calcário dolomítico (1,43%) e antracito (1,29%).

✓ Aditivos e aglomerantes

Nos ensaios de pelletização foram utilizados os aditivos calcário e antracito, ambos fornecidos pelas pelletizadoras, dos quais determinou-se a umidade, uma vez que são utilizadas concentrações em massa para o cálculo das composições a pelletizar.

O trabalho foi desenvolvido utilizando-se os aglomerantes bentonita e orgânico (*Peridur*), os quais foram encaminhados pelas mineradoras juntamente com as amostras de minério e aditivos. Determinou-se, também a umidade da bentonita para o cálculo das composições a pelletizar. Os valores de umidade dos aditivos cedidos por mineradora, bem como da bentonita e demais informações constam da tabela 6.

Tabela 6 – Valores de umidade e demais informações dos aditivos e da bentonita

		Amostra	Umidade (%)	Análise química											
				Fe _t	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn	PPC (%)	CaO	MgO	TiO ₂	Carbono fixo	Cinzas	CMC
Aditivos	CVRD	Calcário	0,2	0,45	2,71	0,5	0,02	0,01	42,9	39,5	12,9	0,05	-	-	-
		Antracito	1,3	-	33,3	23,2	0,14	0,07	88,8	1,24	0,44	0,90	71,6	11,2	-
	Samarco	Calcário	0,3	-	4,6	-	n.d.	n.d.	40,8	49,4	5,35	-	-	-	-
		Antracito	2,8	4,5	46,8	29,2	n.d.	n.d.	-	6,7	2,3	1,5	71,0	17,3	-
Agglomerantes	CVRD	Bentonita	10,7	-	49,0	16,3	0,10	0,1	8,2	1,06	2,73	-	-	-	-
		<i>Peridur</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50% min
	Samarco	Bentonita	10,7	6,5	59,5	15,9	n.d.	n.d.	6,5	1,3	2,7	1,0	-	-	-
		<i>Peridur</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50% min

5.2 Homogeneização e redução de massa das amostras

A homogeneização e redução de massa das amostras foram realizadas pelo método de pilha prismática, com retomada de 3 vezes e redistribuição das pontas da última distribuição, da qual foram tomadas alíquotas para os ensaios de caracterização das amostras e para realização dos ensaios de pelotização.

5.3 Ensaios de caracterização das amostras de concentrado de minério de ferro

5.3.1 Análise granulométrica

As análises granulométricas das amostras de concentrado foram realizadas por peneiramento exaustivo a úmido nas malhas da série Tyler 100 (0,149 mm), 200 (0,074 mm), 270 (0,053 mm), 400 (0,037 mm) e análise granulométrica em aparelho de espalhamento de laser marca *Marlvern* modelo *Mastersizer 2000*.

5.3.2 Determinação da umidade, densidade real e análise química

A umidade de cada um dos concentrados de minério de ferro foi realizada por secagem em estufa até peso constante e a determinação da densidade real das amostras foi realizada pelo método de picnômetro.

As amostras de concentrado de minério de ferro foram, ainda, classificadas quanto à composição química, compreendendo a determinação dos teores de ferro (Fe_2O_3), sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), óxido de cálcio (CaO), óxido de magnésio (MgO), óxido de fósforo (P_2O_5) e óxido de manganês (MnO) e perda ao fogo. Estas determinações foram realizadas por fluorescência raios-X e via úmida tradicional.

5.3.3 Análise mineralógica

Nos concentrados de minério de ferro, foram identificados os minerais (ou fases) por difração de raios-X e complementada por microscopia óptica em fotomicroscópio da marca Zeiss.

5.4 Ensaio de pelotização

Os ensaios de pelotização foram conduzidos em escala de bancada com alíquotas de 5 kg (base úmida), utilizando-se o disco de pelotização marca Lurgi, apresentado na figura 9, de 1,2 m de diâmetro, rodando a 17 rpm e com inclinação de 46° em todos os ensaios.

Foram realizados ensaios de pelotização com cada concentrado de minério, com a seguinte composição:

- ✓ concentrados puros (adicionando-se apenas água);
- ✓ concentrados + bentonita;
- ✓ concentrados + *Peridur*;
- ✓ concentrados + bentonita + aditivos (calcário e antracito);
- ✓ concentrados+ *Peridur* + aditivos (calcário e antracito).



Figura 9 – Disco de pelotização utilizado nos ensaios

A mistura dos componentes a pelotizar foi sempre realizada em misturador de laboratório tipo *Sympson Mix Muller*, apresentado na figura 10.

A composição de cada mistura é dada em concentração em massa percentual por componente, base seca.

A adição utilizada de cada aglomerante e aditivos foi a padrão para cada concentrado minério de ferro, conforme os trabalhos de otimização desenvolvidos pelas pelotizadoras, as quais são apresentadas na tabela 7. O *Peridur* foi sempre adicionado em pó, como é prática corrente na indústria e, quando da sua utilização, adicionou-se soda cáustica (NaOH) em solução (50%) ao concentrado, conforme instruções das pelotizadoras.

No caso dos ensaios realizados com o “pellet feed” da Samarco, adicionou-se, também, soda cáustica (NaOH) em solução (50%) quando se utilizou a bentonita, como se faz na prática industrial³.

A mistura de minérios RM-15 foi fornecida já com os aditivos (calcário e antracito). Neste caso, os ensaios de pelotização com este concentrado foram realizados apenas nas composições, concentrado+bentonita+aditivos e concentrado+*Peridur* +aditivos.

³ FERREIRA, P. Dosagem de insumos. [Mensagem pessoal]. Mensagem recebida por: <sandralm@ipt.br> em 11 de jun. 2003.

Tabela 7 – Adição dos aditivos e dos aglomerantes

Aditivo/Aglomerante	Adição (%)		
	Samarco	SPL-1	RM-15
Calcário	1,43	1,30	1,43
Antracito	1,39	1,35	1,30
Bentonita	0,40	0,49	0,49
<i>Peridur</i>	0,035	0,40	0,40
NaOH (solução 50%)	0,02	0,02	0,02

**Figura 10 – Misturador de laboratório tipo *Sympson Mix Müller***

Após a mistura dos componentes a pelotizar, procedeu-se a desagregação do produto homogeneizado, através de peneiramento na malha Tyler 9 (2,0 mm), como apresentado na figura 11. Retirou-se amostra e determinou-se a umidade do material desagregado.

As pelotas obtidas, imediatamente após a pelotização (chamadas na prática industrial de “verdes”), foram amostradas diretamente do disco de pelotização para a determinação da umidade por secagem até peso constante. Em seguida, o lote de pelota foi retirado do disco e submetido a peneiramento manual nas malhas 11,2 e 12,5 mm. As pelotas retidas na malha 12,5 mm e passante na malha 11,2 mm foram descartadas. As pelotas obtidas na faixa de 11,2 a 12,5 mm foram submetidas aos ensaios de caracterização detalhados no item 5.4.1, os quais foram realizados segundo normas adotadas pela CVRD, descritas neste mesmo item.



Figura 11 – Desagregação do material homogeneizado a pelotizar

5.4.1 Ensaios de caracterização das pelotas conforme procedimento adotado pela CVRD

As pelotas obtidas nos ensaios foram submetidas aos seguintes ensaios:

a) determinação da resistência a quedas repetidas da pelota “verde”

De cada lote de pelotas obtido na faixa de 11,2 a 12,5 mm, 10 pelotas foram amostradas aleatoriamente e, uma após a outra, deixadas cair livremente de uma altura de 45 cm sobre uma plataforma de aço com haste (figura 12) até o aparecimento da primeira fissura. O número de quedas suportado por pelota foi anotado e a média aritmética destes valores expressou o resultado do ensaio, em número de quedas por pelota, adotando como padrão o número de quedas necessário para surgir a fissura, ou seja, se a pelota fissurou na primeira queda o valor será 1.



Figura 12 - Plataforma de aço usada para determinação do número de quedas

b) resistência à compressão

- Pelota “verde”

De cada lote de pelotas obtido na faixa de 11,2 a 12,5 mm, 10 pelotas foram amostradas aleatoriamente e, uma após a outra, foram submetidas à compressão em prensa automática até a ruptura. Neste momento, a carga foi registrada e a média aritmética dos valores representou o resultado do ensaio em kgf/pelota.

- Pelota seca

Este ensaio é similar ao realizado com a pelota “verde”, diferenciando-se no fato de que as 10 pelotas foram secadas em estufa à temperatura de 105°C por 90 minutos. Após resfriamento ao ar por 15±2 minutos, as pelotas foram submetidas ao ensaio de compressão e o resultado expresso em kgf/pelota.

c) determinação da resistência ao choque térmico

Do lote de pelotas “verdes” obtido na faixa de 11,2 a 12,5 mm, foram amostrados, aleatoriamente, grupos de 15 pelotas cada. Em seguida, cada grupo, um após o outro, foi submetido à ação de ar quente em mufla, apresentada na figura 5, à temperatura de 300°C, 500°C, 700°C e 900°C com tempo de permanência de 10 minutos em cada temperatura. Após este tempo, deixou-se esfriar ao ar e foram amostradas 10 pelotas aleatoriamente, nas quais foram medidas a resistências à compressão. Nesta fase avaliou-se, também, a porcentagem de pelotas que trincaram por choque térmico.



Figura 13 – Forno tipo mufla utilizado nos ensaios de choque térmico

5.4.2 Tratamento térmico das pelotas (“Queima”)

O tratamento térmico das pelotas foi realizado em forno tipo mufla (figura 13), nas condições apresentadas na tabela 8. Este ensaio não é o padrão usualmente adotado pelas pelletizadoras, mas foi realizado visando obter informações preliminares do comportamento das pelotas “queimadas”.

Tabela 8 – Condições dos ensaios de tratamento térmico

Série	Pelota	Temperatura (°C)	Permanência em 1350°C (min)	Tempo total de queima (min)
1	Verde	25 a 1350	15	230
2	Seca	25 a 1350	15	230
3	Seca	1350	15	15

Cada ensaio de tratamento térmico compreendia a colocação de 15 pelotas em cadinhos de cerâmica (copela), em seguida a inserção dos mesmos no forno com auxílio de tenaz e, findo o tempo estipulado de permanência, os mesmos eram retirados e deixados esfriar ao ar. As pelotas “queimadas” assim obtidas foram avaliadas quanto ao número de trincas e/ou explosões e quanto a resistência à compressão. Os ensaios foram conduzidos em três séries, a saber:

- Série 1 – consistiu em realizar um ensaio a partir da pelota verde, inseri-la no forno desligado e, em seguida, ligá-lo até atingir a temperatura de 1350°C, permanecendo nesta temperatura por 15 minutos;
- Série 2 – realizou-se o mesmo procedimento adotado na Série 1, diferenciando-se pelo fato de que se partiu da pelota seca a 105°C e resfriada ao ar;
- Série 3 – os ensaios foram realizados com as pelotas secas, porém colocadas diretamente no forno à temperatura de 1350°C, permanecendo nesta temperatura por 15 minutos.

A resistência à compressão das pelotas foi determinada em Máquina Universal de Ensaio marca EMIC modelo DL 2000, apresentada na figura 14, com célula de carga de 100 N (~10 kgf), no caso das pelotas verdes e secas e com célula de carga de 20 kN (~2000 kgf) no caso da pelota “queimada”. A velocidade de deslocamento em todos os ensaios foi 20 mm/s.

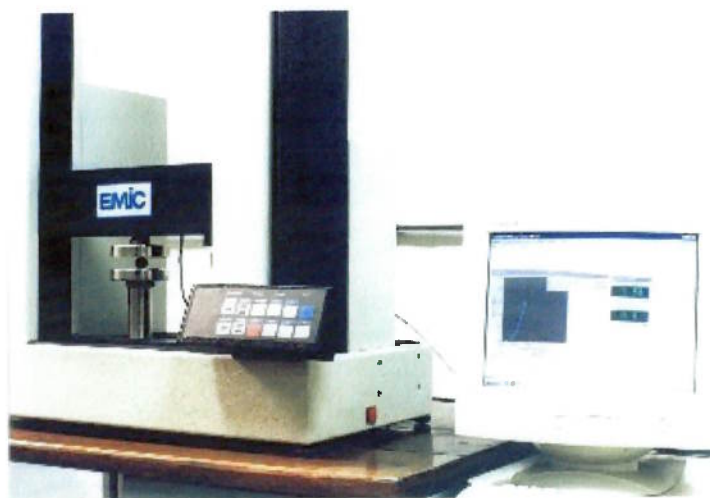


Figura 14 – Máquina Universal de Ensaio para ensaios de resistência à compressão

6. RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados dos ensaios estão apresentados nos itens seguintes e serão analisados comparativamente, avaliando-se a influência de cada aglomerante na qualidade da pelota para cada concentrado de minério de ferro estudado.

6.1 Ensaios de caracterização dos concentrados de minério de ferro

Foram realizadas análises granulométricas na totalidade das amostras de concentrado por peneiramento exaustivo a úmido e por espalhamento de laser. Pretendeu-se usar espalhamento de laser na totalidade das amostras e fazer a calibração do equipamento por comparação dos resultados do peneiramento exaustivo a úmido em peneiras da série Tyler. Os resultados obtidos constam das figuras 15 e 16, respectivamente.

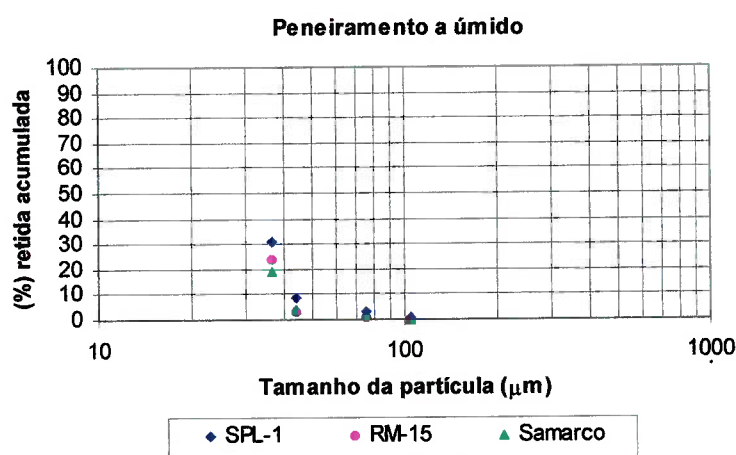


Figura 15 – Resultado da análise granulométrica por peneiramento a úmido

Os resultados obtidos pelo método de peneiramento indicam que o concentrado SPL-1 é o mais grosseiro com cerca de 31% de material retido na malha 37 μm, contra 3,8% do concentrado Samarco e 2,8% do RM-15.

Os resultados obtidos na análise granulométrica por espalhamento de laser sugerem que o concentrado mais grosseiro é o RM-15, seguido do concentrado SPL-1 e Samarco, resultados estes que se diferem dos obtidos pelo método de peneiramento. Como exposto em várias literaturas, este fato ocorre devido ao

princípio físico no qual cada método de análise é baseado, podendo chegar a resultados bem diferentes para uma mesma amostra. Desta forma, qualquer especificação granulométrica de um produto deve estar vinculada ao método de análise utilizado.

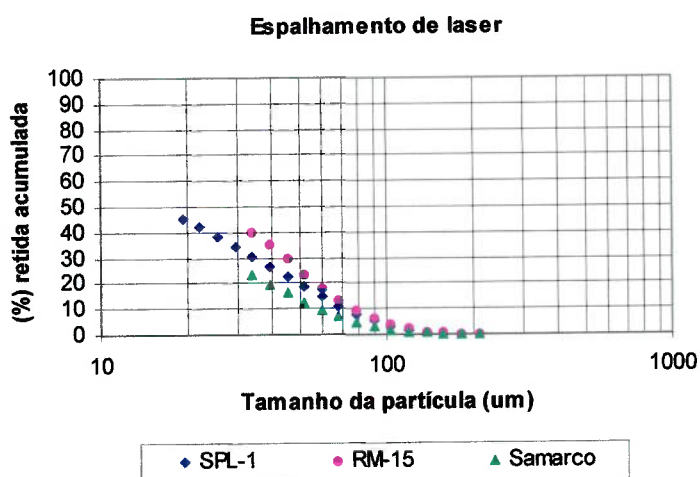


Figura 16 – Resultado da análise granulométrica por espalhamento de laser

As amostras de concentrado de minério de ferro foram caracterizadas, também, quanto a umidade, a densidade real e a composição química. Os resultados obtidos estão apresentados na tabela 9.

Tabela 9 – Resultados de análise química, umidade e densidade real

Amostra	Umidade (%)	Densidade (g/cm ³)	Óxidos							PF (%)
			Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	MnO	MgO	CaO	
Samarco	11,1	4,3	96,1	0,62	0,43	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	2,66
SPL-1	4,8	4,6	97,7	0,37	0,48	<0,10	0,31	<0,10	<0,10	1,64
RM-15	3,7	4,5	94,7	0,48	0,50	<0,10	0,11	0,22	0,55	3,04

Em relação à umidade dos concentrados, como se pode observar na tabela 7, as amostras de concentrado SPL-1 e RM-15 estavam com a umidade inferior a recomendada para a realização dos ensaios de pelotização, que é por volta de 10 a 11%, dependendo do concentrado, condição esta que foi solucionada adicionando-se água para a correção da umidade, antes da mistura dos aglomerantes e aditivos.

Os valores de densidade real obtidos para todos os concentrados foram muito próximos, variando de 4,3 a 4,6 g/cm³.

Quanto à composição química dos concentrados, os teores de Fe₂O₃ obtidos são próximos, sendo que o concentrado SPL-1 é o que apresenta o maior valor (97,7%), seguido do concentrado da Samarco (96,1%); o menor valor é apresentado pelo RM-15 (94,7%).

O concentrado que apresenta o maior teor de SiO₂ é o da Samarco, com um valor de 0,62%, seguido do concentrado RM-15 (0,48%) e SPL-1 (0,37%).

Em relação aos teores de Al₂O₃, os valores obtidos são similares para os três concentrados, em torno de 0,4%.

Quanto aos teores de P₂O₅, MnO, MgO e CaO os valores são muito baixos (<0,1%), exceto em relação ao CaO no caso do concentrado RM-15, que foi de 0,55% e do MnO, no caso do concentrado SPL-1 (0,31%).

No caso dos valores de perda ao fogo (PF), o concentrado SPL-1 é o que apresenta o menor valor (1,65%) e o RM-15 o maior valor (3,04%).

A análise mineralógica das amostras de concentrado de minério de ferro foi efetuada através do método do pó, mediante o emprego de difratômetro de raios-X, marca Philips, modelo MPD 1880. A identificação das fases cristalinas foi obtida por comparação do difratograma da amostra com o banco de dados do ICDD – International Centre for Diffraction Data (2003). Os resultados das análises mineralógicas por difração de raios-X constam da tabela 10.

O resultado da mineralogia das amostras de concentrado de minério de ferro foi analisado, também, por microscopia óptica em Microscópio marca Zeiss. Este sugere que os concentrados são constituídos, quase que na totalidade, de hematita, presença rara de goethita e magnetita, com uma pequena quantidade de ganga de quartzo.

A presença de dolomita e calcita magnesianas na amostra RM-15 se deve, provavelmente, ao fato de ter sido aditivada com calcário dolomítico.

Tabela 10 – Resultado da análise mineralógica por difração de raios-X

Amostra	ICDD	Nome do composto	Fórmula química	Mineral
Samarco	01-089-8104	Hematita	Fe_2O_3	Hematita
	00-017-0536	Goethita	$\text{Fe}^{+3}\text{O}(\text{OH})$	Goethita
	01-075-1609	Magnetita	Fe_3O_4	Magnetita
SPL-1	01-089-8104	Hematita	Fe_2O_3	Hematita
	00-003-0251	Goethita	$\text{Fe}^{+3}\text{O}(\text{OH})$	Goethita
	01-086-1340	Magnetita	$\text{Fe}_{2,980}\text{O}_4$	Magnetita
RM-15	01-089-8104	Hematita	Fe_2O_3	Hematita
	01-085-0794	Quartzo	SiO_2	Quartzo
	00-005-0622	Dolomita	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	Dolomita
	00-003-0251	Goethita	$\text{Fe}^{+3}\text{O}(\text{OH})$	Goethita
	01-086-2335	Calcita magnesiânica	$(\text{Mg}_{0,064}\text{Ca}_{0,936})(\text{CO}_3)$	Calcita magnesiânica

6.2 Ensaios de pelotização

A tabela 11 apresenta toda a série de resultados obtidos e as condições experimentais dos ensaios de pelotização. Estes resultados serão analisados a seguir, comparativamente, avaliando-se a influência de cada aglomerante na qualidade da pelota, para cada concentrado de minério de ferro estudado.

A discussão dos resultados será conduzida de maneira que, inicialmente, serão analisados os valores obtidos para cada concentrado em função do aglomerante utilizado; na sequência, comparando-se o desempenho destes para os diversos concentrados.

Tabela 11 - Resultados e condições experimentais dos ensaios de pelotização

Amostra	Ensaio	Composição (%)	Umidade (%)		Número de quedas repetidas		verde		seca		Resistência à compressão (kgf/pele)														
			desagregado	pelota	Média	σ	Média	σ	Média	σ	Média	σ	Choque térmico - 10 minutos			Tratamento térmico (1350°C)			Tratamento térmico (1350°C)						
													500°C	700°C	900°C	verde (25 a 1350°C)	seca (25 a 1350°C)	seca (1350°C)							
SANTARCO	SAM-1	Concentrado (100%)	10,2	9,8	2,2	0,6	0,8	0,3	0,1	0,8	0,1	0,6	0,1	0,3	0,1	0,4	0,1	1,0	0,2	192,6	90,0	262,9	44,3	86,1	39,5
	SAM-2	Bentonita (0,4%) + NaOH - sol. 50% (0,029%)	9,3	9,4	4,3	0,8	1,5	0,2	4,4	0,8	3,5	0,6	2,5	0,3	2,5	0,4	3,0	0,5	142,8	49,5	432,0	105,4	128,0	39,8	
	SAM-3	Bentonita (0,4%) + NaOH - sol. 50% (0,029%) Antração (1,3921%) + Calcário dolomítico (1,432%)	10,3	10,7	7,0	2,1	1,6	0,3	6,8	0,8	4,4	0,7	2,5	0,4	2,7	0,3	6,5	0,8	257,7	105,8	672,6	134,3	250,5	74,2	
	SAM-4	Periclur (0,035%) + NaOH - sol. 50% (0,029%)	10,6	10,1	4,2	1,6	1,2	0,2	3,7	0,9	2,5	0,2	0,8	0,1	0,9	0,1	2,6	0,3	174,5	64,2	372,8	36,5	241,1	66,5	
	SAM-5	Periclur (0,035%) + NaOH - sol. 50% (0,029%) + Antração (1,3921%) + Calcário dolomítico (1,432%)	10,1	10,2	6,1	2,0	1,4	0,2	4,5	0,8	2,6	0,4	0,7	0,1	0,9	0,1	3,3	0,8	331,5	123,7	687,2	123,0	178,5	77,5	
CVRD	CAR-1	Concentrado (100%)	11,7	11,3	1,6	0,5	0,3	0,1	0,5	0,1	0,4	0,1	0,5	0,0	0,8	0,1	2,9	0,8	191,8	67,9	297,7	70,3	203,4	60,4	
	CAR-2	Bentonita (0,49%)	11,7	11,4	4,7	1,6	0,7	0,1	4,4	1,1	2,8	0,5	4,3	0,9	3,7	0,3	4,1	0,9	119,9	34,5	308,9	123,8	311,4	96,5	
	CAR-3	Bentonita (0,49%) + Antração (1,33%) + Calcário dolomítico (1,3%)	11,4	11,3	8,8	2,4	0,7	0,1	4,8	1,0	3,2	0,5	4,0	0,6	5,4	1,0	12,7	2,2	203,2	105,1	507,1	131,1	218,8	62,9	
	CAR-4	Periclur (0,04%) + NaOH - sol. 50% (0,029%)	12,2	10,9	5,6	1,1	1,1	0,3	2,9	0,7	2,3	0,3	0,6	0,5	0,8	0,8	2,4	0,4	196,7	63,0	462,4	116,1	329,6	32,3	
	CAR-5	Periclur (0,04%) + NaOH - sol. 50% (0,029%) + Antração (1,35%) + Calcário dolomítico (1,3%)	10,8	10,8	8,3	2,7	1,1	0,2	2,7	0,6	2,1	0,5	0,5	0,5	0,8	0,1	4,1	0,5	234,7	82,1	580,9	96,1	205,7	69,7	
RAC-13	MIS-1	Bentonita (0,49%) + Antração (1,33%) + Calcário dolomítico (1,3%)	10,6	10,8	8,3	3,2	1,2	0,2	5,4	1,3	3,1	0,5	3,2	0,6	3,7	0,5	6,6	2,1	181,0	94,3	549,8	99,6	177,8	36,8	
	MIS-2	Periclur (0,04%) + NaOH - sol. 50% (0,029%) + Antração (1,35%) + Calcário dolomítico (1,3%)	10,5	10,1	7,9	11,6	1,5	0,2	4,7	0,9	1,8	0,4	0,7	0,1	0,7	0,2	2,9	0,5	164,1	54,5	502,1	51,6	180,6	37,3	

6.2.1 Concentrado da Samarco

A figura 17 ilustra os resultados gerais dos ensaios de pelletização obtidos com o concentrado Samarco quanto a resistência das pelotas verdes e secas.

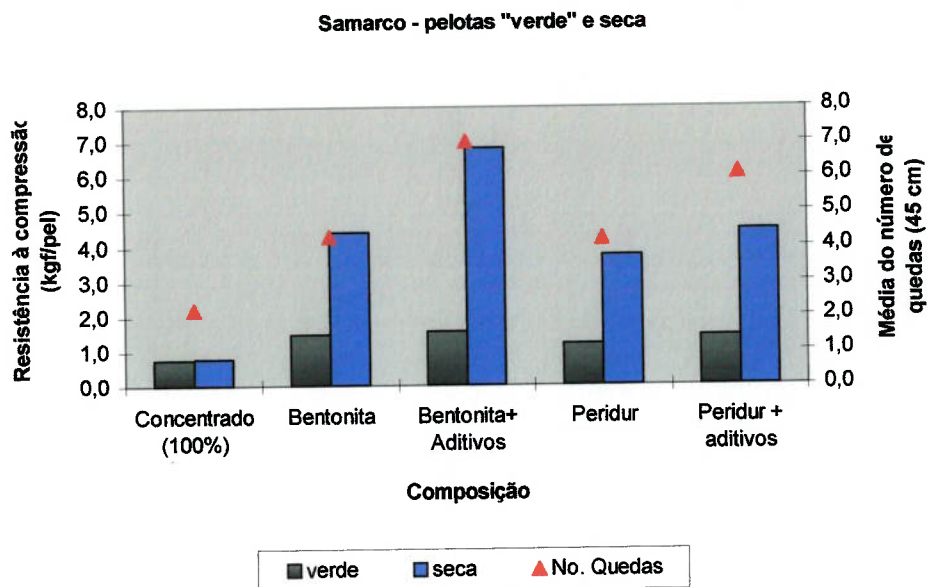


Figura 17 – Resultados obtidos com as pelotas “verde” e seca – Concentrado Samarco

Em relação aos resultados de resistência a quedas, como pode ser melhor visualizado na figura 18, o número de quedas médio suportado pela pelota é baixo quando a mesma é confeccionada sem aglomerantes e aditivos. Quando se adicionam os aglomerantes, bentonita ou *Peridur*, este valor aumenta, passando de 2,0 para um valor em torno de 4 quedas por pelota.

Ao se adicionarem os aditivos (calcário e antracito), há um considerável aumento no valor médio do número de quedas suportado pela pelota, de 4,0 para 6,0, quando da utilização do *Peridur*, e para 7,0, no caso da bentonita.

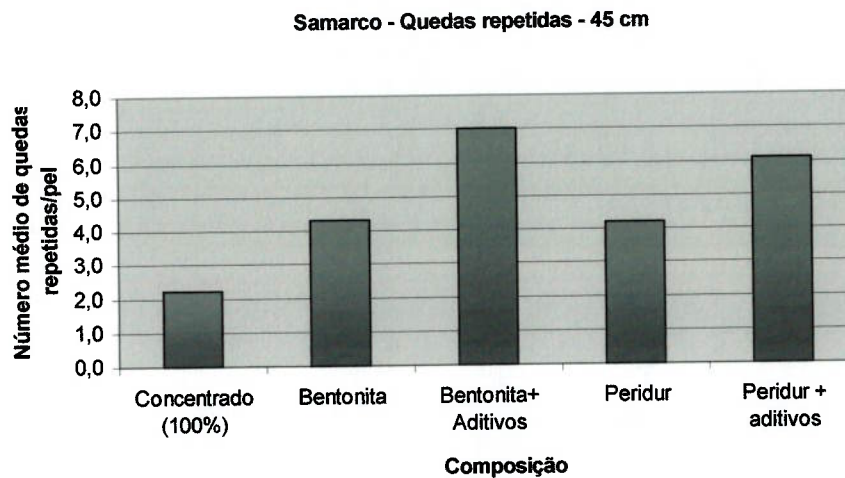


Figura 18 – Resultados de resistência a quedas – Concentrado Samarco

Em relação a resistência à compressão das pelotas verdes e secas, os resultados podem ser analisados de duas maneiras: primeiro avaliando-se os resultados obtidos com as pelotas confeccionadas adicionando-se apenas os aglomerantes em relação ao concentrado puro, como mostra a figura 19, e segundo, quando são adicionados os aditivos juntamente com os aglomerantes, como pode ser visualizado na figura 20.

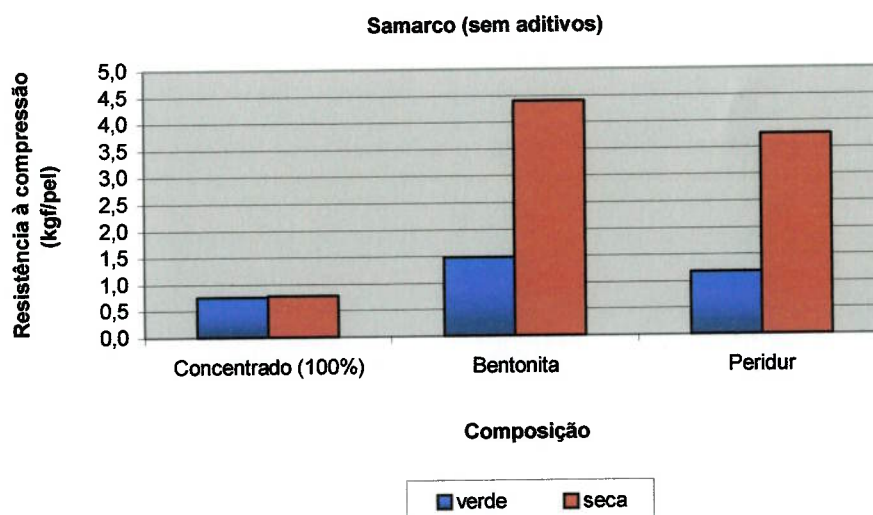


Figura 19 – Resultados de resistência à compressão sem adição de aditivos – Concentrado Samarco

A resistência média à compressão da pelota “verde” quando confeccionada apenas com o concentrado é baixa, em torno de 0,8 kgf/pel. Quando se adiciona bentonita ou *Peridur* ao concentrado, este valor passa para cerca de 1,5 e 1,2 kgf/pel, respectivamente. Em relação aos valores obtidos com a pelota seca, tem-se que quando se utiliza bentonita como aglomerante, obtém-se um valor médio de resistência à compressão de 4,4 kgf/pel, valor este superior ao obtido quando se utiliza o *Peridur* (3,7 kgf/pel) e, muito superior ao obtido com o concentrado puro.

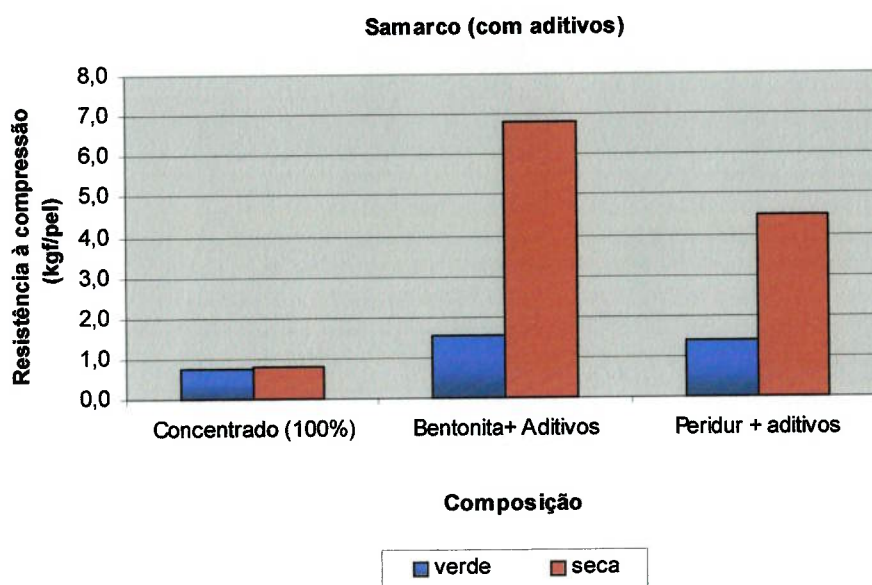


Figura 20 – Resultados de resistência à compressão com adição de aditivos – Concentrado Samarco

Os valores médios de resistência à compressão da pelota “verde” não são sensivelmente alterados quando as pelotas são confeccionadas com os aglomerantes e os aditivos. Porém, em relação a resistência à compressão da pelota seca, há um aumento significativo destes valores, passando de 3,7 para 4,5 kgf/pel, no caso do *Peridur*, e de 4,4 para 6,8 no caso da bentonita.

Os resultados dos ensaios de choque térmico podem ser visualizados na figura 21. Como se pode observar, os resultados obtidos com o concentrado puro não são satisfatórios em nenhuma temperatura, com desempenho ainda pior em 500°C e 700°C. A adição da bentonita ou do *Peridur* melhora este desempenho, porém com valores bem superiores quando se utiliza a bentonita, resultado este corroborado por Lima (1991).

Das pelotas obtidas com bentonita, 100,0% apresentaram trincas nas temperaturas de 700°C e 900°C. Já, das obtidas com *Peridur*, 8,3% apresentaram trincas na temperatura de 700°C e 16,7% na temperatura de 900°C.

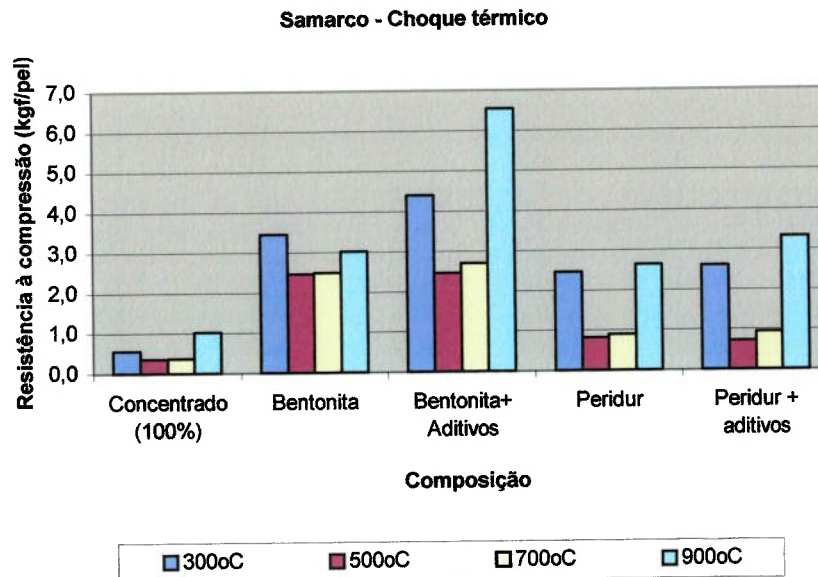


Figura 21 – Resultados de choque térmico – Concentrado Samarco

Das pelotas obtidas com os aglomerantes e os aditivos (calcário e carvão), no caso de usar bentonita, nas temperaturas de 700°C e 900°C, cerca de 47,0% apresentaram trincas. A medição de resistência à compressão foi realizada nas pelotas íntegras e trincadas e o resultado médio obtido aponta que a adição dos aditivos (calcário e carvão) melhora o desempenho quando utilizados juntamente com a bentonita, apresentando resultados muito superiores na temperatura de 900°C. Quando se utiliza o *Peridur* e os aditivos não há mudança significativa de desempenho, mas o aparecimento de trincas é menor nas mesmas temperaturas, 700°C e 900°C, sendo 8,3% e 33,0%, respectivamente.

Em se tratando dos resultados obtidos nos ensaios de tratamento térmico, os mesmos podem ser visualizados na figura 22. Em relação aos resultados da Série 1 de ensaios, ou seja, ensaios de tratamento térmico realizados com a pelota “verde” até a temperatura de 1350°C tem-se que os melhores resultados são obtidos quando são utilizados *Peridur* e aditivos.

O desempenho quando se utilizam apenas os aglomerantes, ou seja, sem os aditivos, é inferior ao obtido com apenas o concentrado, nesta série de ensaios.

A Série 2 dos ensaios foi realizada com as pelotas secas e tratadas até 1350°C. Neste caso, os melhores resultados são obtidos nos ensaios realizados com os aglomerantes juntamente com os aditivos, sendo que os valores obtidos com bentonita e *Peridur*, neste caso, são similares.

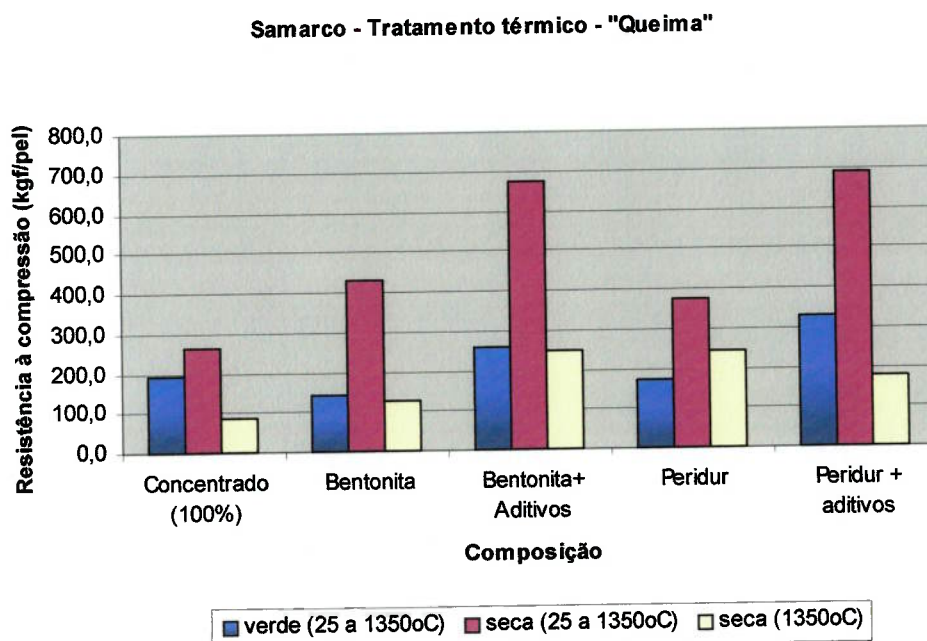


Figura 22 – Resultados dos ensaios de tratamento térmico – Concentrado Samarco

Pela Série 3, onde os ensaios foram realizados com a pelota seca tratada diretamente a 1350°C, os melhores resultados são apresentados pela bentonita adicionada juntamente com os aditivos e pelo *Peridur* sem aditivos.

De maneira geral, no caso do concentrado Samarco, os piores resultados de resistência à compressão foram obtidos no tratamento térmico realizado na Série 3.

Nos ensaios da Série 1, os resultados são um pouco superiores aos da Série 3, porém bastante inferiores aos da Série 2. Provavelmente este fato se deva à evaporação brusca da água durante a operação de queima, a qual é realizada a partir da pelota “verde”.

Os valores mais altos de resistência à compressão foram atingidos nos ensaios de tratamento térmico realizados na Série 2, talvez por ter sofrido menor ação do choque térmico, uma vez que se parte da pelota seca e inicia-se a operação de “queima” à temperatura ambiente (25°C).

6.2.2 Concentrado SPL-1

A figura 23 apresenta dos resultados obtidos nos ensaios de caracterização das pelotas “cruas” obtidas com o concentrado SPL-1.

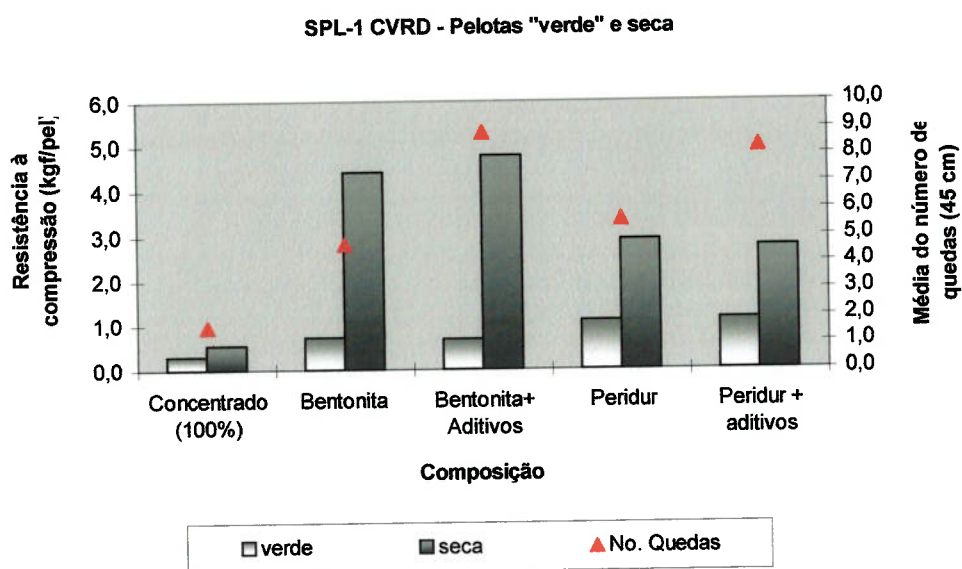


Figura 23 – Resultados obtidos com as pelotas “verde” e seca – Concentrado SPL-1

Em relação aos valores obtidos com a pelota confeccionada com o concentrado puro, tanto os que se referem à pelota “verde” quanto à pelota seca, são muito baixos, menores do que 1,0 kgf/pel. Ao se adicionar bentonita, os resultados melhoram, porém o valor médio de resistência da pelota “verde” ainda é inferior a 1,0 kgf/pel. O uso dos aditivos juntamente com a bentonita não melhora as características da pelota “verde”, porém o resultado de resistência à compressão da pelota seca é significativamente superior ao obtido quando do uso do concentrado puro, passando de um valor médio de 0,5 para 4,8 kgf/pel, similar ao obtido quando se adiciona apenas a bentonita, com um valor médio de 4,4 kgf/pel.

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão da pelota “verde” confeccionada com *Peridur* e com *Peridur* + aditivos são, 1,1 kgf/pel, e superiores ao obtidos com bentonita e bentonita + aditivos. Em relação à pelota seca, os resultados são, também, iguais a 2,8 kgf/pel, entretanto, inferiores aos obtidos com bentonita e bentonita + aditivos, que são 4,4 e 4,8 kgf/pel, respectivamente.

Quanto à determinação do número de quedas repetidas a 45 cm, os resultados podem ser melhor visualizados na figura 24.

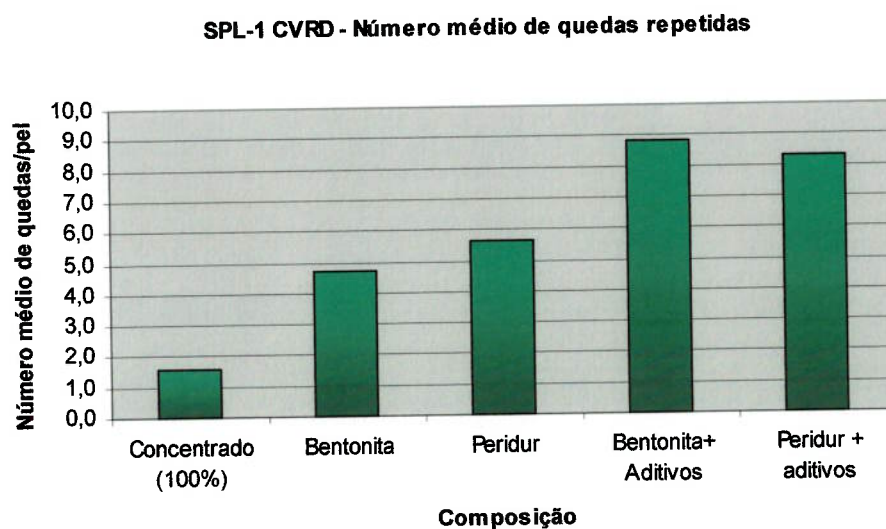


Figura 24 – Resultado da determinação do número de quedas repetidas – Concentrado SPL-1

As pelotas confeccionadas com o concentrado SPL-1 puro apresentam resistência média ao número de quedas de 1,6 por pelota. Quando se adiciona a bentonita este valor se eleva em 3,0 quedas/pel, atingindo um número de quedas por pelota de 4,7. Ao se adicionar *Peridur*, o número de quedas suportado pela pelota é superior ao obtido com bentonita, atingindo 5,6 quedas/pel.

A adição dos aditivos, juntamente com os aglomerantes, resulta em número de quedas ainda superior, tanto para a bentonita como para o *Peridur*, atingindo um valor em torno de 8,0 quedas/pel.

Os resultados da caracterização, quanto ao choque térmico das pelotas confeccionadas com o concentrado SPL-1, podem ser visualizados na figura 25.

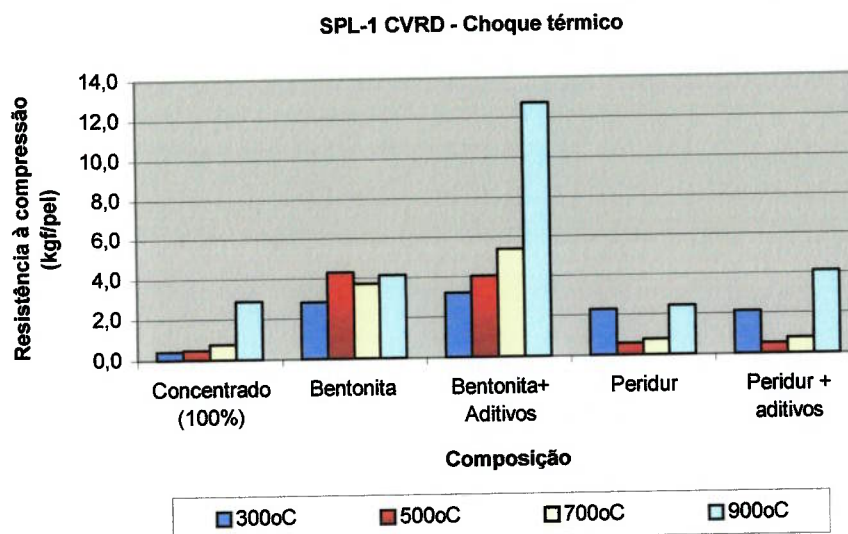


Figura 25 – Resultados do ensaio de choque térmico – Concentrado SPL-1

O desempenho das pelotas confeccionadas com o concentrado puro no choque térmico foi muito ruim, com valores médios de resistência à compressão extremamente baixos, menores do que 0,8 kgf/pel, exceto à temperatura de 900°C, na qual o resultado obtido foi de 2,9 kgf/pel, porém medido em 47% das pelotas que não explodiram. Este valor é aumentado quando se adiciona a bentonita, melhorando significativamente o desempenho em todas as temperaturas. Quando, além da bentonita, se adicionam os aditivos, há um ganho de resistência nas temperaturas de 700°C e 900°C, sendo que, nesta última, os valores passam de 4,1 para 12,7 kgf/pel. Este valor sugere que nesta temperatura começam a haver as reações de fusão e demais reações que provocam o aumento de resistência da pelota “queimada”. Nestas temperaturas, as pelotas ensaiadas, quando utilizado apenas a bentonita, apresentaram trincas em 58% e 83%, respectivamente.

O uso de *Peridur* como aglomerante com ou sem aditivos, aumenta a resistência à compressão das pelotas, apenas nas temperaturas de 300°C e 900°C, ainda assim, inferiores aos resultados obtidos com a bentonita. Já nas temperaturas de 500°C e 700°C, os resultados são equivalentes aos obtidos com o concentrado puro. Nas temperaturas de 700°C e 900°C, 100% das pelotas obtidas com *Peridur* apresentam trincas e, quando são adicionados os aditivos, a porcentagem de trincas nestas temperaturas cai para 25.

A seguir, na figura 26, são ilustrados os resultados obtidos com no tratamento térmico realizado com as pelotas confeccionadas com o concentrado SPL-1.

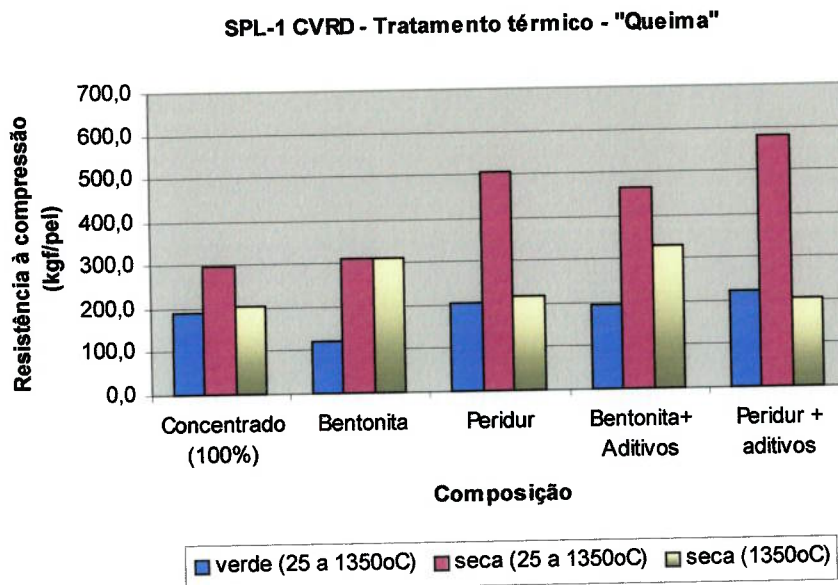


Figura 26 – Resultados dos ensaios de tratamento térmico – concentrado SPL-1

Como se pode observar na figura 25, os valores de resistência à compressão mais baixos foram apresentados no tratamento térmico realizado, conforme a Série 1, a partir da pelota verde até a temperatura de 1350°C. Nesta série, o pior resultado obtido foi com as pelotas confeccionadas com bentonita, com um valor de 120 kgf/pel. Já, para todas as outras composições, os resultados são similares, em torno de 200 kgf/pel.

Pela Série 2, que diferencia-se da Série 1 pelo fato que se parte da pelota seca, são obtidos os melhores resultados. Podem ser destacados nesta série, os resultados obtidos com as pelotas confeccionadas com *Peridur* e aditivos, seguidas das com *Peridur* e com bentonita e aditivos.

No caso da Série 3, em que o tratamento térmico é realizado com a pelota seca colocada diretamente a 1350°C, os resultados são iguais ou superiores do que os apresentados na Série 1. Os melhores resultados são apresentados pelas pelotas confeccionadas com bentonita e bentonita + aditivos, nesta série.

6.2.3 Concentrado RM-15

Como já mencionado, os ensaios com o concentrado RM-15, foram realizados apenas em duas composições, quais sejam, concentrado+bentonita+aditivos e concentrado+*Peridur*+aditivos. A figura 27 ilustra os resultados obtidos com as pelotas verde e seca.

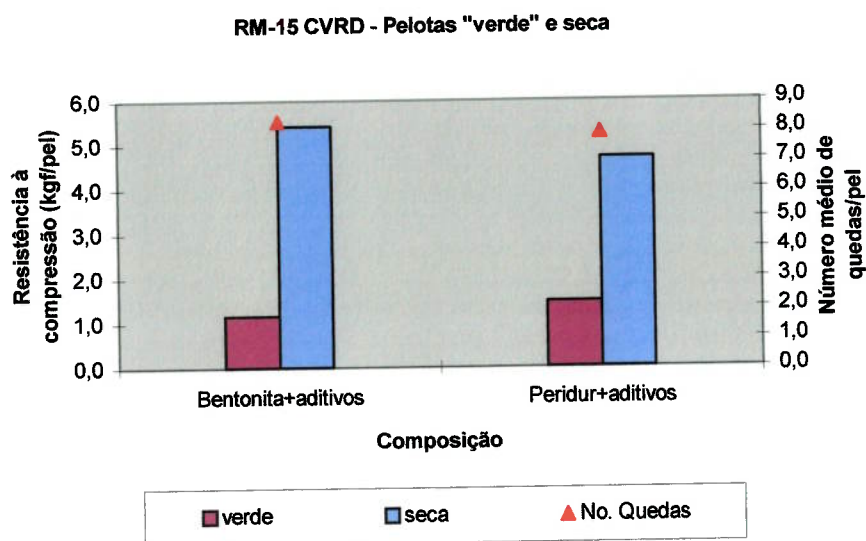


Figura 27 – Resultados obtidos com as pelotas “verde” e seca – Concentrado RM-15

Em relação aos ensaios de resistência à compressão realizados com as pelotas confeccionadas com o concentrado RM-15, os resultados são similares quando se usa bentonita e aditivos ou *Peridur* e aditivos, tanto para a pelota “verde” como seca, com valores médios em torno de 1,2 a 1,5 kgf/pel para a pelota “verde” e em torno de 5,0 kgf/pel para a pelota seca. Em se tratando do número de quedas que a pelota “verde” suporta, o fato se repete, obtendo-se valores médios ao redor de 8,0 quedas/pel.

A figura 28 ilustra os resultados obtidos nos ensaios de choque térmico realizados com as pelotas confeccionadas com o concentrado RM-15.

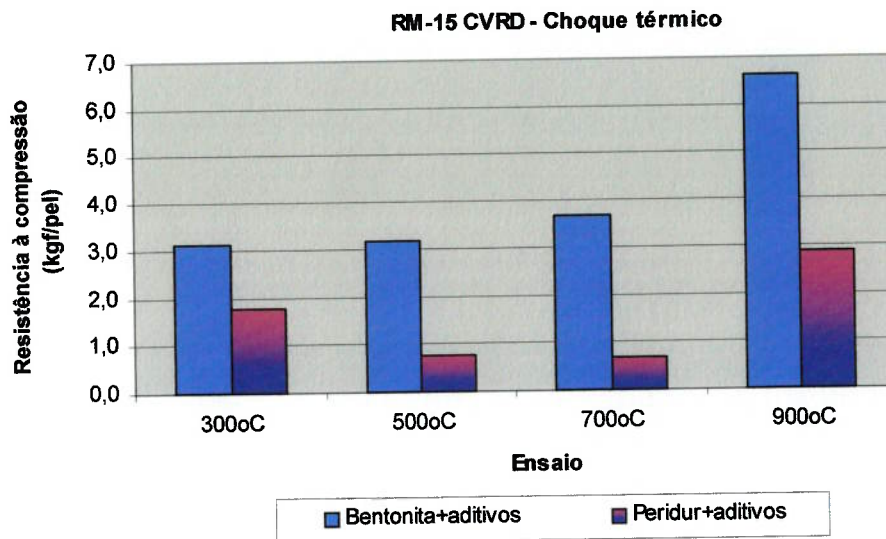


Figura 28 – Resultados de choque térmico – Concentrado RM-15

O desempenho das pelotas confeccionadas com bentonita e aditivos nos ensaios de choque térmico foi superior ao das pelotas com *Peridur* e aditivos, em todas as temperaturas. Das pelotas obtidas com *Peridur* e aditivos, 100% das pelotas ensaiadas apresentaram trincas nas temperaturas de 700°C e 900°C.

Os resultados obtidos no tratamento térmico das pelotas obtidas com o concentrado RM-15 podem ser visualizados na figura 29.

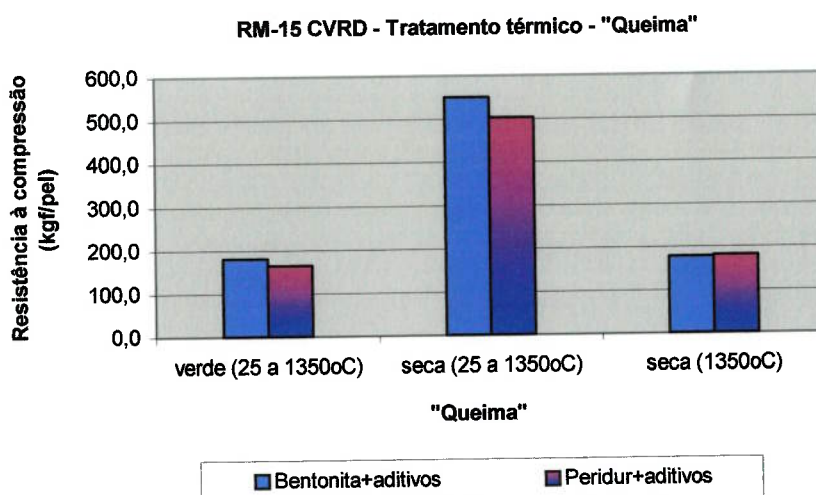


Figura 29 – Resultados dos ensaios de tratamento térmico – Concentrado RM-15

6.2.4 Comparação entre os concentrados

Para comparação do desempenho dos aglomerantes na pelotização de concentrados de minérios de ferro, os resultados foram analisados de acordo com os testes de qualidade das pelotas por composição ensaiada. Sendo assim, os resultados obtidos com o concentrado RM-15, são comentados apenas quanto ao de bentonita e *Peridur* com aditivos.

- Número de quedas repetidas

Na figura 30 podem ser visualizados os resultados do ensaio para determinação da resistência ao número de quedas repetidas a altura de 45 cm. Em relação aos resultados obtidos com as pelotas confeccionadas com os concentrados puros, tem-se que o valor médio obtido com o concentrado Samarco, de 2,2 quedas/pel, é superior ao obtido com o concentrado SPL-1, que foi de 1,6 quedas/pel.

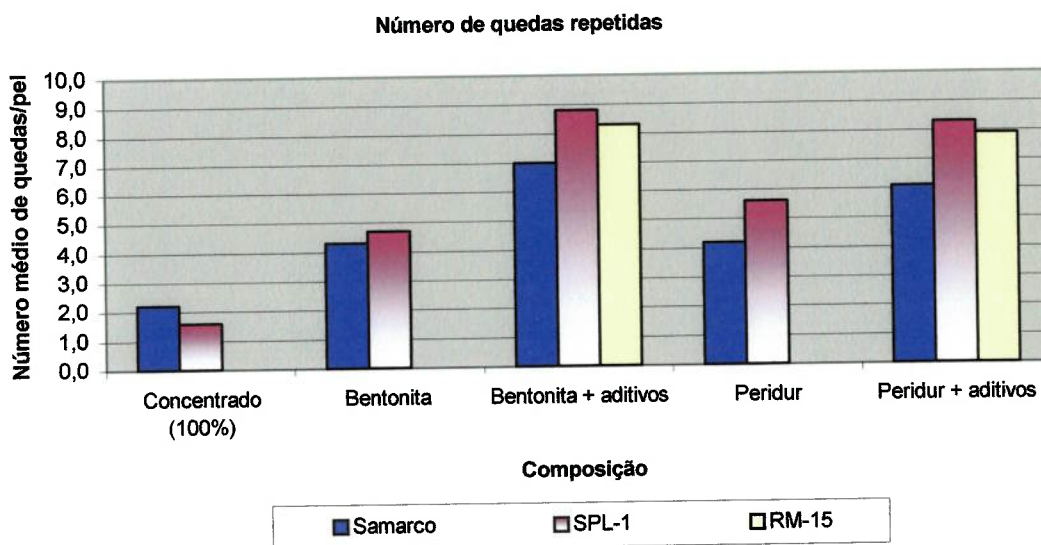


Figura 30 – Resultado da determinação do número de quedas repetidas

A adição dos aglomerantes bentonita ou *Peridur* melhora este desempenho, aumentando o valor médio em 2,0 quedas no caso do concentrado da Samarco e em 3,0 quedas no caso do concentrado SPL-1. Ao se adicionar os aditivos (calcário e antracito) o número de quedas que a pelota suporta se eleva ainda mais, tanto quando se usa a bentonita como o *Peridur*, atingindo um valor médio em torno de 6,0 a 8,0 quedas por pelotas, para ambos os concentrados.

No caso do concentrado RM-15, quando se utiliza bentonita ou *Peridur* com os aditivos, obtêm-se pelotas que suportam, em média, até 8,0 quedas, similarmente quando do uso do concentrado SPL-1.

- Resistência à compressão e choque térmico

No caso dos concentrados puros, os resultados de resistência à compressão e choque térmico, podem ser visualizados na figura 31. Os resultados apresentados nos ensaios realizados apenas com os concentrados puros foram insatisfatórios, com valores médios inferiores a 1,0 kgf/pel para todos os ensaios de resistência à compressão. Embora o valor apresentado pelo concentrado SPL-1 na temperatura de 900°C tenha sido alto, 2,9 kgf/pel, este se refere a apenas 47% das pelotas ensaiadas, uma vez que 53% não resistiram ao choque térmico e explodiram.

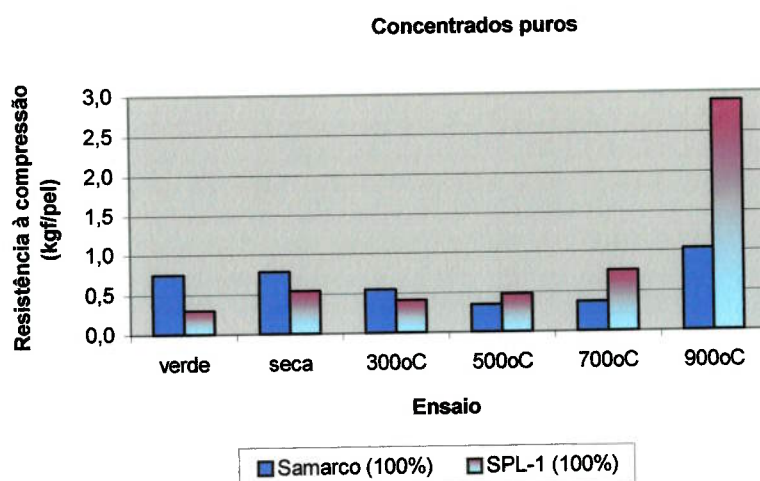


Figura 31 – Resultados de resistência à compressão e de choque térmico com concentrados puros

A adição de bentonita aos concentrados melhora o desempenho nos ensaios de qualidade da pelota, como pode ser visto na figura 32. Nos ensaios de choque térmico houve melhora no desempenho de ambos os concentrados. Nas temperaturas de 500, 700 e 900°C o concentrado SPL-1 apresentou resultados superiores aos obtidos com o concentrado Samarco, que apresentou trincas em 100% da pelotas ensaiadas nas temperaturas de 700 e 900°C, contra 58% e 83% apresentados pelo concentrado SPL-1 e bentonita, nas mesmas temperaturas, respectivamente.

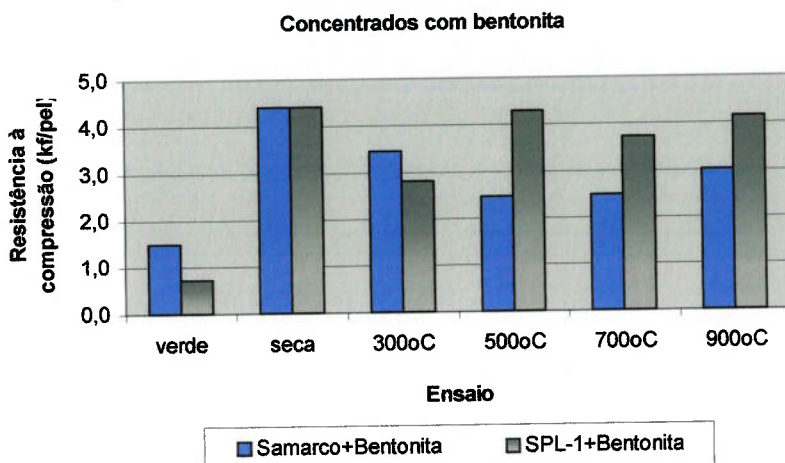


Figura 32 – Resultados de resistência à compressão e de choque térmico com concentrados e bentonita

Em se tratando do aglomerante *Peridur*, este também melhora o desempenho das pelotas obtidas, como se pode visualizar na figura 33. Porém apresenta valores inferiores aos obtidos com a bentonita para ambos os concentrados, principalmente no caso do concentrado SPL-1, em que nas temperaturas de 500°C e 700°C tiveram valores médios bastante baixos, semelhantes aos obtidos com os concentrados puros. Nas temperaturas de 700°C e 900°C, 100% das pelotas obtidas com o concentrado SPL-1 e *Peridur* apresentaram trincas. Já no caso das pelotas obtidas com o concentrado Samarco e *Peridur*, a porcentagem de trincas apresentadas pelas pelotas é menor, 8,3% e 16,7%, nas temperaturas de 700°C e 900°C, respectivamente.

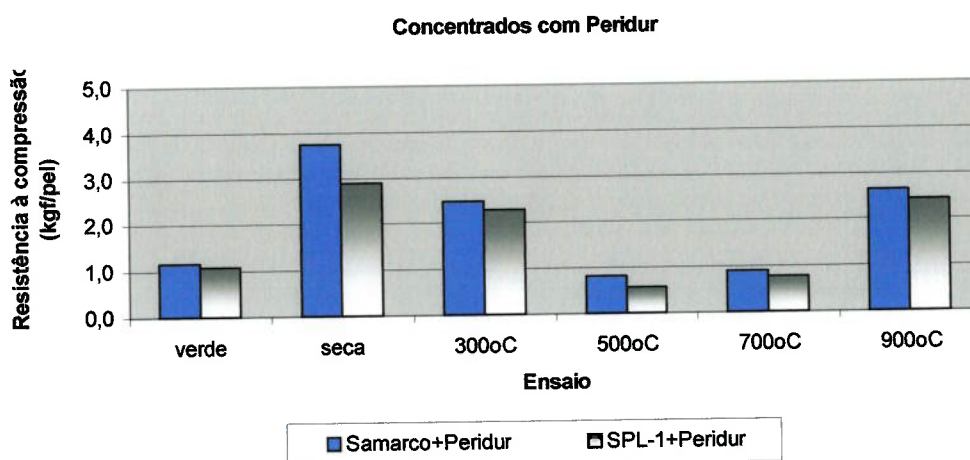


Figura 33 – Resultados de resistência à compressão e de choque térmico com concentrados e *Peridur*

Quando são adicionados os aditivos e os aglomerantes não há alterações significativas de resultados, exceto no caso dos valores de resistência à compressão da pelota seca para o concentrado Samarco quando se utiliza a bentonita, e na temperatura de 900°C para o concentrado SPL-1, também, quando se usa bentonita, como pode ser visto na figura 34.

As pelotas obtidas com o concentrado RM-15+bentonita+aditivos têm comportamento similar às obtidas com o concentrado Samarco, na mesma composição, em todos os ensaios.

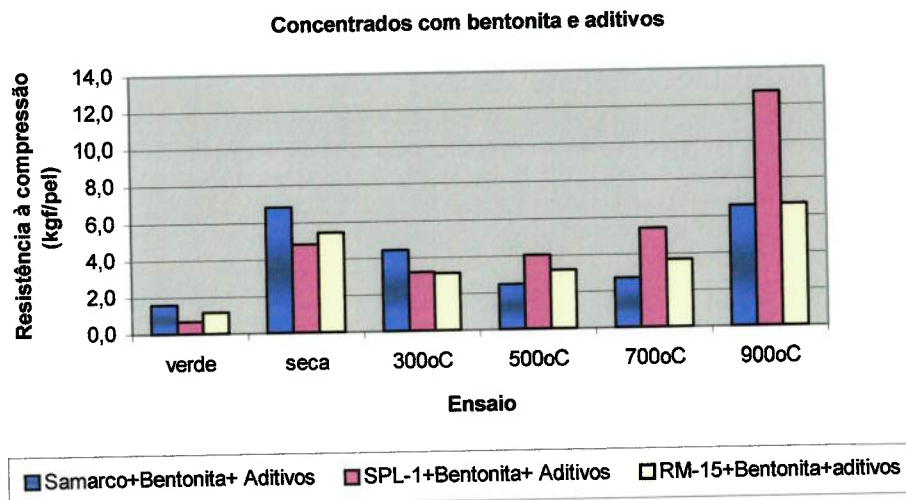


Figura 34 – Resultados de resistência à compressão e de choque térmico com concentrados, bentonita e aditivos

A adição dos aditivos e do *Peridur* também melhora o desempenho, porém não tão significativamente quando se compara com o uso de bentonita e aditivos, como pode ser visto na figura 35.

O desempenho das pelotas confeccionadas com o concentrado RM-15, *Peridur* e aditivos tem comportamento similar ao das pelotas obtidas com o concentrado Samarco, repetindo o que ocorre quando do uso de bentonita e aditivos.

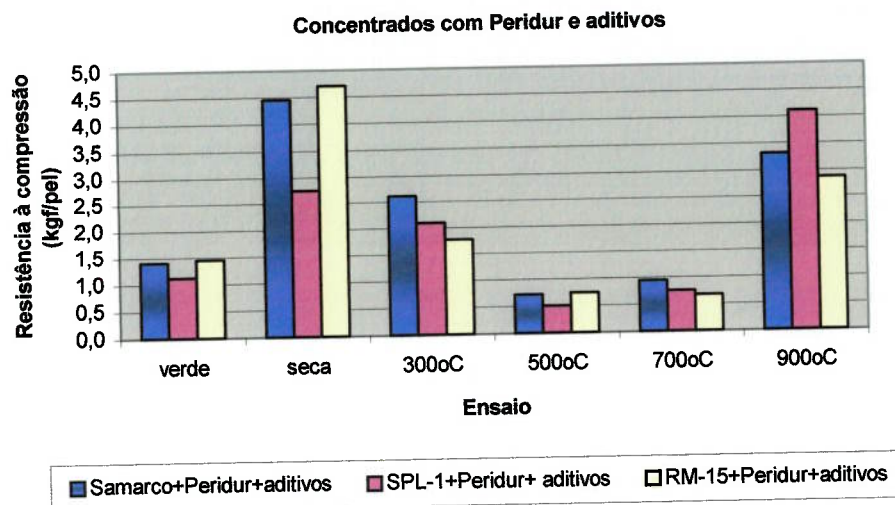


Figura 35 – Resultados de resistência à compressão e de choque térmico com concentrados, *Peridur* e aditivos

- Tratamento térmico (“queima”)

O desempenho dos concentrados no tratamento térmico por aglomerante utilizado será analisado por série de ensaios, ou seja, pela forma como foram submetidos aos ensaios de “queima”.

A figura 36 ilustra os resultados obtidos nos ensaios de tratamento térmico com todos os concentrados, realizados conforme a Série 1, a partir das pelotas “verdes” da temperatura ambiente até 1350°C.

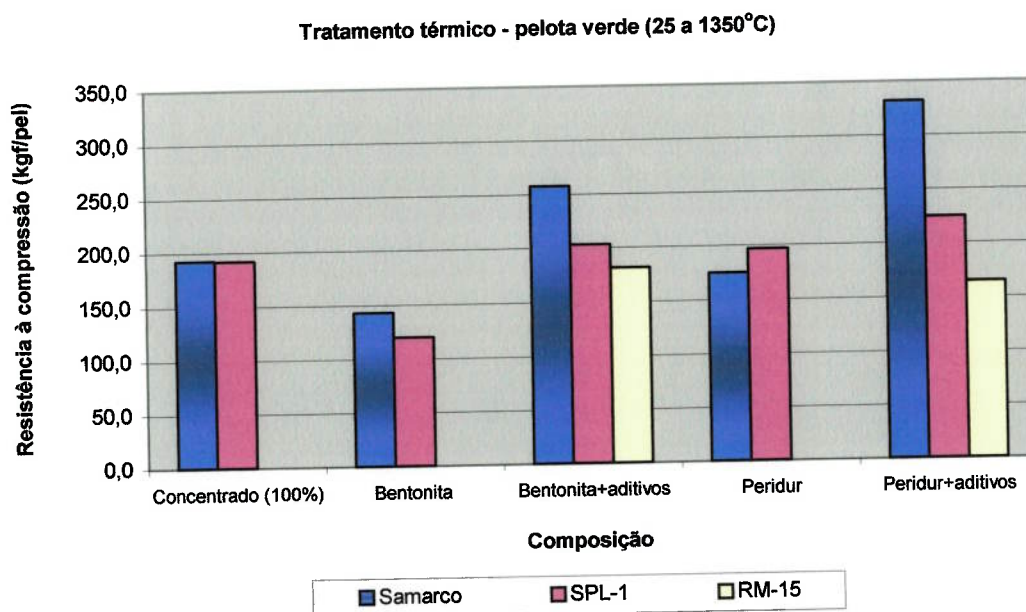


Figura 36 – Resultados dos ensaios de tratamento térmico realizados na Série 1

Nesta série de ensaios de tratamento térmico, o melhor desempenho foi obtido pelas pelotas confeccionadas com o concentrado Samarco, destacando-se os resultados obtidos com este concentrado e *Peridur*+aditivos.

Os resultados obtidos na Série 2 de ensaios de tratamento térmico, a partir das pelotas secas da temperatura ambiente até 1350°C, podem ser visualizadas na figura 37.

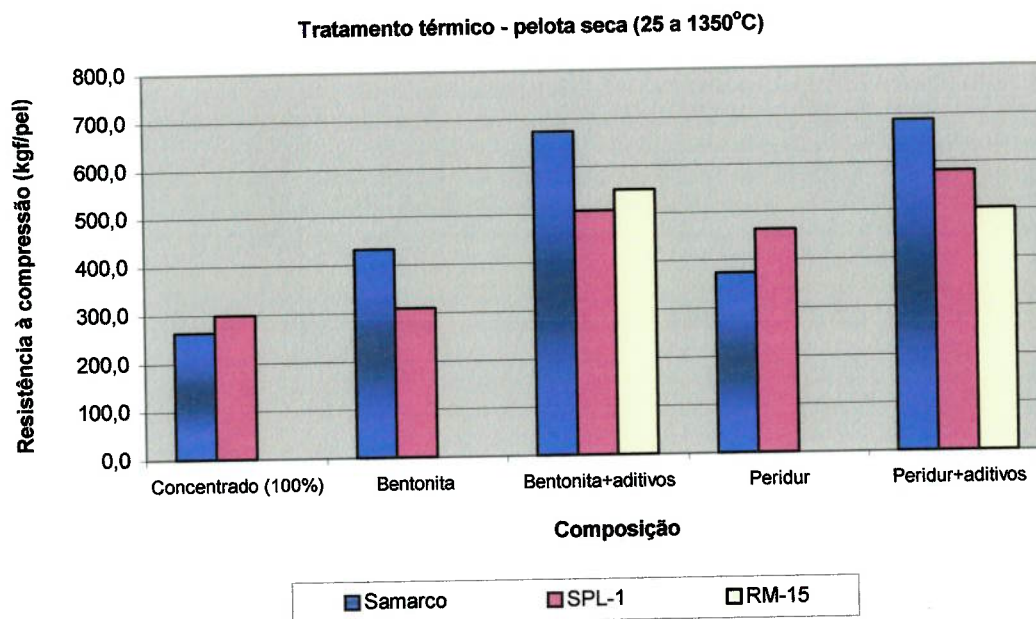


Figura 37 – Resultados dos ensaios de tratamento térmico realizados na Série 2

Por esta série de ensaios, tem-se que os melhores resultados são obtidos pelas pelotas confeccionadas com o concentrado Samarco quando são utilizados *Peridur*+aditivos e bentonita+aditivos, com valores médios de resistência à compressão muito próximos, da ordem 670 a 690 kgf/pel.

Em relação à Série 3 de ensaios de tratamento térmico, pelotas secas colocadas diretamente a 1350°C, os resultados obtidos podem ser visualizados na figura 38.

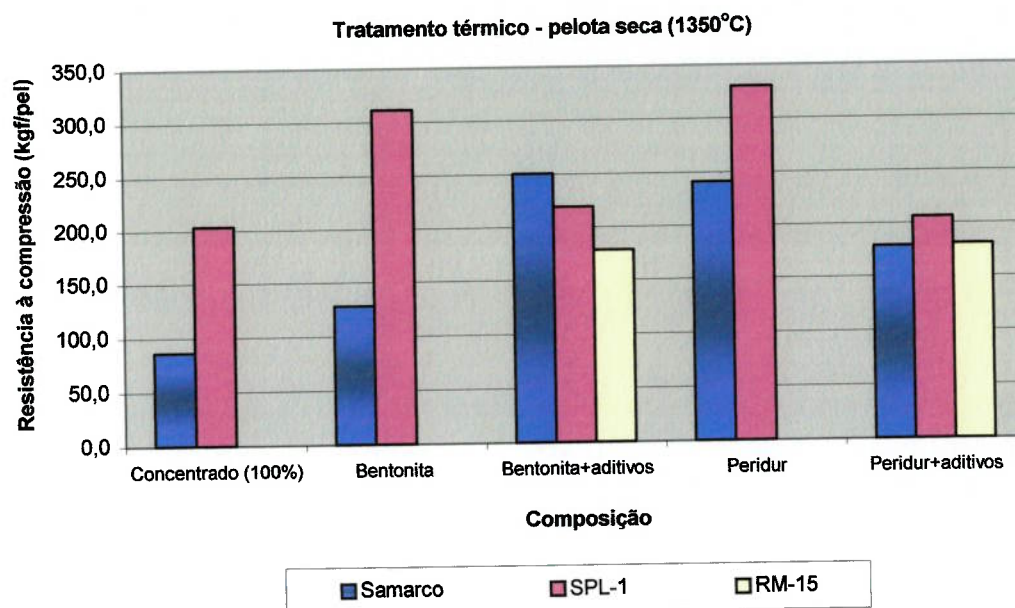


Figura 38 – Resultados dos ensaios de tratamento térmico realizados na Série 3

O melhor desempenho nesta série de ensaios foi observado para as pelotas confeccionadas com o concentrado SPL-1+*Peridur* e SPL-1+ bentonita, seguidas das pelotas obtidas com concentrado Samarco+bentonita+aditivos e Samarco+*Peridur*.

7. CONCLUSÕES

Pelos trabalhos realizados pode-se concluir que:

1) Concentrado Samarco

Em relação ao número de quedas repetidas que a pelota suporta, os melhores resultados são obtidos quando são adicionados os aditivos (calcário e carvão), com valores médios similares (em torno de 7 quedas/pel), tanto quando se usa a bentonita como o *Peridur* como aglomerante.

Quanto aos resultados obtidos nos testes de resistência à compressão das pelotas “verde” e seca, a bentonita apresenta valores superiores aos obtidos com o *Peridur*. Embora o uso dos aditivos eleve os valores de resistência à compressão das pelotas “verdes” e secas quando se usa o *Peridur*, os melhores resultados são obtidos pelas pelotas confeccionadas com a bentonita+aditivos. Este fato sugere que, no caso do concentrado Samarco, os aditivos calcário e carvão agem, também, como aglomerantes, melhorando o desempenho das pelotas “cruas”, ou seja sem tratamento térmico, embora suas funções, sejam fundente e combustível, respectivamente.

A bentonita pura ou com aditivos apresenta os maiores valores de resistência à compressão nos ensaios de choque térmico, porém, o uso do *Peridur* gera uma pelota com uma porcentagem de trincas muito inferior.

No caso dos ensaios de tratamento térmico, os maiores valores de resistência à compressão são obtidos quando os ensaios são realizados de acordo com o método adotado na Série 2, sendo que são destacados os valores obtidos pelas pelotas confeccionadas com ambos os aglomerantes e os aditivos.

2) Concentrado SPL-1

Quanto ao concentrado SPL-1, no caso do número de quedas que a pelota suporta, não há diferença significativa quando se usa a bentonita ou o *Peridur* como aglomerante. Porém os melhores resultados são obtidos quando, a estes, são acrescentados os aditivos calcário e carvão.

Em se tratando dos ensaios de resistência à compressão das pelotas “verdes” e secas, de uma maneira geral, a bentonita se destaca em relação ao *Peridur*.

O uso da bentonita como aglomerante gera pelotas com resistência ao choque térmico superior as obtidas com *Peridur*, com o qual as pelotas apresentaram trincas

na sua totalidade, mesmo quando são utilizados os aditivos, que reduzem a porcentagem de trincas.

No tratamento térmico das pelotas, o *Peridur* se destaca em relação a bentonita, principalmente quando são utilizados os aditivos, sendo que os maiores resultados são obtidos na Série 2 de ensaios.

3) Concentrado RM-15

Como neste caso não foi possível a realização dos ensaios do concentrado com apenas os aglomerantes, uma vez que foram fornecidos adicionados dos aditivos, tem-se que, em termos de ensaios realizados com as pelotas “verdes” e secas, seja quanto ao número de quedas repetidas que a pelota suporta, seja quanto a resistência à compressão, o desempenho de ambos os aglomerantes é similar.

No caso deste concentrado, o desempenho das pelotas obtidas com bentonita nos ensaios de choque térmico foi superior ao obtido com *Peridur*.

4) Comparação entre os concentrados

Em relação ao número de quedas repetidas, o uso de *Peridur* favorece a obtenção dos melhores resultados quando é adicionado ao concentrado SPL-1 e a bentonita quando adicionada ao concentrado Samarco.

A bentonita favorece a resistência à compressão tanto da pelota “verde” como da pelota seca no caso de ambos os concentrados, Samarco e SPL-1.

O fato dos resultados obtidos nos ensaios com o concentrado Samarco+bentonita+aditivos serem superiores àqueles obtidos sem o uso dos aditivos, indica que os mesmos atuam como aglomerantes, sugerindo, portanto, uma possível investigação de redução da adição da bentonita.

No caso do ensaio de choque térmico, de maneira geral, as pelotas obtidas com bentonita apresentam desempenho superior às obtidas com *Peridur*. Entretanto, para o concentrado Samarco, o uso de bentonita como aglomerante gera, no ensaio de choque térmico, pelotas com trincas na sua totalidade, nas temperaturas de 700 e 900°C. O mesmo acontece quando se usa o concentrado SPL-1 e *Peridur* como aglomerante.

Nos ensaios de tratamento térmico, em relação a resistência à compressão das pelotas, os maiores valores são obtidos quando se aplica o método adotado na Série 2.

O desempenho do concentrado SPL-1 no tratamento térmico é favorecido quando se usa o *Peridur* como aglomerante. Já no caso do concentrado Samarco, o uso da bentonita gera melhores resultados. Em ambos os casos, o uso dos aditivos melhora este desempenho. No caso do concentrado RM-15, os aglomerantes têm desempenho semelhante.

O desempenho inferior de resistência à compressão apresentado pelo concentrado SPL-1 em relação ao concentrado Samarco, com ambos os aglomerantes, sugere uma investigação da adição ideal destes últimos a serem adicionadas.

A não uniformidade dos resultados obtidos com o mesmo aglomerante para os diferentes concentrados indica que para cada tipo de concentrado existe um aglomerante que apresenta melhor resultado.

Embora nenhum dos métodos adotados para a realização dos ensaios de tratamento térmico seja o realizado na prática industrial, o adotado na Série 2 foi o melhor, uma vez que o parâmetro de comparação adotado foi a resistência à compressão. Entretanto, em termos de microestrutura das pelotas, cabe um estudo mais detalhado, com análises através da microscopia óptica e eletrônica para tal definição.

LISTA DE REFERÊNCIAS

- AKZO NOBEL CHEMICALS. Apresenta detalhes do produto Peridur. Disponível em: http://www.akzonobel.com/chemicals/products/product_selector_details.asp?ProductID=937. Acesso em 27/03/2004.
- ARAÚJO, L. A. **Siderurgia**. São Paulo: FDT, 1967. 483 p.
- ARIAS, H. D.; MANNHEIMER, W. A. Uso da microscopia eletrônica de varredura na observação de pelotas de minério de ferro. **Metalurgia**, v. 28, n. 171, p. 101-109, 1972.
- BALANÇO MINERAL BRASILEIRO. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral. 2001. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm legis/Balanço01/pdf/ferro.pdf>>. Acesso em: nov. 2003.
- BALL, D. F.; DARTNELL, J.; DAVIDSON, J.; GRIEVE, A.; WILD, R. **Agglomeration of iron ores**. London: [s. n.], 1973.
- BANDEIRA DE MELLO, L. A.; MOURÃO, J. M.; CUNHA, J. M.; PICCOLO, A. L.; KLEIN, M. S. **Pelletizing at CVRD**. Vitória: Documento interno CVRD, 1999.
- CARNEIRO, R. T. S.; MOURÃO, J. M.; GARIGLIO, E. Soluções em tecnologia de ferrosos na CVRD. In: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO E MATÉRIAS-PRIMAS, 33., Ouro Preto, 2003. **Anais**. Ouro Preto: ABM, 2003. p. 221-232. 1 CD-ROM.
- CASSOLA, M. S.; CHAVES, A. P. Effect of the addition of organic binders on the behavior of iron ore pellets. comportamento de pelotas de minério de ferro. **KONA: Powder and Particle**, Osaka, n. 16, p. 136-142, 1998.
- CASSOLA, M. S.; MORAES, S. L. Aglomerantes orgânicos – Uma alternativa na pelletização de minério de ferro. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 58., Rio de Janeiro, 2003. **Anais**. Rio de Janeiro: ABM, 2003. p. 1358-1366. 1 CD-ROM.
- CASSOLA, M. S.; MORAES, S. L. Avaliação da qualidade da pelota queimada por microscopia eletrônica. In: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO E MATÉRIAS-PRIMAS, 33., Ouro Preto, 2003. **Anais**. Ouro Preto: ABM, 2003. p.1-10. 1 CD-ROM.
- CHAVES, A. P. Recycling of limestone quarry fines via pelletization. In: CONGRESSO ÍTALO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE MINAS, 2., São Paulo, 1993. **Anais**. São Paulo: Departamento de Engenharia de Minas da EPUSP/Dipartimento di Ingegneria Mineraria, 1993. v. 2, p. 881-898.

CHAVES, A. P.; PAUL, B. C. Pelotização de finos de calcário. In: SEMINÁRIO SOBRE RECICLAGEM DE REJEITOS DA INDÚSTRIA MÍNERO-METALÚRGICA, Ouro Preto, 1992. **Reciclagem de rejeitos da indústria minero-metalúrgica**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1992. p. 469-482.

CHEREM, C. E. Alta tecnologia. **Metalurgia e Materiais**, São Paulo, n. 537, p. 536, 2003.

COMPANHIA VALE DO RIO DOCE. Diretoria de Pelotização e Metálicos. **Metodologia para avaliação de pelotas cruas e queimadas. Determinação da umidade**. Vitória, 1998. (Norma interna IT 2/6)*.

COMPANHIA VALE DO RIO DOCE. Diretoria de Pelotização e Metálicos. **Metodologia para avaliação de pelotas cruas e queimadas. Determinação do número de quedas de pelotas cruas e resistência à compressão de pelotas cruas e secas**. Vitória, 1998. (Norma interna IT 5/7)*.

COMPANHIA VALE DO RIO DOCE. Diretoria de Pelotização e Metálicos. **Metodologia para avaliação de pelotas cruas e queimadas. Realização de testes físicos da pelota queimada/embarcada**. Vitória, 1998. (Norma interna IT 9/7)*.

KAWATRA, S. K.; RIPKE S. J. Developing and understanding the bentonite fiber bonding mechanism. **Minerals Engineering**, Oxford, v. 14, n. 6, p. 647-659, 2001.

LIMA, J. R. B. **Estudo da carboxi-metil-celulose como aglomerante para pelotização**. 1991. 145 p. Tese (Doutoramento) - Escola Politécnica, Universidade São Paulo, São Paulo, 1991.

LIMA, J. R. B., CHAVES, A. P. **Estudo da carboxi-metil-celulose como aglomerante para pelotização**. São Paulo: EPUSP, 1992. (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Minas, BT/PMI/014).

LIRA FILHO, D. P. **Perfil analítico da bentonita**. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Produção Mineral, 1973. (Boletim, n. 4).

MANTOVANI, M. C. **Comportamento a frio e a quente de pelotas auto-redutoras de resíduo de aciaria elétrica**. 1996. 143 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade São Paulo, São Paulo, 1996.

MENDONÇA, C. F.; MOURÃO, J. M.; FREITAS, G. G.; STEGMILLER, L.; PEREIRA, J. R. Aglomerantes para pelotização de minério de ferro. **CVRD Revista**, Rio de Janeiro, v. 6, n. 19, p. 21-48, mar. 1985.

MINERAL COMMODITY SUMMARIES. U. S. Department of the Interior. U. S. Geological Survey, 2004. p. 85-86. Disponível em: <http://minerals.er.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2004/mcs2004.pdf>. Acesso em: 14 jan. 2004.

MORAES, T. J.; CANO, J. A. M. Importantes fatores a considerar na produção de pelotas de minério de ferro e sua utilização nos processos de redução direta. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MINÉRIO DE FERRO: CARACTERIZAÇÃO, BENEFICIAMENTO E PELOTIZAÇÃO, 1., Ouro Preto, 1996. **Anais**. Ouro Preto: ABM, 1996. p. 301-310.

MOURÃO, J. M.; FREITAS, G. G.; GARIGLIO, E.; KLEIN, M. S. Influência da gênese dos minérios de ferro na etapa de formação de pelotas cruas no processo de pelotização. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MINÉRIO DE FERRO: CARACTERIZAÇÃO, BENEFICIAMENTO E PELOTIZAÇÃO, 1., Ouro Preto, 1996. **Anais**. Ouro Preto: ABM, 1996. p. 75-94.

MOURÃO, J. M. SOUZA, R. P. Pelotas CVRD para redução direta. **CVRD Revista**, Rio de Janeiro, v. 7, n. 26, p. 11-40, dez. 1986.

MOURÃO, M. B. Redução de minério de ferro: redução direta e processos emergentes. In: _____. **Siderurgia para não siderurgistas**. São Paulo: ABM, 2001. p. 79-94.

PIETSCH, W. **Agglomeration process: phenomena, technologies, equipment**. Weinheim: Wiley-VCH, 2002. 622 p.

PINHEIRO, J.C.F. **A mineração brasileira de ferro e a reestruturação do setor siderúrgico**. 2000. 371p. Tese (Doutoramento) – Instituto de Geociências, Universidade de Campinas, Campinas, 2000.

PORTO, J. P. P.; ARANHA, I. B. Caracterização cristaloquímica preliminar de bentonitas brasileiras. In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, Rio de Janeiro, 2002. [**Anais**]. Rio de Janeiro: CETEM, 2002. (Série Anais X). Disponível em http://www.cetem.gov.br/html/serie_anais_X_jic_2002.html>. Acesso em; dez. 2003.

RIPKE, S. J. **Advances in iron ore pelletization by understanding bonding and strengthening mechanisms**. 2002. 186. Tese (Doutorado) - Michigan Technological University, Michigan, 2002.

ROSIÈRE, C. A.; QUADE, H.; CHEMALF JUNIOR, F.; SIEMENS, H. As características mineralógicas, texturais e de anisotropia dos minérios de ferro como parâmetros geometalúrgicos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MINÉRIO DE FERRO: CARACTERIZAÇÃO, BENEFICIAMENTO E PELOTIZAÇÃO, 1., Ouro Preto, 1996. **Anais**. Ouro Preto: ABM, 1996. p. 163-173.

RUMPF, H. The strenght of granules and agglomerates. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON AGGLOMERATION, Philadelphia, 1961. **Agglomeration: proceedings**. New York: Interscience, 1962. p. 379-418.

SAMARCO MINERAÇÃO. **Ponta de Ubu**. Apresenta especificações técnicas de produtos. Disponível em: http://www.samarco.com/port/PRODUTOS/espec_tecnicas.asp. Acesso em: 25/03/2004.

SILVA, C. E. A. Estudo dos fatores que influenciam a formação e a qualidade de pelotas de minério de ferro hematíticos. In: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO E MATÉRIAS-PRIMAS, 33., Ouro Preto, 2003. **Anais**. Ouro Preto: ABM, 2003. p. 554-563. 1 CD-ROM.

SILVA, C. E. A.; SOUZA JÚNIOR, P. A. S.; CARNEIRO, R. T. S.; VIEIRA, C. B.; ARAÚJO, F. G. S.; VON KRÜGER, F. L.; VON KRÜGER, P. O projeto de geosiderurgia na pelotização da Companhia Vale do Rio Doce. In: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO E MATÉRIAS-PRIMAS, 33., Ouro Preto, 2003. **Anais**. Ouro Preto: ABM, 2003. p. 624-631. 1 CD-ROM.

SOUZA NETO, A. N.; SAAB, M. W.; FREITAS, L. C.; CARNEIRO. Entendendo a especificação de minério de ferro para alto forno. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MINÉRIO DE FERRO, 3., Ouro Preto, 2001. **Anais**. Ouro Preto: ABM, 2001. 113-123.

SUMÁRIO MINERAL. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral, v. 23, 2003.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DA EXTRAÇÃO DO FERRO E METAIS BÁSICOS. **Minério de ferro - Exportações brasileiras – Relatório anual**. Rio de Janeiro: Sinferbase, 2002.

TAMBASCO, M. J. A.; LÚCIO, A. Funcionamento do alto-forno. In: TAMBASCO, M. J. A. **Redução de minério de ferro em alto-forno**. 3. ed. [s.L.]: ABM, 1976. p. III/1-III/9.

ULRICH, D. M.; HAN, T.M. A progress report on the effect of grind, temperatures and pellet size upon the quality of specular hematite pellets. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON AGGLOMERATION, Philadelphia, 1961. **Agglomeration**. New York: Interscience, 1962. p. 669-714.

VIEIRA, B. C.; ROSIÈRE, C. A.; PENA, E. Q.; SESHADRI, V.; ASSIS, P. S. Avaliação técnica de minérios de ferro para sinterização nas siderúrgicas e minerações brasileiras: uma análise crítica. **REM - Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 56, n. 2, p. 97-102, abr./jun. 2003.

* Documentos acessíveis mediante autorização da empresa.