

# AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE AMOLECIMENTO E FUSÃO DE PELOTAS ÁCIDAS E BÁSICAS\*

Fábio Rocha da Silva<sup>1</sup>  
Leandro Rocha Lemos<sup>2</sup>  
Paulo de Freitas Nogueira<sup>3</sup>

## Resumo

Esse trabalho foi conduzido em laboratórios metalúrgicos objetivando um estudo aprofundado dos fenômenos ocorridos em altas temperaturas entre a carga metálica, carga redutora e os gases ascendentes. Através de técnicas modernas em equipamentos sofisticados foi possível avaliar o comportamento de pelotas de minério de ferro com qualidade química distintas em altas temperaturas. Esse estudo possibilitou um melhor entendimento do impacto da mudança de composição química dessas pelotas em certos parâmetros metalúrgicos, como temperatura de amolecimento e grau de redução da carga metálica. O resultado desse estudo foi uma avaliação quantitativa do efeito da basicidade ternária das pelotas, nas propriedades a quente desse tipo de produto, possibilitando estimar possíveis impactos da mudança de composição química da carga metálica na zona de amolecimento e fusão do alto-forno.

**Palavras-chave:** Amolecimento; Fusão; Pelotas; Alto-Forno.

## EVALUATION OF SOFTENING AND MELTING PROPERTIES OF ACID AND BASIC PELLETS

### Abstract

This work was conducted in metallic laboratories aiming at a study of phenomena occurring at high temperatures between a metallic charge, a reducing charge and the ascending gases. By means of modern techniques in systems, it was possible to evaluate the behavior of iron ore pellets with its chemical quality at high temperatures. This study allowed a better understanding of the impact of the change in the chemical composition of these pellets in certain metallurgical parameters such as softening temperature and reduction degree of metallic burden. The results of this study were a quantitative evaluation of the effect of ternary basicity of the pellets on the high temperature properties of this type of product, enabling to estimate impacts of the change of chemical composition of the metallic burden in the blast furnace softening and melting zone.

**Keywords:** Softening; Melting; Pellets; Blast Furnace.

<sup>1</sup> Engenharia Metalúrgica, Engenheiro, Analista de Mercado, Simulação de Mercado, Vale SA, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Engenharia Metalúrgica, Doutor, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>3</sup> Engenharia Metalúrgica, Doutor, Gerente Executivo, Precificação e planejamento de Vendas, Vale SA, Belo Horizonte, MG, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

De acordo com a literatura, a zona coesiva do alto-forno situa-se entre o início de amolecimento e a fusão completa da carga metálica. Essa região é constituída por camadas alternadas de coque (ou carvão vegetal) e carga metálica, sendo esta última mais impermeável, devido ao início de mudança de fase sólida para fase líquida. As camadas de coque são mais permeáveis sendo responsáveis pelas janelas que permitem a passagem do gás ascendente através dessa região. A maior parte do oxigênio remanescente, combinado com o ferro da carga metálica, é removido nesta região através de reações de gaseificação do carbono. Os fenômenos envolvidos nesta etapa do processo vêm sendo estudados há, aproximadamente, quatro décadas obtendo avanços consideráveis para o domínio do conhecimento sobre o tema.

Testes físicos têm contribuído para formulações de modelos matemáticos, que podem ser implementados em métodos numéricos existentes, capazes de simular os fenômenos ocorridos no alto-forno. Isso auxiliaria a indústria a replicar virtualmente a zona de amolecimento e fusão, prevendo o impacto de mudanças de processo ou de qualidade de carga metálica nas condições operacionais, o que contribuiria para redução de custos. Esse trabalho tem por objetivo avaliar o comportamento de pelotas com qualidade química distintas na zona de amolecimento e fusão, através de testes laboratoriais e propor correlações matemáticas entre algumas propriedades a altas temperaturas com parâmetros de qualidade química das pelotas.

O amolecimento das partículas constituintes da carga metálica está associado a um mecanismo de deformação mecânica. Alguns testes mostraram que microscopicamente ocorre uma redução da altura da carga durante o aquecimento, ou seja, a temperatura de início de amolecimento pode ser percebida a partir de uma certa contração do leito. Dentro desse conceito, duas abordagens são aceitas: a primeira está relacionada com a viscosidade do amolecimento; a segunda envolve o mecanismo de formação de fase líquida.

### 1.1 Mecanismos de início de amolecimento da carga

O mecanismo de viscosidade de amolecimento fundamenta-se na observação de que ao se aplicar uma carga constante, a uma amostra em altas temperaturas, uma taxa de deformação constante é estabelecida<sup>[2]</sup>. A deformação contínua com o tempo exibe características que podem se relacionar com fluxo viscoso. Dessa maneira, através do cálculo de quantidade relativa das fases presentes e suas viscosidades de amolecimento individuais, calcula-se a deformação em função da temperatura. Nesse conceito, não há distinção do estado físico de cada fase e a taxa de amolecimento está diretamente relacionada com a temperatura.

Já a segunda abordagem na qual o amolecimento está relacionado com a formação de fase líquida, o processo apenas será iniciado com a formação de líquido em uma determinada temperatura. De acordo com esse mecanismo, a deformação estaria diretamente relacionada com a formação de uma fase líquida inicial. Através de testes físicos, observou-se que a presença de camada metálica mais espessa, envolvendo as partículas, dificulta o amolecimento das mesmas. Dessa forma, o

mecanismo básico de início de amolecimento foi relacionado ao núcleo oxidado das partículas, o que conduziu a estudos mais aprofundados que conseguiram explicar de maneira consistente esse fenômeno de amolecimento da carga em altas temperaturas.

A deformação no estado sólido, com relação ao comportamento de deslocamento da wustita, é muito importante durante o processo de amolecimento e fusão, assim como a influência da fase líquida na microestrutura em um sistema wustita/fayalita<sup>[3]</sup>. Os resultados foram comparados às taxas de amolecimento encontradas durante testes laboratoriais. O amolecimento inicia-se através da formação de fase líquida no interior da microestrutura no núcleo da partícula reduzida e não pela deformação no estado sólido. Em trabalhos realizados no final da década de 1990 usando amostras que representavam o núcleo de uma partícula, mas sem a camada metálica externa, o estudo mostrou que a presença de fase líquida favorece a deformação, onde o aumento da quantidade dessa fase, no interior da amostra, conduz ao aumento das taxas de deformação<sup>[3]</sup>. A disseminação da fase líquida atua como um lubrificante entre os glóbulos de wustita, facilitando a deformação. Entretanto, o mecanismo baseado na formação de fase líquida não é aplicável durante amolecimento na presença de camada metálica externa. De acordo com esse conceito, na presença de um núcleo oxidado e uma camada externa metálica, a fase líquida formada é transferida do núcleo para o exterior através da porosidade do material. À medida que a temperatura aumenta, a quantidade de fase líquida também aumenta e a porosidade da camada externa é preenchida usando energia de superfície, não necessitando de energia mecânica. Na presença de um ambiente redutor, a penetração da fase líquida na presença dos poros da camada externa leva a densificação da camada metálica, devido à redução da fase líquida. Esse mecanismo diminui o contato do gás redutor com as camadas internas da partícula o que leva a um retardamento da redução do óxido de ferro.

A taxa de amolecimento está relacionada com a quantidade de fase líquida formada, sendo descrita como função da temperatura. A transferência de fase líquida, do centro para as camadas externas, gera vazios no núcleo da partícula e à diminuição de seu suporte mecânico, resultando posteriormente no colapso da estrutura, conduzindo a uma contração rápida do leito. Os testes físicos realizados em escala laboratorial validaram justamente esse mecanismo de transferência da fase líquida do núcleo para a camada externa, através da avaliação do aspecto micro-estrutural de amostras de minério de ferro submetidas a ensaios de amolecimento e fusão interrompidos<sup>[3]</sup>.

Alguns autores estudaram o efeito da basicidade ternária nas propriedades de amolecimento e fusão e a conclusão é de que a relação é direta<sup>[5]</sup>. Ou seja, pelotas básicas tendem a aumentar as temperaturas de amolecimento e reduzir o intervalo entre o amolecimento e o gotejamento. Esse trabalho visa estudar justamente o efeito da mudança de composição química de pelotas nas propriedades a quente através de testes que simulam as condições fluidodinâmicas e químicas da carga metálica em temperatura elevadas no interior do alto-forno.

## 2 DESENVOLVIMENTO

Vários trabalhos experimentais foram desenvolvidos ao longo das últimas décadas em busca de um entendimento sobre os fenômenos que ocorrem, em altas temperaturas, entre a carga metálica, carga redutora e os gases ascendentes<sup>[4], [5], [6]</sup>. A partir desses trabalhos, foi possível listar elementos comuns para todos os diferentes métodos de avaliação de carga metálica em altas temperaturas. Os principais são:

- Forno com alta capacidade de aquecimento (tanto a taxa de aquecimento quanto temperatura máxima);
- Aplicação de carga sobre a amostra durante o ensaio;
- Mistura de gases contendo pelo menos dois gases base para os ensaios (CO<sub>2</sub>, CO, N<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>);
- Empacotamento da amostra de carga metálica entre duas camadas de redutor, usualmente coque metalúrgico.

A Figura 1 ilustra os quatro estágios pelos quais a carga metálica passa durante o ensaio em altas temperaturas. Esse procedimento foi descrito em trabalhos encontrados na literatura<sup>[2]</sup>.

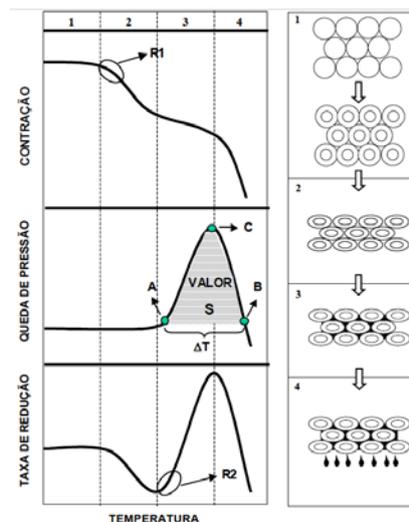


Figura 1 - Etapas observadas durante os ensaios de amolecimento e fusão com cargas metálicas<sup>[2]</sup>. R<sub>1</sub> é a região onde inicia a contração do leito sendo no máximo 10%. O ponto A representa o valor inicial de aumento de pressão (ponto inicial da zona coesiva). O ponto B representa o valor final de queda de pressão (ponto final da zona coesiva). O ponto C é o valor máximo de aumento de pressão. ΔT é o intervalo de temperatura da zona coesiva. S apresenta a área sob a curva de pressão versus temperatura. R<sub>2</sub> representa o grau de redução da amostra no início da zona coesiva.

Antes de iniciar o amolecimento, a carga metálica é pré-reduzida ao nível de wustita (O/Fe ≈ 1,05). Após o período correspondente ao tempo de residência da carga nas zonas de reserva térmica e química, condições termodinâmicas contribuem para formação de uma camada externa de ferro metálico. Dessa maneira, sobre um núcleo oxidado ocorre formação de camada de ferro metálico, que posteriormente passa por uma etapa de densificação, podendo resultar em ligeira contração do leito. Em seguida uma outra fase desse processo é iniciada, na qual ocorre uma

deformação mais significativa do leito, sendo usualmente acompanhada por uma diminuição na taxa de redução. Apesar dos componentes do leito deformarem individualmente, a macro porosidade permanece aberta, resultando numa perda de carga menor nessa fase do processo. A deformação é basicamente em função da formação de fase líquida.

A terceira fase inicia basicamente com a formação de fase líquida, onde a escória líquida, oriunda do processo, contém quantidades significativas de FeO. Esse líquido preenche os poros maiores do leito elevando a taxa de redução, devido ao contato dessa escória com os agentes redutores. Ao diminuir o teor de FeO, a escória aumenta seu ponto de fusão e, conseqüentemente, a sua solidificação. Nesse momento, a perda de carga tem um aumento significativo devido à redução da porosidade do leito. Na fase final do processo, observa-se o gotejamento de líquidos formados por ferro, escória ou ambos constituintes. Isso resulta numa forte contração do leito que depende da quantidade de fase líquida formada nesta faixa de temperatura. Durante o início do gotejamento, observa-se uma queda na perda de carga e uma diminuição da taxa de redução.

## 2.1 Procedimento Experimental

O procedimento de ensaio de amolecimento e fusão adotado pela Vale segue uma metodologia semelhante à japonesa, para pesquisa de desenvolvimento de carga metálica para alto-forno. Ao longo dos anos, empresas siderúrgicas japonesas desenvolveram uma série de aparatos e dispositivos, tanto industriais quanto laboratoriais, para melhorar o entendimento dos fenômenos e respectivos mecanismos presentes no processo de redução da carga metálica, dentro do alto-forno. O método de ensaio do Laboratório de Propriedades em Altas Temperaturas, da Vale, é derivado de um dispositivo semelhante ao existente na Nippon Steel Corporation no Japão. O aparato construído no Centro de Tecnologia de Ferrosos incorporou melhorias em relação a componentes eletrônicos e layout do equipamento japonês.

Os ensaios seguiram o procedimento padrão de ensaio da Vale e foram realizados no laboratório de propriedades em altas temperaturas localizado no Centro de Tecnologia de Ferrosos (CTF) em Nova Lima/MG. O equipamento consiste em dois fornos, um superior (Potência: 45 kW, temperatura máxima 1600°C) e outro inferior (Potência 55kW, temperatura máxima 1700°C). Este equipamento tem a capacidade de simular o comportamento da carga no interior do alto-forno e em especial na zona de amolecimento e fusão.

A amostra a ser avaliada é posicionada no interior do forno superior onde então é submetida ao perfil térmico previamente estabelecido. Além de um termopar em cada forno, também há um termopar localizado no interior do pistão que aplica a carga na amostra. Cada forno é controlado separadamente por um controlador PID. O forno superior é controlado pelo termopar colocado próximo à amostra. O sistema de controle é do tipo cascata.

A amostra é carregada entre duas camadas de coque em um cadinho de grafite (100 mm de diâmetro e 180 mm de altura) posicionado na região central do forno superior (Figura 2). A quantidade de amostra é definida pela altura da amostra no cadinho (70 mm) e pela densidade de cada material (sinter, pelota ou minério granulado). As

camadas de coque têm uma espessura de 20 mm sendo que o fundo do cadinho é projetado de forma a permitir o gotejamento do material fundido.

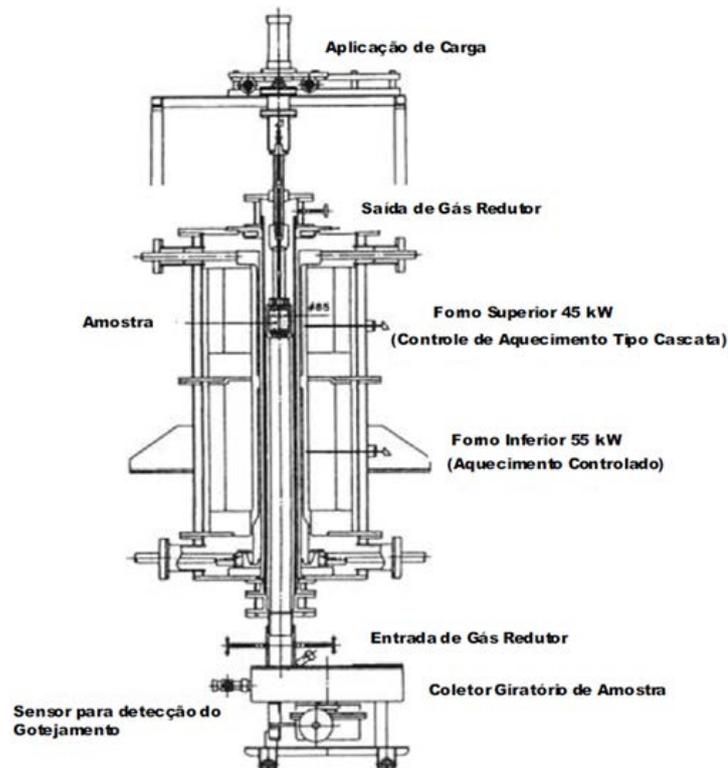


Figura 2 - Desenho técnico do equipamento para ensaio de amolecimento e fusão <sup>[1]</sup>.

Neste equipamento as amostras são aquecidas sob um fluxo de 34 NL/min de N<sub>2</sub> a uma taxa de aquecimento de 10°C/min. A 800°C, uma pressão de 98 kPa é aplicada na amostra e a composição do gás é alterada para 67% N<sub>2</sub>, 29% CO, e 4% H<sub>2</sub>, enquanto que o fluxo continua a 34 NL/min. A 1000°C a taxa de aquecimento do forno superior é alterada para 5°C/min, e o aquecimento prossegue até atingir 1600°C. O aquecimento do forno inferior prossegue a 10°C/min até 1700°C. De 800°C em diante, o gás de saída é analisado continuamente permitindo a determinação contínua do grau de redução da amostra. Todo material gotejado é coletado em recipientes existentes em uma mesa giratória posicionada na região inferior do equipamento. O movimento giratório é iniciado automaticamente assim que inicia o gotejamento através de sensores de detecção.

Os Índices do Ensaio são:

- Temperatura de início zona coesiva (T<sub>S200</sub>): temperatura correspondente ao instante em que a queda de pressão atinge 200 mmca (milímetros de coluna d'água) durante o aquecimento da amostra.
- Intervalo de temperatura da zona coesiva (ΔT): a determinação deste parâmetro está diretamente associada ao intervalo de temperaturas utilizado para cálculo do valor S. Corresponde ao aumento de temperatura experimentado pela carga metálica na região de queda de pressão mais significativa na zona coesiva do alto-forno.

- Valor S: o valor S é um indicador da permeabilidade global do leito durante o ensaio. Para sua quantificação, calcula-se a área abaixo da curva de queda de pressão versus temperatura, no intervalo correspondente ao instante em que a queda de pressão atinge 200 mmca (ponto A) passando por um máximo (ponto C) e retornando a 200 mmca no final (ponto B), conforme equação (1).

$$S = \int_{TA}^{TB} \Delta P(T) \partial T \quad (1)$$

- Grau de redução em altas temperaturas ( $R_{S200}$ ): corresponde ao grau de redução instantâneo nas temperaturas  $T_{S200}$ . Sua determinação foi feita utilizando os resultados da análise contínua dos gases de exaustão do forno.

## 2.2 Caracterização química das amostras

A caracterização convencional dos materiais que são objeto deste trabalho teve por finalidade mostrar as principais diferenças entre as pelotas escolhidas, no que diz respeito aos aspectos químicos. Vários testes com pelotas realizados no Centro de Tecnologia de Ferrosos da Vale foram utilizados nesse trabalho.

A análise química das pelotas foi realizada segundo procedimento interno da Vale. Foram determinados os seguintes componentes: Fe total, FeO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO e perda por calcinação (PPC). Os teores de ferro total e óxido de ferroso (FeO) foram determinados via úmida devido à maior precisão dos resultados.

A tabela 1 mostra os resultados das análises químicas de cada pelota:

**Tabela 1 - Análise química das amostras de pelota.**

| Pelota | Fe%   | FeO% | CaO% | SiO <sub>2</sub> % | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> % | MgO% | B <sub>2</sub> | B <sub>3</sub> |
|--------|-------|------|------|--------------------|----------------------------------|------|----------------|----------------|
| A      | 66.16 | 0.25 | 0.82 | 3.05               | 1.00                             | 0.08 | 0.27           | 0.29           |
| B      | 65.17 | 0.23 | 2.99 | 2.50               | 0.80                             | 0.06 | 1.20           | 1.22           |
| C      | 65.80 | 1.19 | 2.42 | 2.36               | 0.67                             | 0.03 | 1.03           | 1.04           |
| D      | 66.27 | 0.48 | 1.83 | 2.22               | 0.67                             | 0.03 | 0.82           | 0.84           |
| E      | 63.73 | 0.22 | 1.25 | 5.09               | 0.71                             | 0.39 | 0.26           | 0.32           |
| F      | 65.10 | 0.21 | 2.54 | 2.44               | 1.00                             | 0.09 | 1.04           | 1.08           |
| G      | 64.49 | 0.30 | 2.99 | 3.14               | 0.98                             | 0.03 | 0.95           | 0.96           |
| H      | 64.77 | 0.23 | 2.95 | 3.39               | 1.00                             | 0.08 | 0.87           | 0.89           |
| I      | 65.15 | 0.52 | 2.82 | 2.82               | 0.77                             | 0.07 | 1.00           | 1.02           |
| J      | 63.87 | 0.26 | 2.80 | 4.18               | 1.18                             | 0.07 | 0.67           | 0.69           |
| K      | 63.83 | 0.22 | 1.29 | 5.04               | 0.74                             | 0.49 | 0.26           | 0.35           |
| L      | 62.77 | 0.38 | 3.84 | 4.49               | 0.68                             | 0.80 | 0.86           | 1.03           |
| M      | 66.20 | 0.40 | 2.44 | 2.26               | 0.50                             | 0.05 | 1.08           | 1.10           |
| N      | 65.31 | 0.14 | 2.92 | 2.44               | 0.80                             | 0.06 | 1.20           | 1.20           |
| O      | 63.80 | 1.03 | 2.58 | 5.17               | 0.30                             | 0.18 | 0.50           | 0.53           |
| P      | 66.87 | 0.15 | 1.75 | 1.39               | 0.50                             | 0.04 | 1.26           | 1.29           |

Como pode ser visto na tabela 1, essas pelotas possuem hematita, SiO<sub>2</sub>, CaO, MgO e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Esses compostos formam fases diferenciadas que interferem diretamente nas propriedades de amolecimento e fusão.

### 2.3 Ensaios de Amolecimento e Fusão

A tabela 2 mostra justamente os dados de propriedades a quente obtidos pelos testes no forno de amolecimento e fusão. Observa-se, pelos gráficos da figura 2, que as pelotas A, E, K e O apresentaram a maior área “S” (área sob a curva), o que indica que essas pelotas conduzem a uma menor permeabilidade da carga durante o amolecimento e fusão. Pela tabela 1, nota-se que a basicidades ternárias dessas pelotas são as menores dentre as avaliadas. Esse efeito pode ser observado em outros trabalhos no quais a conclusão foi uma correlação direta entre basicidade ternária e propriedades de amolecimento e fusão<sup>[5]</sup>.

Tabela 2 - Resultados obtidos através dos testes de amolecimento e fusão.

| Pelota | T <sub>S200</sub> | ΔT    | S (kg*C/cm <sup>2</sup> ) | R <sub>S200</sub> |
|--------|-------------------|-------|---------------------------|-------------------|
| A      | 1042.0            | 334.0 | 131.4                     | 36.2              |
| B      | 1230.8            | 111.1 | 11.1                      | 63.7              |
| C      | 1146.5            | 182.5 | 24.7                      | 60.2              |
| D      | 1114.5            | 226.0 | 34.4                      | 55.8              |
| E      | 1062.9            | 272.6 | 108.6                     | 46.0              |
| F      | 1141.0            | 259.0 | 59.7                      | 57.4              |
| G      | 1105.0            | 242.5 | 30.3                      | 54.9              |
| H      | 1086.0            | 246.0 | 67.8                      | 59.4              |
| I      | 1122.7            | 222.7 | 50.7                      | 58.7              |
| J      | 1104.9            | 273.5 | 75.2                      | 46.3              |
| K      | 1062.3            | 273.7 | 118.4                     | 48.7              |
| L      | 1121.7            | 229.0 | 79.5                      | 63.3              |
| M      | 1186.0            | 146.3 | 13.9                      | 65.8              |
| N      | 1197.0            | 156.7 | 16.6                      | 63.1              |
| O      | 1063.5            | 232.1 | 86.1                      | 51.5              |
| P      | 1255.0            | 205.0 | 21.8                      | 61.1              |

A figura 3, mostra os perfis de temperatura que as amostras foram submetidas durante o teste. A escória líquida formada a partir da carga metálica parcialmente reduzida é geralmente binária, constituída por sílica e wustita<sup>[9]</sup>. Esta escória forma-se inicialmente na região central da partícula, rica em wustita e, por capilaridade, desloca-se através dos poros, preenchendo-os e impedindo o prosseguimento da redução. Assim, considerando-se que sempre existirá wustita suficiente no centro das partículas da carga metálica, seja ela minério de ferro granulado ou aglomerado, a solução para impedir a formação da escória primária líquida seria controlar a

quantidade de sílica disponível para reagir com a wustita. Isto pode ser feito através do favorecimento da formação de silicato de cálcio em aglomerados, tornando a sílica indisponível para reagir com a wustita. E, a solução fundamental para a eliminação dos efeitos adversos das escórias primárias ricas em óxido de ferro é a metalização completa do material, antes que atinja as regiões de alta temperatura. Uma maneira de favorecer a redução da carga metálica, seria deslocar a zona coesiva para regiões inferiores no forno através do aumento de basicidade. Isso contribuiria para uma maior redução do óxido de ferro antes que a carga atinja o início de seu amolecimento. Esse efeito pode ser visto na figura 2 “d” através das pelotas com maior basicidade ternária (M, N e P) cujas áreas “S” foram menores.

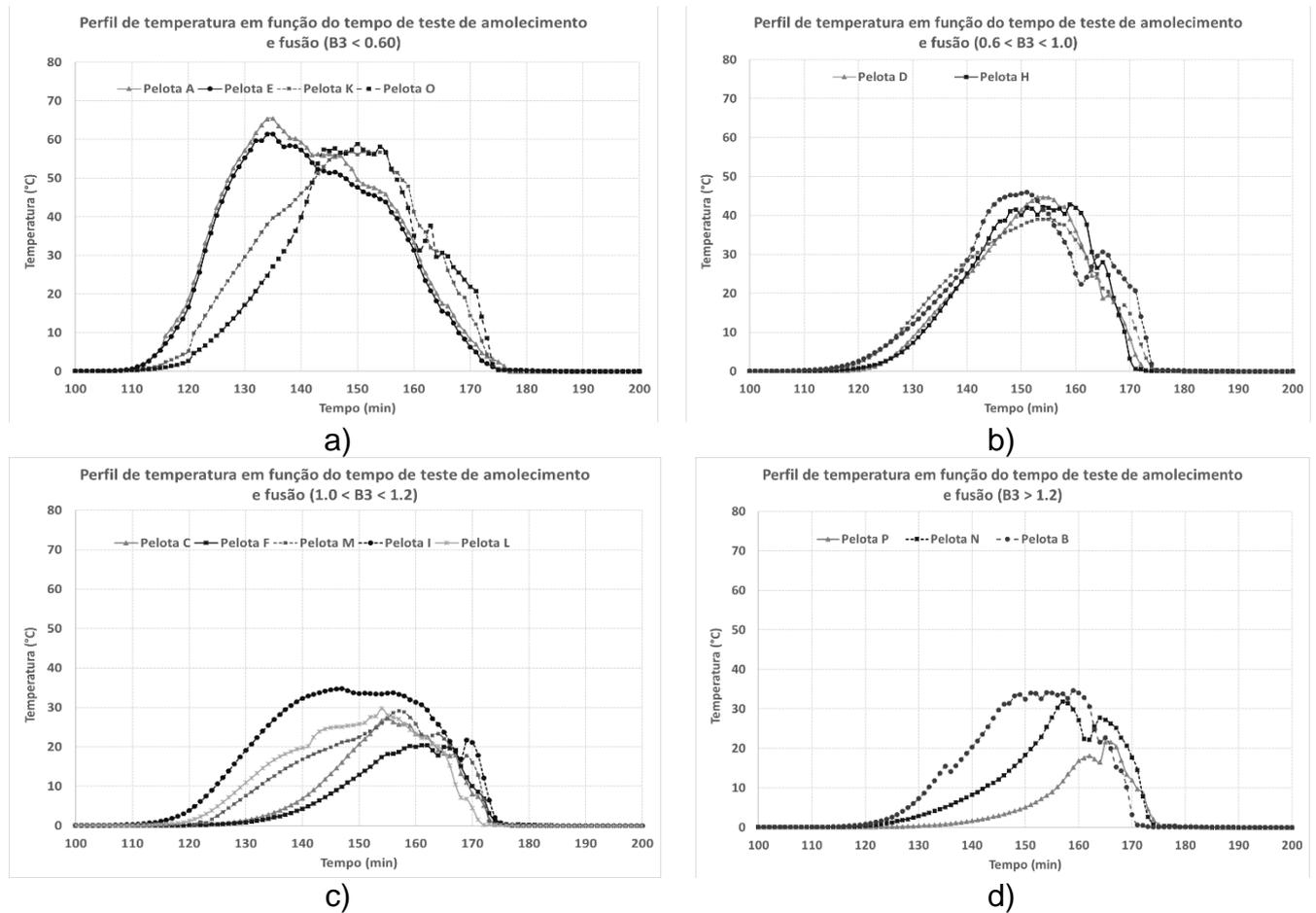


Figura 3 - Perfis de temperaturas durante o ensaio de amolecimento e fusão. a)  $B_3 < 0.6$ ; b)  $0.6 < B_3 < 1.0$ ; c)  $1.0 < B_3 < 1.2$ ; d)  $B_3 > 1.2$ .

Dentre os parâmetros fornecidos pelo teste de amolecimento e fusão, notou-se que  $T_{S200}$  (Temperatura de início de amolecimento) e  $R_{S200}$  se correlacionaram estatisticamente com  $B_3$  (Basicidade Ternária). A figura 4 apresenta a correlação entre  $T_{S200}$  e  $B_3$ . A figura 4 mostra a correlação entre  $R_{S200}$  e  $B_3$ . O gráfico referente à figura 4 indica que a temperatura de início de amolecimento é uma função linear com a basicidade ternária. Entretanto, observa-se duas regiões distintas: a primeira descreve pelotas ácidas ( $0,20 < B_3 < 1,0$ ), e a segunda região descreve como a temperatura de amolecimento varia em função da basicidade da pelota.

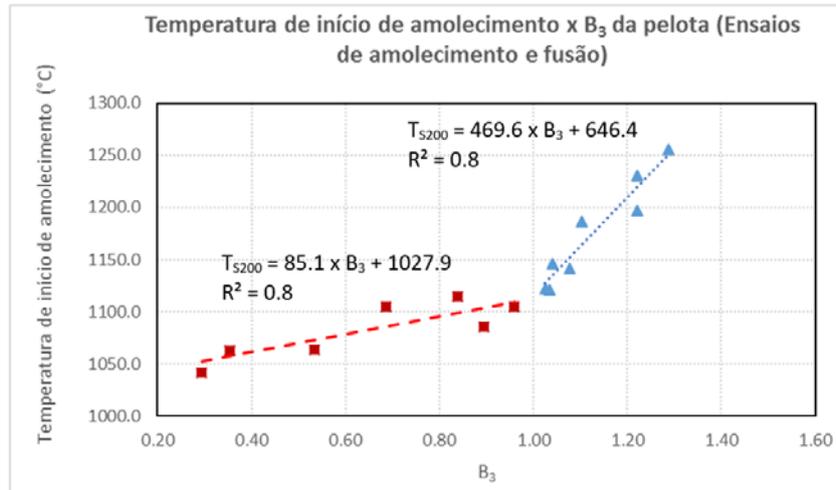


Figura 4 - Correlação entre Temperatura de início de amolecimento e B<sub>3</sub>.

Dessa maneira, foi possível extrair equações que correlacionam a temperatura de amolecimento ( $T_{S200}$ ) com a basicidade ternária, considerando dois intervalos. A equação (2) correlaciona essas variáveis para pelotas cuja basicidade ternária é menor que 1. Já a equação (3) mostra o efeito amplificado da B<sub>3</sub> na temperatura de amolecimento para pelotas com basicidade ternária acima de 1. Isso indica que o aumento nos teores de CaO e MgO retardam o amolecimento da pelota. De acordo com estudos publicados ao longo das últimas décadas [5], [8], [9], concluiu-se que pelotas básicas se caracterizam por possuírem altas temperaturas de amolecimento.

$$T_{S200} = 85.1 \times B_3 + 1027.9 \quad (B_3 < 1.0) \quad (2)$$

$$T_{S200} = 469.6 \times B_3 + 646.4 \quad (B_3 > 1.0) \quad (3)$$

A figura 5 mostra uma relação direta entre Grau de Redução e basicidade da pelota. Alguns estudos mostraram que a quantidade de fase líquida aumenta à medida que a temperatura aumenta. A partir desse momento, o líquido preenche os poros da camada externa usando energia de superfície, não necessitando de energia mecânica [5]. Na presença de um ambiente redutor, a penetração da fase líquida através dos poros da camada externa conduz à densificação da camada metálica, devido à redução da fase líquida. Esse mecanismo diminui a redução das camadas internas da partícula. Entretanto, a elevação dos teores de CaO e MgO conduz a formação de novos compostos químicos com maior ponto de fusão, contribuindo para a redução de formação de fase líquida. Sendo assim, não ocorre penetração de líquido no interior dos poros, o que favorece um maior contato do gás com os glóbulos de wustita, melhorando o grau de redução. Isso é uma possível explicação do motivo desse grau de redução ser maior para pelotas com maior basicidade.

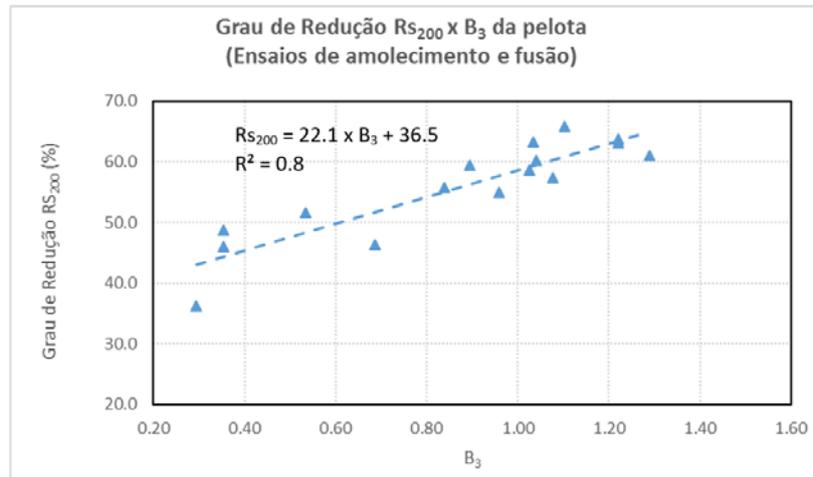
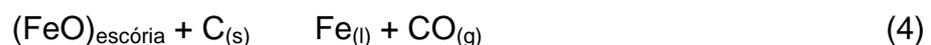


Figura 5 - Correlação entre Grau de redução das pelotas  $R_{S200}$  e  $B_3$ .

Portanto, através do gráfico referente à figura 5 conclui-se que pelotas com maior basicidade ternária possuem maior grau de redução antes de iniciar o seu amolecimento, o que minimiza a fusão redutora promovendo menor consumo de combustível no alto-forno. A equação (3) obtida através da figura 4 mostra uma clara tendência de aumento do grau de redução com a basicidade ternária.

$$R_{S200} = 22.1 \times B_3 + 36.5 \quad (3)$$

Diante dessa constatação, é importante entender o grande efeito negativo de pelotas com menor grau de redução no processo do alto-forno. Como o teor de wustita de pelotas ácidas é elevado, ao iniciar o amolecimento, a concentração de FeO resultante na escória será também maior. Durante a formação de fase líquida, a escória pode ter alta viscosidade e a redução dos óxidos de ferro resultará em um intenso consumo de combustível, devido à reação de redução do FeO diretamente com o carbono, conforme equação (4). Esse fenômeno é conhecido por fusão redutora que é prejudicial para o processo do alto-forno.



Como essa reação é altamente endotérmica, a escória pode sofrer um resfriamento o que aumenta a probabilidade de solidificação da mesma, uma vez que a redução do teor de FeO conduz ao aumento de seu ponto de fusão <sup>[11]</sup>. Além disso, essa reação endotérmica degrada o coque, aumentando a quantidade de finos gerados no processo. Dessa maneira, esses fenômenos conduzem a uma perda de permeabilidade, diminuindo a eficiência operacional do alto-forno. Uma maneira de minimizar a participação da fusão redutora no processo de redução da carga metálica é promover o máximo de redução da carga antes de iniciar sua fusão, o que evitaria perda de permeabilidade nas regiões de alta temperatura desse reator.

### 3 CONCLUSÃO

Nesse trabalho pelotas com qualidades diferenciadas foram testadas no equipamento de amolecimento e fusão no centro de tecnologia de ferrosos da Vale. A partir desses testes, algumas observações foram feitas:

- Pelotas com baixa basicidade apresentaram uma área “S” maior que pelotas básicas. Sendo assim, pelotas com maior basicidade teriam contribuído para uma maior permeabilidade do leito e melhor estabilidade operacional do alto-forno.
- Pelotas cuja basicidade é maior que 1 (um) demonstraram características de amolecimento e fusão diferenciadas em relação às pelotas cuja basicidade é menor que um. As primeiras mostraram maior resistência para iniciar o amolecimento.
- O Grau de redução de pelotas básicas é maior que o de pelotas ácidas como foi constatado através dos testes físicos, e evidenciada pelas simulações fluidodinâmicas. Sendo assim, pelotas com maior basicidade teriam contribuído para uma maior redução do óxido de ferro, o que potencialmente diminui o consumo de combustível devido a redução da reação direta do carbono.

## Agradecimentos

Agradecimentos a toda equipe do Centro de Tecnologia de Ferrosos (CTF) pela disponibilização dos dados referentes à caracterização de todas as pelotas, cujos valores serviram de base para elaboração deste estudo.

## REFERÊNCIAS

- 1 CASTRO, A. A. Avaliação de propriedades em Altas Temperaturas de Pelotas para Alto-Forno, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, 2006.
- 2 IWANAGA, Y. – Quantitative determination of softening properties of sinter by measuring apparent softening viscosity. *Ironmaking and Steelmaking*, 1989, vol.16, p.392-398.
- 3 BAKKER, T. e HEEREMA, R. H. – Determination of the fundamental mechanisms underlying softening and melting of blast furnace burden materials. In: *ICSTI/Ironmaking Conference Proceedings*, 1998, p.1597-1608.
- 4 Barnaba, P. - "Influence of chemical characteristics on softening and melting-down properties of iron and ore sinter" - *Ironmaking and Steelmaking* v.12(2), 1985, pp.53-63.
- 5 Ritz, V.J.; Kortmann, H. A.; Koch, K.; "Reduction, Softening and Melting Properties of Pellets, Sinters, Lumpy Ore and Mixed Furnace Burden", 1998 *ICSTI/Ironmaking Conference Proceedings*, ISS, Warrendale, PA, USA, pp. 1635-1654.
- 6 NOGUEIRA, P. F. – Blast Furnace Softening and Melting Phenomena. PhD Thesis - Carnegie Mellon Institute of Technology, The United States of America, 2003.
- 7 NOGUEIRA, P. F. – "Avaliação do Forno para Medidas de Propriedades a Alta Temperatura" - Relatório Interno da Gerência de Pesquisa e Desenvolvimento de Ferrosos GAFEP/GETEP/DIPE/CVRD – Junho 2005.
- 8 T. Sugiyama, S. Shirouchi, O. Tsuchiya, M. Onoda and I. Fujita: *Trans. ISIJ*, 23 (1983), 146.
- 9 LU, W. K. – Rate limiting steps and future development of blast furnace ironmaking. *ISIJ*, Proceedings of the sixty international iron and steel congress, 1990, Nagoya, 548-557.
- 10 Clixby, G.: "Influence of softening and melting properties of burden materials on blast furnace operation" - *Ironmaking and Steelmaking* v.13(4), 1986, pp.169-175.

- 11 YI, S., HUH, W., RHEE, H. e CHO, R. – Softening and melting properties of pellets for a high level of pulverized coal-injected blast furnace operation. Scandinavian Journal of Metallurgy, 1999, vol.28, p.260-265.