



**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS E DE**  
**PETRÓLEO**

**Estudo do comportamento das pelotas de minério de  
ferro ao se substituir a Bentonita por aglomerantes  
orgânicos**

*Trabalho de Formatura em Engenharia de Minas apresentado à disciplina PMI-500*

Aluno: Eric Augustin  
Orientador: Prof. Dr. Arthur Pinto Chaves  
Co-orientadora: Dra. Monica Speck Cassola  
Área: Tratamento de Minérios

**Novembro /2001**

## **Agradecimentos**

Ao IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológica do Estado de São Paulo S.A., que permitiu o desenvolvimento dos trabalhos em seu laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais (LTMRI), em especial a Dra Monica Speck Cassola, chefe do LTMRI pelo constante orientação e encaminhamento de todas as atividades, a Eng. Sandra Lúcia de Moraes, pela ajuda na confecção das pelotas, ao auxiliar Técnico Renildo Oliveira do Santos e a todos aqueles que de uma forma ou de outra contribuíram para a elaboração deste trabalho.

Ao Prof Dr. Arthur Pinto Chaves pela orientação e encaminhamento dos trabalhos.

Gostaria de agradecer também a Clariant pelo fornecimento dos reagentes, a FERTECO pela liberação dos resultados e a CVRD pela execução dos ensaios de bancada e piloto realizados em suas instalações em Vitória, ES.

## SUMÁRIO

GLOSSÁRIO DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....	4
SUMÁRIO DE TABELAS E FIGURAS.....	5
RESUMO.....	6
1. Objetivos.....	7
2. Introdução.....	8
3. Revisão da Literatura.....	9
3.1 O Alto Forno.....	9
♦ A Escassez de Oferta de Granulados.....	13
♦ Briquetagem.....	14
♦ Sinterização.....	15
♦ Pelotização.....	15
3.2 O Processo de Pelotização.....	16
♦ Variáveis de Processo.....	17
♦ Vantagens de Substituir a Bentonita.....	19
3.3 Histórico da Pelotização.....	20
4. Metodologia Adotada para Realização dos Ensaios.....	21
4.1 Materiais e Métodos.....	21
♦ Ensaios Ferteco.....	22
♦ Ensaios CVRD.....	24
♦ Teste Piloto Realizado na CVRD.....	24
5. Discussão dos Resultados.....	25
6. Conclusões.....	29
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	31
ANEXO I – Resultados obtidos com minério da FERTECO.....	33

## **GLOSSÁRIO DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS**

CMC =	Carboxi-Metil-Celulose
TPP =	Tripolifosfato de sódio
CVRD =	Companhia Vale do Rio Doce
IPT =	Instituto de Pesquisa Tecnológicas do Estado de São Paulo

## SUMÁRIO DE TABELAS E FIGURAS

### LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Resultados químicos, da umidade e densidade real.....	Anexo I
TABELA 2 - Resultados da análise granulométrica.....	Anexo I
TABELA 3 - Planilha dos ensaios de pelotização das amostras de “pellet feed” A e B ....	Anexo I

### LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Desenho Esquemático do Alto Forno.....	10
FIGURA 2 – Desenho Esquemático das Ventaneiras.....	12
FIGURA 3 – Prensa Hidráulica.....	14
FIGURA 4 – Sinterizador do Porto de Tubarão (Vitória).....	15
FIGURA 5 - Discos de pelotização.....	16
FIGURA 6 - Queima (em laboratório).....	16
FIGURA 7 - Gráfico da resistência a compressão à verde.....	Anexo I
FIGURA 8 – Gráfico da resistência a compressão à seco.....	Anexo I
FIGURA 9– Gráfico da resistência a compressão após choque térmico.....	Anexo I
FIGURA 10 - Gráfico da análise granulométrica da amostra A .....	Anexo I

## 1. Objetivos

Este trabalho tem por objetivo principal a análise do comportamento das pelotas de minério de ferro ao se substituir a Bentonita, analisando-se os seguintes aspectos:

- Resistência mecânica a verde e a seco;
- Comportamento da pelota durante a queima;
- Resistência mecânica após a queima.

## 2. Introdução

O Aço atualmente é o material de engenharia mais utilizado, por suas características mecânicas e por seu preço muito competitivo, porém com o progressivo esgotamento dos minérios mais ricos e naturalmente granulados, o que se tem feito é o aproveitamento das frações mais finas, juntamente com o beneficiamento de minérios mais pobres, que são cominuídos e flotados de modo a obter um concentrado rico em ferro, aglomerados de diversas formas para obter-se um produto com características mecânicas excelentes e teor de ferro adequado a produção de ferro gusa e conseqüentemente de aço.

Neste contexto, já a algum tempo vem se usando Bentonita como aglomerante para se obter pelotas de ferro com características mecânicas adequadas, no entanto estes contém alto teores de sílica e alumínio, o que pode parecer uma contradição, afinal faz-se um grande esforço para obter-se um concentrado de ferro de alto teor separando o ferro da sílica, naturalmente presente no minério, para então adicionar Bentonita que possui alto teor de sílica; assim, tem se trabalhado muito neste problema, para tentar eliminar a Bentonita do processo de modo a tornar mais eficiente e econômica a aglomeração de finos de minério de ferro.

Outro ponto relevante a se considerar é o baixo valor agregado que o minério de ferro possui, pois isto torna o desafio de encontrar um aglomerante que substitua a Bentonita com vantagem técnica e econômica, isto é, o custo por unidade de massa processada deve ser muito baixo de modo que este produto possa ser competitivo e ainda tenha as características necessárias ao seu processamento siderúrgico.

### 3. Revisão da Literatura

#### 3.1 O Alto Forno

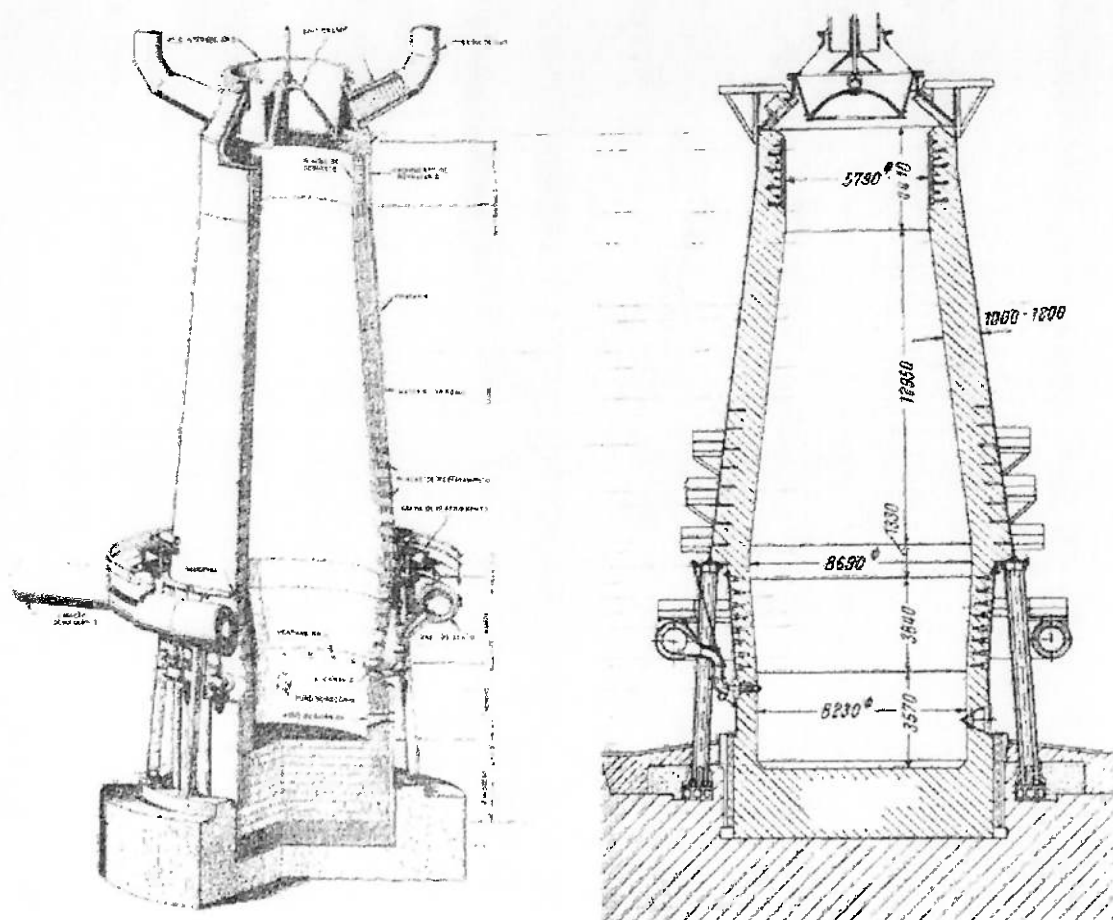
O Aço por ser um dos mais importantes produtos metalúrgicos utilizados pelo homem sempre foi tratado de uma forma diferenciada, e seu estudo há décadas se baseia na produção de grandes quantidades de material reduzido e fundido, o que levou ao desenvolvimento de fornos contínuos, que fossem capazes de reduzir o material, duas tecnologias são atualmente usadas; o Alto Forno e a redução direta sendo o Alto Forno de longe o mais importante.

A função do Alto Forno é reduzir o minério de ferro para obter-se a gusa, a qual é encaminhada até a aciaria para se transformar em aço que é o material de engenharia mais utilizado atualmente, desde a construção civil como armação metálica para o concreto armado, a fabricação de automóveis ou a confecção de quase todas as máquinas e equipamentos que utilizamos em nosso dia a dia. ARAUJO (1)

O Alto Forno é basicamente formado por quatro partes principais, como mostrado na figura 1, sendo estas:

- *Zona de Pré-aquecimento*: onde ocorre a secagem da carga e as reduções dos óxidos de ferro;
- *Zona de fusão dos materiais*: (cuba) onde ocorre a fusão tanto dos materiais reduzidos como dos não reduzidos, é onde se apresentam as temperaturas mais altas;
- *Zona de Combustão* (rampa): é área de alimentação para as zonas anteriores, neste ponto são adicionados os insumos ;
- *Cadinho*: é o recipiente no qual se acumulam as gusas e a escória fundidas antes de serem vazadas.





**Figura 1 – Desenho Esquemático do Alto Forno**

O revestimento interno do Alto Forno é constituído por material silico-aluminoso de alta qualidade, pois este tipo de material tem excelente característica refratária e, para prolongar a vida deste, existem nas paredes do interior do Alto Forno caixas de resfriamento, dentro das quais circula água de refrigeração.

Para a sustentação do peso da carga e do forno, o Alto Forno é geralmente montado sobre uma base de concreto ou outro tipo de fundação. Esta fundação deverá ser bem resistente, reforços de aço são instalados em toda a extensão do forno, de modo que este possa resistir ao esforço mecânico ao qual será submetido, uma vez que o refratário não tem grande resistência mecânica.

A capacidade de um Alto Forno é indicada pelo tamanho do cadinho. A experiência tem mostrado que à medida que o diâmetro do cadinho aumenta a produção cresce proporcional a sua área. A capacidade de produção ( $P$ ) é diretamente proporcional à capacidade de consumo de coque.

Assim  $P=Q/K$  onde:

- $Q \rightarrow$  Quantidade de coque consumida em 24 h

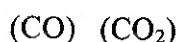
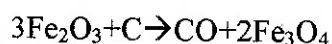
- $K \rightarrow$  Consumo específico de coque (tonelada de coque/tonelada de gusa), também chamado “coke rate”.

Para aumentar a produção de um Alto Forno faz-se necessário aumentar o consumo de coque ou diminuir o consumo específico de coque.

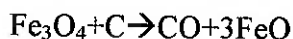
Para aumentar o consumo de coque temos algumas opções: aumentarmos as dimensões do forno, o que implica em grandes investimentos; ou melhoramos a queima injetando mais ar, o que pode ser conseguido de duas maneiras: aumentando a potência das ventaneiras ou melhorando a permeabilidade da carga, e neste último caso, os aglomerados de finos de minério de ferro possuem uma grande importância, pois além de permitirem o aproveitamento do que antes era um passivo ambiental, estes aglomerados têm também a característica de formarem uma camada mais permeável à passagem dos gases aumentando a produção, e por serem porosos, ao contrário do minério natural que é compacto, os aglomerados são mais fáceis e rapidamente reduzidos.

A metalurgia do aço consiste basicamente de 2 operações: a redução dos óxidos de ferro em alto forno e o refino da gusa nos fornos da aciaria. No Alto Forno ocorre a redução dos óxidos de ferro por meio de um redutor que é o coque metalúrgico. Desta maneira, o minério, o calcário e o coque, ao serem carregados de forma descendente no Alto Forno entram em contato com uma corrente ascendente de gases quentes, a uma temperatura de aproximadamente 150°C. A primeira modificação é a secagem do material com remoção progressiva da água higroscópica e posteriormente da água de cristalização que ocorre entre 200°C e 500°C.

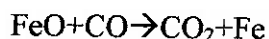
Dessa maneira, conforme a carga vai descendo ela vai se aquecendo até atingir 455°C quando começa a primeira reação de redução,



A partir de 570°C temos uma outra reação:

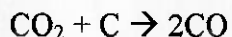


E finalmente a 710°C,

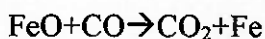
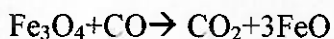
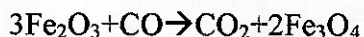


O monóxido de carbono, reagindo com óxidos de ferro, deles retira o oxigênio, surgindo assim, misturados com a carga os primeiros pedaços de ferro metálico em forma de ferro esponja.

A aproximadamente 800°C temos a decomposição do calcário ou do dolomito desprendendo-se dióxido de carbono que, ao entrar em contato com coque, forma monóxido de carbono, ou seja:



A quantidade de monóxido de carbono na carga vai aumentando gradualmente e a redução indireta dos óxidos de ferro vai se tornando mais intensa à medida que vai se aproximando das ventaneiras, de acordo com as seguintes reações:



Os óxidos são reduzidos do grau máximo de oxidação até seu grau mínimo em uma série de reações sucessivas, reversíveis e muito rápidas. No entanto, nem todo óxido é reduzido, uma parte chega até a zona de fusão sem nenhuma modificação.

A aproximadamente 18m de altura, a carga consiste em uma mistura de cal virgem, coque, quantidades variáveis de ferro metálico em estado esponjoso e minério de ferro não reduzido. Porém ao chegar à zona de fusão, a cal funde e mistura-se com a ganga do minério e com um pouco de ferro e manganês para formar a escória; o óxido de ferro funde-se com o coque e com o ferro esponja pouco acima das ventaneiras, como mostra a figura 2, onde ocorrem as reações de redução direta:

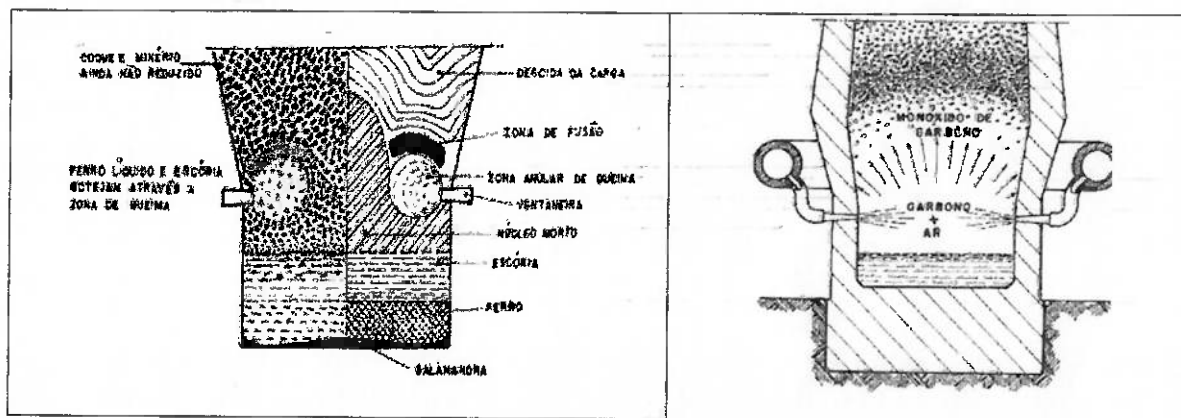
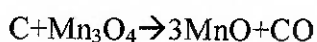
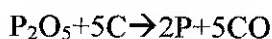
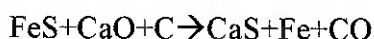
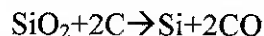
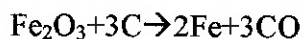


Figura 2 - Desenho Esquemático das Ventaneiras



Estas reações ocorrem a temperaturas entre 1200°C e 1500°C. Todas elas necessitam de grandes quantidades de calor que são fornecidas pelo coque, uma vez que a temperatura máxima alcançada é obtida na região das ventaneiras onde atinge cerca de 2000°C no caso de se utilizar vento pré-aquecido a 800°C.

Dessa maneira o ferro que chega aquecido à zona de temperatura mais elevada reage com o coque incandescente e absorve carbono formando carboneto de ferro (amentita), que se dissolve no ferro metálico formando o gusa.

Ao alcançar o cadinho a gusa se separa da escória por gravidade e formam duas camadas, uma inferior metálica formada pelos metais reduzidos e uma superior não metálica formada pela escória.

A escória é basicamente formada da ganga proveniente do minério, dos fundentes e das cinzas do coque, que chegando a região mais quente do forno reagem entre si e formam principalmente silicatos. Para obtenção dos melhores resultados em termos de produção de gusa a formação da escória só deveria ocorrer após a completa redução do ferro, porém na prática isso não ocorre e portanto os óxidos de ferro tomam parte na escória; outro fator importante da escória é a viscosidade, que para ser adequada ao funcionamento do Alto Forno deve ter uma composição apropriada e uma temperatura às vezes muito maior que a temperatura de fusão da escória (entre 200°C e 500°C) para que a fluidez da escória, permita que o material reduzido desça e se acumule na parte inferior do cadinho.

Uma outra condição necessária para que estas reações se processem, é a permeabilidade da carga aos gases quentes, pois como observado a maior parte das reações ocorrem em interfaces sólido-gás e, portanto se a carga não for permeável aos gases as reações podem não ocorrer adequadamente. Para isso necessitamos que a granulometria da carga seja apropriadamente granulada, para permitir a passagem dos gases da maneira mais uniforme possível, porém isto tem sido um desafio pois com o esgotamento dos minérios de ferro mais ricos, faz-se necessária o processamento de minérios mais pobres, no qual se inclui uma etapa de cominuição e concentração, necessitando-se a granulação dos concentrados. O que permite a utilização destes diretamente no Alto Forno.

### ♦ A Escassez de Oferta de Granulados

As reservas brasileiras, como em todo mundo, de minério de ferro possuem naturalmente grande parcela de material com granulação fina. Aliado a este efeito, existe ainda o itabirito, que se trata de um proto-minério que vem sendo beneficiado desde a década de 70, este proto-

se trata de um proto-minério que vem sendo beneficiado desde a década de 70, este proto-minério é constituído por minerais de ferro e quartzo, necessitando portanto de beneficiamento para sua purificação.

Para a separação da sílica da hematita faz-se necessário a cominuição até a liberação dos minerais, e posterior concentração, sendo os concentrados aglomerados, para permitirem sua utilização na produção de ferro gusa. LIMA(2), aponta essa tendência à aglomeração dos concentrados de minério de ferro, como resultado do fato de os grandes produtores, com o esgotamento progressivo dos minérios mais ricos, terem de tratar minérios mais pobres, removendo a sílica por flotação e produzindo concentrados finos em pó.

Os processos de aglomeração, devem conferir ao produto características mecânicas suficientes para resistirem ao manuseio, armazenagem, em uso atualmente são três: briquetagem, sinterização e pelotização.

#### ♦ Briquetagem



**Figura 3 – Prensa Hidráulica**

Embora industrialmente só seja usada para produzir agregados para redução direta, este é um importante método de aglomeração. A briquetagem consiste basicamente a aplicação de uma força confinante ao material a ser aglomerado que com o auxílio de um aglomerante. Após um certo período se desaplicada a força e o material permanece coeso. Na figura 3, temos apresentado a prensa hidráulica, equipamento no qual são determinadas as condições operacionais da briquetagem.

### ♦ Sinterização



**Figura 4 – Sinterizador do Porto de Tubarão (Vitória)**

A sinterização trata-se da fusão parcial de partículas em fração granulométrica não muito fina de modo que estas formem um leito sólido e poroso que permite a passagem dos gases mas que tenha resistência mecânica elevada que posteriormente será britada em tamanho adequado para a alimentação no alto forno. Na figura 4 temos apresentada a foto de um sinterizador industrial.

Embora a produção de sinter seja menos dispendiosa, para tal é necessário que 90% do minério ou concentrado tenha granulometria superior à malha 100 (0,150 mm) e este é um problema pois freqüentemente têm-se minérios mais finos ou que necessitam de uma moagem mais intensa para obter a liberação da sílica e portanto tenha granulometria mais fina que a necessária para produzir sinter, pois se a granulometria for muito fina estes grão mais finos prejudicam a permeabilidade da camada.

### ♦ Pelotização

A pelotização consiste no rolamento das partículas, muito finas, de modo que estas vão se adsorvendo e formando esferas que por força da tensão superficial da água e da tensão neutra permanecem coesas, na figura 5 temos a foto de um disco de pelotização. As esferas formadas são posteriormente submetidas à queima, conforme foto apresentada na figura 6, onde ocorre uma pré-sinterização do material, obtendo-se assim uma grande resistência mecânica final das pelotas, as quais resistem ao manuseio, até o processamento no Alto Forno.





**Figura 5 - Discos de pelotização**



**Figura 6 – Queima (em laboratório)**

### **3.2 O Processo de Pelotização**

A pelotização ocorre pela aglomeração de partículas muito finas que são aderidas por um filme de água e são mantidas unidas pela tensão superficial (tensão neutra) e por efeito de um aglomerante que é adicionado ao minério, classicamente a Bentonita, que tem como função atribuir características de resistência à pelota e para evitar seu colapso, quando submetidas aos esforços resultantes do manuseio, ou quando aquecidas rapidamente (choque térmico) pois o volume de gases formados no interior da pelota resultante da vaporização da água pode fazer com que ela se degrade.

## ◆ Variáveis de Processo

Segundo BOHOMOLETZ (3) as pelotas são formadas por um conjunto fundamental no qual, a água envolve o minério com um filme d'água de modo que vários conjuntos fundamentais formem um núcleo que busca, por efeito da tensão superficial, o estado mais estável e a forma que permita o estado de menor energia, sendo que o crescimento destes núcleos pode ocorrer de 3 (três) modos:

- Adsorção de partículas secas pelo núcleo
- Adsorção pelo núcleo de outros núcleos
- Adsorção pelo núcleo de conjuntos fundamentais

Portanto na pelotização a umidade é uma variável crítica, pois a força que mantém as partículas unidas advém da tensão neutra de uma película de água que se forma entre as partículas e é decorrente do preenchimento total dos poros pela água, sem que haja excesso, pois neste caso, a pressão hidrostática causada pela água acaba por anular a tensão neutra.

Outro fator de grande importância para a pelotização é a granulometria do material, pois não é possível pelotizar materiais com granulometria grosseira, e desta forma, os materiais com granulometria fina, geralmente menores que a malha 200 (0,074 mm) são utilizados industrialmente para a produção de pelotas de minério de ferro, porém, não é só o tamanho do grão que importa pois embora este esteja ligado à área específica (quanto menor o grão maior a área específica), a forma do grão tem grande influência muito grande sobre essa variável uma vez que a coesão entre as partículas é proporcional a área específica.

Deste modo, a resistência da pelota verde é diretamente proporcional à porosidade, ao ângulo de contato e à tensão superficial e inversamente proporcional ao tamanho das partículas. Outro fator importante mencionado por ROORDA et al (4) é a viscosidade do fluido intersticial; resultados de ensaio de quedas repetidas mostraram uma estreita relação entre viscosidade e a resistência das pelotas. Existe, no entanto, um limite para o aumento da uma vez que este prejudica a cinética do processo de pelotização elevando os custos do aglomerante pois a pelota é um produto de baixo valor agregado, além disso a adição de aglomerante em grandes quantidades pode tornar a pelota muito plástica e portanto susceptível a grandes deformações no manuseio.

Por outro lado a resistência da pelota seca e após o choque térmico depende de outros fenômenos como a formação de pontes de ferro, ligações tipo cerâmica e fusões pontuais que aumentarão a resistência da pelota.



Assim as ligações sólidas que dão resistência à pelota são:

- Intercrescimento dos grãos cristalinos: esta é a mais importante nas pelotas;
- Por reações químicas;
- Por fusão nos pontos de contato; formam-se ligações de material fundido e perde-se a porosidade da pelota;
- Por endurecimento do ligante;
- Por cristalização de materiais dissolvidos, estes formados por materiais adicionados na pelota ou constituintes dos grãos;

A fase sólida formada durante o choque térmico promove a ligação, capturando os grãos de ferro de uma massa vítrea e também por simples reação com a superfície do grão.

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.

MENDES (5) destaca que a resistência das pelotas queimadas é obtida por um mecanismo de ligação dos grãos que se passa durante o tratamento pirometalúrgico. A recristalização dos grãos e a formação de escória são os principais responsáveis.

Da recristalização, proveniente de reações físicas que ocorrem durante o processo, resulta a ligação dos grãos, dando lugar a grãos maiores. Da formação de escória, resultante de reações químicas que ocorrem entre elementos básicos e ácidos da ganga de minério, do argilo-mineral adicionado como ligante, 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.

O trabalho de ULRICH e HAN *apud* LIMA (1), é um dos primeiros a evidenciar a influência decisiva da formação dessas novas fases nas pelotas em altos-fornos como nos fornos de redução direta. Em resumo, são as novas fases e a recristalização dos diminutos grânulos que se inserem entre os cristais de hematita lamelar que dão, às pelotas queimadas, o conjunto de propriedades de resistência mecânica, de porosidade, de condutibilidade térmica e de redutibilidade necessárias ao bom funcionamento dos fornos de redução. Esse produto apresenta comportamento melhor que o das cargas de minérios naturais, o que explica os ganhos e produtividade e economia de redutor nos altos-fornos.

ARIAS E MANNHEIMER *apud* LIMA (1), 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, a recristalizar e a crescer.

Essas partículas se distribuem entre grânulos lamelares maiores; estes, por sua vez, apenas evidenciam a formação de protuberância. A essa 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 ULTRICH e HAN *apud* LIMA (1) atribuem à natureza de ferrato.

### ♦ Vantagens de substituir a Bentonita

O aglomerante mais difundido para aplicação em minério de ferro é a Bentonita. Este argilo-mineral tixotrópico confere as pelotas às características desejadas, tem baixo custo, não prejudica o comportamento metalúrgico das pelotas e mantém-se estável mesmo em altas temperaturas. Entretanto, possui alto teor de sílica e alumínio. Aliado a isto, a quantidade adicionada é relativamente elevada (da ordem de 0,5% a 1% em peso) que tem que ser escorificado diminuindo o volume útil do forno e prejudicando o desempenho dos fornos de redução direta, que necessitam de pelotas com baixo teor de contaminantes.

Outro fator que se deve considerar é que principalmente no caso dos aglomerantes orgânicos estes não sofrem variação de qualidade pois se tratam de produtos artificiais e a quantidade a ser adicionada é muito menor (da ordem de 0,1%) o que possibilita um melhor aproveitamento do forno e portanto uma economia mesmo considerando o alto custo destes reagentes.

Sendo assim, no processo tradicional, a adição de Bentonita como aditivo de aglomeração na operação de pelletização apresenta alguns problemas, quais sejam:

- a quantidade a ser acrescentada à pelota é relativamente grande, da ordem de 0,5% em peso;
- não uniformidade de fornecimento;
- custo elevado de manipulação dos “big bags” de Bentonita;
- poeiras silicosas no momento da adição de Bentonita ao minério na etapa de mistura;
- reincorpora contaminantes de sílica removidos na etapa de beneficiamento do minério de ferro;
- deixa resíduo característico das argilas: sílica e alumina, que tem que ser escorificados, diminuindo, portanto, o volume útil do forno.

### 3.3 Histórico da Pelotização

A pelletização vem sendo estudada desde o início do século XX, quando em 1911 ANDERSON (6) fez tentativas de produzir aglomerados rolando finos de minério de ferro em um tambor. Ele já recomendava o uso de reagentes que melhorassem as características mecânicas das pelotas. Outros pesquisadores deixaram também sua contribuição no desenvolvimento do processo de pelletização de minérios de ferro, especialmente na América do Norte com os concentrados de taconito; em 1951 foram instaladas as primeiras usinas de pelletização do mundo nos EUA e na Suécia.

No Brasil, em 1961, a Companhia Vale do Rio Doce (CVRD) firma um convênio com o IPT para executar ensaios de desenvolvimento de pesquisa de pelletização e em 1969 começa a operar a primeira usina industrial de produção de pelotas de ferro na cidade de Vitória – ES.

A pelletização historicamente teve grande importância na indústria do aço pois BUNGE et al (7) destaca que pelotas de alta qualidade e alto teor aumentam significativamente a produção do Alto Forno. LIMA (1) aponta que a utilização de pelotas permitiu que se mantivesse o custo do metal líquido estável em um período de aumento de custo de mão de obra. Além disso, permitiu que se tivesse um aumento de produtividade, sem o correspondente investimento em ampliação da capacidade, o que permitiu um aumento de competitividade nesta época.

Atualmente vários produtos vêm sendo estudados, tais como a carboxi-metil-celulose (CMC), goma guar, hemicelulose, poliacrilatos, amidos e outros. As desvantagens verificadas na prática são principalmente o custo destes produtos, a possibilidade de deterioração e o mau comportamento no choque térmico.

LIMA (1) em 1992 estudou o uso do CMC que anteriormente tinha obtidos resultados muito ruins como resistência mecânica baixa e grande deformação da pelota, inclusive com seu peso próprio, mas estes problemas foram solucionados com a adição de um dispersante, o Tripolifosfato de Sódio (TPP).

CASSOLA E CHAVES (8) em 1993 trabalharam com produtos químicos da Hoechst do Brasil (atual Clariant) e os ensaios demonstraram que o dispersante sozinho era mais efetivo do que o uso de CMC + dispersante e isto permitiu a elaboração de uma nova hipótese de ação dos aditivos sobre os finos presentes na pelota; **“o efeito verdadeiramente importante na aquisição de propriedades mecânicas pela pelota era devido ao efeito do dispersante e não ao do ligante orgânico”**.

## 4. Metodologia Adotada para Realização dos Ensaios

### 4.1 Materiais e Métodos

#### ➤ Ensaios de pelotização

As alíquotas de minério de ferro utilizadas nestes ensaios, foram quarteadas em alíquotas de cerca de 5,0 kg de mistura: minério + aditivo de pelotização. À cada ensaio tomava-se uma alíquota da minério, a qual era adicionado determinado aglomerante para posterior confecção das pelotas.

A homogeneização foi realizada utilizando-se misturador para laboratório marca *Fungel*, com capacidade de 10 kg. Preparou-se sempre um lote de no mínimo de 5,0 kg para os ensaios de pelotização, de cada composição. Os ensaios foram realizados com minério úmido, tal qual, sendo que a quantidade de reagentes foi calculada com base na massa de minério seco.

A pelotização foi efetuada em disco de pelotizador de 1,2 m de diâmetro com rotação de 20 rpm e inclinação de 45°. As pelotas obtidas nesta fase foram submetidas a alguns dos ensaios de caracterização. Antes e após os ensaios de pelotização, foram controlados os diferentes fatores que poderiam afetar os ensaios:

- teor de umidade das matérias primas;
- tamanho médio e distribuição das partículas;
- molhabilidade das matérias primas;
- natureza e quantidade de ligante dosado às matérias primas;

#### ➤ Caracterização das pelotas

Descreveremos a seguir todos os ensaios de caracterização de pelotas:

- **Determinação da umidade da pelota verde (crua) até peso constante**

Após a pelotização, cerca de 500 gramas de pelotas foram amostradas aleatoriamente e secas em estufa a 105°C até peso constante.

- **Resistência à compressão da pelota verde (crua)**

Do lote experimental foram amostradas aleatoriamente 10 pelotas. Uma após a outra foi submetida à compressão em prensa automática apropriada até a ruptura. Neste momento a carga foi anotada. A média aritmética dos valores encontrados representa o resultado do ensaio e exprime-se por: kgf/pelota.

- **Resistência à compressão da pelota seca**

Este ensaio é similar ao anterior, mas diferencia-se no fato que o lote de 10 pelotas foi amostrado do material seco em estufa na temperatura de 105°C, até peso constante. Após o

resfriamento ao ar, as pelotas foram submetidas ao ensaio de compressão. O resultado é expresso em kgf/pelota.

- **Número de quedas repetidas da pelota verde (crua)**

O ensaio consiste da amostragem de 10 pelotas aleatoriamente no lote experimental e em seguida, deixadas uma a uma caírem livremente de uma altura de 45 cm, sobre uma chapa de aço até o aparecimento de fissuras. Registra-se o número de quedas para cada pelota. A média aritmética desses valores expressa o resultado do ensaio, em número de queda/pelota.

- **Resistência à compressão após choque térmico**

Este ensaio define o poder de aglutinação do aglomerante e a possibilidade de aparecimento de trincas e fissuras. Do lote de pelotas verdes amostrou-se aleatoriamente 4 grupos de 15 pelotas cada. Em seguida, cada grupo, um após o outro, foi submetido à ação de ar quente em estufa ou mufla, variando-se a temperatura (300°C, 500°C, 700°C e 900°C) e adotando-se o tempo de permanência de 10 minutos em cada temperatura. Do lote de 15 pelotas submetidas ao choque térmico amostrou-se 10 pelotas aleatoriamente nas quais mediu-se a resistência à compressão.

- **Resistência à Queima – “POT GRATE”**

Este ensaio, realizado somente na etapa de testes piloto, simula o tratamento térmico realizado industrialmente em forno de grelha móvel, da tecnologia Lurgi-Dravo. As pelotas cruas são distribuídas sobre uma camada de forramento de pelotas queimadas, dando início as etapas de tratamento térmico: secagem ascendente, secagem descendente, pré-queima, queima, pós-queima e resfriamento. Avalia-se o aparecimento de trincas e fissuras., a resistência à compressão, a distribuição granulométrica, o índice de tamboreamento e as propriedades metalúrgicas.

## ♦ Ensaio FERTECO

O roteiro dos trabalhos consistiu da avaliação do comportamento de diversas famílias de aditivos orgânicos e inorgânicos, em dosagens variadas e a caracterização dos produtos aglomerados pelo processo de pelletização quanto à sua resistência mecânica.

Os trabalhos foram desenvolvidos em escala de bancada com minério da Ferteco e, as amostras de *pellet-feed* foram homogeneizadas em pilha alongada, em laboratório, sem secagem, e amostradas para os ensaios de análise granulométrica, análise química, determinação da umidade e preparação de misturas com os aditivos de aglomeração. Estes ensaios de caracterização tiveram por objetivo avaliar as características físicas da matéria-prima. A umidade da amostra foi determinada por secagem em estufa a 105°C até peso constante.

A densidade real das amostras foi determinada em picnômetro e a dosagem dos óxidos foi feita por via úmida. A análise granulométrica foi realizada por peneiramento a seco na série Tyler de peneiras.

Na composição da mistura, utilizaram-se os diferentes aditivos de aglomeração, produtos comerciais de linha da indústria química ou da área de desenvolvimento, razão pela qual deixamos de fornecer as suas características estruturais e físico-químicas.

Os aditivos, em alguns ensaios, foram dissolvidos/diluídos com agitação branda em agitador/aquecedor magnético e a baixas temperaturas, de forma a evitar alguma possível alteração. As adições de aditivos nas misturas foram variadas de 0,035% até 0,20%.

Os ensaios de caracterização tiveram por objetivo avaliar as características físicas da matéria-prima. A umidade da amostra foi determinada em estufa a 105°C até peso constante. A densidade real das amostras foi determinada pelo método do picnômetro, a dosagem dos óxidos foi feita por via úmida e a análise granulométrica foi realizada por peneiramento a úmido na série Tyler de peneiras. O resultado encontra-se no ANEXO I

Na composição da mistura, utilizaram-se os seguintes ligantes: Tylose CR700, Tylose CR1500, Tylose C1500, P/D2114/05, P/D2114/E24, P/D2114/E11, P/D2114/69, P/D2114/E12, P/D2114/21, Fongrabond, TPP, cal hidratada, calcário e Bentonita. Estes três últimos são produtos comerciais e foram considerados como referência. Os aglomerantes orgânicos são produtos comerciais de linha ou de desenvolvimento da Clariant, razão pela qual deixamos de fornecer suas características estruturais e físico químicas.

Os aglomerantes, em alguns ensaios, foram colocados em solução aquosa com agitação branda em agitador/aquecedor magnético e a baixas temperaturas, de forma a evitar alguma possível alteração, com exceção da cal hidratada, calcário e Bentonita que foram sempre adicionados secos. As concentrações dos aglomerantes nas soluções foram variadas, devido a alta viscosidade dos reagentes, em particular do Tylose CR1500. A cada manhã preparava-se a solução ligante para aquele dia, ao fim do qual a solução remanescente era descartada.

Ensaio adicionais foram realizados, para melhor compreensão do fenômeno e também avaliação da influência da gênese no comportamento do minério de ferro processo de pelotização.

Os resultados dos ensaios com o minério da FERTECO estão apresentados neste trabalho no ANEXO I.

## ◆ Ensaios CVRD

O roteiro dos trabalhos consistiu da avaliação do comportamento de diversas famílias de aditivos orgânicos e inorgânicos, em dosagens variadas e a caracterização dos produtos aglomerados pelo processo de pelotização quanto à sua resistência mecânica.

Os trabalhos foram desenvolvidos em escala de bancada com 3 minérios da CVRD, e as amostras de *pellet-feed* foram homogeneizadas em pilha alongada, em laboratório, sem secagem, e amostradas para os ensaios de análise granulométrica, análise química, determinação da umidade e preparação de misturas com os aditivos de aglomeração. Estes ensaios de caracterização tiveram por objetivo avaliar as características físicas da matéria-prima. A umidade da amostra foi determinada por secagem em estufa a 105°C até peso constante. A densidade real das amostras foi determinada em picnômetro e a dosagem dos óxidos foi feita por via úmida. A análise granulométrica foi realizada por peneiramento a seco na série Tyler de peneiras. O restante da metodologia foi a mesma utilizada nos ensaios da FERTECO.

A apresentação das planilhas de ensaios com os resultados destes ensaios nas demais amostras, não estão contemplados neste trabalho por não ter sido obtida a autorização formal da empresa, no entanto as conclusões estão contempladas. Na sequência foram programados ensaios de piloto, com os reagentes que obtiveram melhor resultado na bancada, que tiveram por objetivo apresentar comparar os resultados obtidos nos ensaios de aglomeração de minério de ferro, em escala de bancada e piloto (contínua), visando comparar as metodologias de confecção e caracterização das pelotas produzidas no IPT e na CVRD – Vitória; na ocasião foram utilizados três tipos de minério, por aglomerante utilizou-se o padrão Bentonita e aglomerantes orgânicos.

## ◆ Teste Piloto realizado na CVRD

Os trabalhos nesta fase da pesquisa tinham por objetivo realizar ensaios contínuos de pelotização em escala piloto e comparar os resultados obtidos com os resultados da escala descontínua utilizando-se os aditivos de aglomeração definidos na escala de bancada e caracterizar as pelotas produzidas. Utilizou-se a amostra RM-21.

Os ensaios de pelotização foram divididos em duas etapas, sendo a primeira a pelotização utilizando o aglomerante padrão Bentonita nas condições operacionais padrão da unidade industrial e a segunda, ensaios de pelotização utilizando-se o aglomerante CVRD-17 em diversas dosagens.

A homogeneização foi realizada utilizando-se misturador piloto, preparou-se um lote com 123 kg de minério e 0,5% de Bentonita União, o tempo de homogeneização foi de cerca de 2 (dois) minutos, após o qual o material foi descarregado sobre uma esteira que alimentava o desagregador e em seguida colocado manualmente no alimentador de correia que alimentava continuamente o disco de pelletização, e o mesmo procedimento foi repetido com o CVRD-17 em diversas dosagens.

#### ➤ **Dificuldades operacionais encontradas na confecção das pelotas em escala piloto**

No decorrer da realização dos ensaios para avaliar o comportamento dos novos ligantes com a Bentonita, encontramos algumas dificuldades operacionais pré-estabelecidas para a Bentonita, CASSOLA(9), inadequadas para os novos aglomerantes, quais sejam:

- manutenção de uma camada de minério encharcada com água, no fundo do leito do disco;
- utilização de quantidade de água excessiva durante a pelletização, tendo por finalidade obter pelotas cruas em níveis de 10% de umidade;
- distribuição granulométrica sem limite de faixa, na bancada produzia-se pelotas de 10 a 12 mm;
- a forma de descarga das pelotas produzidas ao longo do ensaio contínuo foi o de acondicioná-las em caixinhas cúbicas de 30x30x30 cm;
- os equipamentos de medição de resistência à compressão possuem uma dependência do operador na unidade piloto CVRD.

## **5. Discussão dos Resultados**

#### ➤ **Avaliação dos resultados FERTECO**

A substituição da Bentonita como aditivo de pelletização de minério de ferro, cuja influência na conformação de uma pelota já foi amplamente estudada no passado, por outros insumos de origem química, cuja influência ainda é desconhecida, foi o principal desafio deste trabalho, aliada a otimização da taxa de umidade e do nível de dosagem dos aditivos.

Observando os dados podemos verificar que os melhores resultados de resistência a verde foram obtidos com o uso de dispersantes como o TPP e com os reagentes orgânicos que possuem o mesmo mecanismo de ação.



Assim podemos observar que o CMC sozinho não traz resultados satisfatórios, porém quando usado conjuntamente com o TPP atribui as pelotas uma resistência satisfatória.

O uso de TPP sozinho apresentou bons resultados, superiores que a Bentonita tanto a verde quanto a seco, porém a umidade torna-se um fator crítico, pois se esta não for bem controlada a pelota verde pode apresentar comportamento viscoso e a sua resistência após a choque térmico foi considerada satisfatória apesar de ser inferior que a Bentonita.

Os fongrabond (0,15% e 0,20%) também obtiveram resultados muito bons a verde e a seco devido a sua ação dispersante, mas também apresentaram problemas com a umidade pois se esta estivesse excessiva as pelotas adquiririam comportamento viscoso, e a sua resistência após choque térmico foi um pouco inferior a da Bentonita mas ainda assim satisfatória.

#### ➤ **Avaliação dos resultados CVRD**

Os resultados obtidos com o minério da CVRD mostraram que era possível obter pelotas com características semelhantes, ou em alguns casos até superior ao obtido com a Bentonita, o que nos levou a selecionar estes aglomerantes para se fazer um estudo no sentido de melhorar a dosagem de reagente e então prosseguir para um ensaio em escala piloto nas instalações da CVRD em Vitória, ES.

#### ➤ **Avaliação dos resultados em escala piloto CVRD**

O minério RM-21, que estava sendo ensaiado, foi amostrado na unidade industrial, sendo sua umidade de 9,6%, valor este considerado excessivo pelos técnicos da unidade industrial, pois o normal é inferior a 9,0, no entanto, para pelotização com a Bentonita esta variação de umidade não é importante.

Na sequência foi realizado um ensaio com o aglomerante CVRD-17, nas condições do teste de referência, ou seja, não foi removido o fundo de minério existente no disco de pelotização e foi mantido o encharcamento desta camada e a adição de água tradicional, o que trouxe algumas dificuldades quando da utilização do aglomerante CVRD-17, o qual expulsa por capilaridade o excesso de água utilizada durante o processo de pelotização.

O princípio de atuação dos aglomerantes alternativos baseia-se no fato de que o efeito da mistura minério+aditivo 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 presentes na superfície dos grãos, constatando que é o fenômeno de dispersão destas partículas que assegura a viscosidade intersticial necessária para manter a pelota verde estável, e permite a formação de películas de óxido de ferro intergranulares, e 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.

A umidade da pelota ao final do ensaio foi de 8,5%, valor considerado abaixo do normal; no entanto, a água da camada mais externa não permitia a obtenção de pelotas verdes com boas características, ficando o manuseio destas prejudicado.

As características para a pelota seca e pelota queimada atingem valores similares aos obtidos com a Bentonita, sendo inferior o índice de fissuras ou trincas. No teste de "POT GRATE" a queima ocorre num recipiente cilíndrico à temperaturas de até 1350°C, e no caso das pelotas obtidas com o aglomerante CVRD-17, ao serem introduzidas neste recipiente, devido a excessiva umidade da camada superficial, estas ficaram parcialmente aderidas umas as outras, formando cachos, o que dificultou a realização dos ensaios complementares de caracterização após queima como abrasividade e compressão.

Constatou-se que o aglomerante CVRD-17 é extremamente ativo e o fator umidade é de suma importância, o excesso de água é expulso para a borda da pelota, o que não permite a obtenção de pelotas verdes com as devidas características plásticas requeridas. Tendo por objetivo conhecer um pouco melhor a ação do aglomerante, optou-se por realizar ensaios visando melhorar a retenção de água no interior da pelota, utilizou-se um nível de dosagem de 0,025% de aglomerante e adicionou-se Bentonita na razão de 0,10%. As características da pelota verde melhoraram sensivelmente, no entanto, observava-se ainda a intensa atuação do CVRD-17 no minério, sugerindo que poderíamos reduzir o nível de adição dos aglomerantes.

## 6. Conclusões

A presente pesquisa foi desenvolvida visando identificar dentre as famílias distintas de aditivos de aglomeração, aquela capaz de substituir a Bentonita com vantagens técnico-econômicas, ou seja, aditivos que não incorporem impurezas às pelotas, que não deixem resíduo ao serem queimadas, resultem num custo global mais baixo e facilidade de manuseio, adicionáveis na forma líquida ou em pó, proporcionem uniformidade de qualidade no fornecimento, pelotas menos abrasivas.

Para que a estes aditivos sejam eficientes eles necessitam ter uma ação de dispersão das limonitas e outros minerais secundários de ferro, p.ex. as goethitas, da superfície das partículas de hematita que é o mecanismo fundamental para o processo, assegurando a obtenção da viscosidade necessária para manter a pelota verde estável e permitindo formação de películas de

óxido de ferro que auxiliam 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.

A conclusão é um modelo para a ação destes ligantes, em que o mecanismo fundamental é a dispersão das partículas coloidais que acompanham o minério. Esta dispersão pode ser conseguida por quaisquer produtos químicos que possuam esta ação. Em especial, os aditivos que não aportem contaminações indesejáveis para a pelota (Al, Si, P, S, Na) são adequados, sendo desejável ainda a possibilidade de se obterem resultados mecânicos melhores que os fornecidos pelos ligantes convencionais.

O trabalho foi realizado baseando-se na hipótese formulada por CASSOLA E CHAVES(3) de que o efeito da mistura CMC/TPP era decorrente de dois mecanismos diferentes que se somavam para dar o resultado final:

- viscosidade da solução de CMC, que auxiliava o mecanismo de ação capilar e a manutenção da coesão das partículas na pelota verde;
- ação dispersante do TPP, que dispersava as partículas coloidais de limonita presentes na superfície das partículas de hematita. Esta dispersão, por sua vez agia de duas maneiras: aumentando ainda mais a viscosidade da solução de CMC (contribuindo assim para a estabilidade da pelota verde) e durante o choque térmico, promovendo a formação de pontes de óxido de ferro, mecanismo reconhecido para a sinterização das partículas da pelota submetida ao choque térmico.

Dessa maneira podemos verificar que o efeito de dispersão é o mecanismo mais importante para o processo de pelletização. Ele assegura a viscosidade necessária para manter a pelota verde estável, e permite a formação de pontes de óxido de ferro que ajudam a estabilidade da pelota submetida ao choque térmico. Tudo isto sem prejuízo da ação dos outros mecanismos de aglomeração, tais como, ligação por escórias, fusão de pontos ou por sinterização de pontos.

Demonstra-se ainda que os resultados podem ser superiores aos obtidos com a Bentonita, calcário e a cal de modo que a substituição é possível e com a vantagem de não agregar contaminantes a pelota uma vez que o aglomerante orgânico é queimado e totalmente eliminado durante a sinterização.

A microestrutura afeta as propriedades mecânicas de materiais em geral, e têm sido ultimamente estudados para ligas e materiais cerâmicos.

Os minérios e rochas são materiais naturais e apresentam estrutura interna diferenciada, dependendo de sua gênese e do processo de desmonte e beneficiamento, verificou-se que cada minério possui um comportamento diferenciado no processo de pelletização quanto a umidade e resistência mecânica, mesmo trabalhando com Bentonita, para os aglomerantes de origem química esta diferença tornou-se mais acentuada.

Desta forma verificou-se que as pelotas obtidas com reagentes orgânicos tem o mesmo desempenho e qualidade (em alguns casos até superior) que as obtidas com Bentonita com a vantagem de não possuírem contaminações de sílica e alumínio além de possuir uma vantagem adicional que é a uniformidade na qualidade de fabricação dos aglomerantes orgânicos em comparação com a Bentonita, que trata-se de um produto natural e portanto esta sujeito a variações de composição química e qualidade.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### *Bibliografia Referendada*

1. ARAUJO, L. A. *Siderurgia*. SP, FTD. 1967
2. LIMA, J.R.B.; CHAVES, A.P. Estudo da carboxi-metil-celulose como aglomerante para pelotizacao. São Paulo, 1991.
3. BOHOMOLETZ, P. M. Pelotização de minério de ferro. Boletim do Instituto Brasileiro de Siderurgia, V. 1, N. 7, 1967.
4. ROORDA, H. J. et al. Organic binders for iron-ore agglomeration. International mineral processing congress, 11. Instituto di Arte Mineraria, Cagliari, 1975.
5. MENDES, M. M. A. Notícias sobre o processo de pelotização de minério de ferro. Boletim da Associação Brasileira de Metais, V. 17, N. 85, 1964.
6. ANDERSON, A. G. Briquetting ores. FR. N. mai 1913.
7. BUNGE, F. H.; WAKEMAN, J. S. A pesquisa sobre pelotização de minério de ferro; sua correlação com usinas em operação Metalurgia. ABM, V. 24, n 129, P.619-33, 1968.
8. CASSOLA, M. S.; CHAVES, A. P. Efeito da adição de aglomerantes orgânicos no comportamento das pelotas de minério de ferro. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MINÉRIO DE FERRO: Caracterização, Beneficiamento e Aglomeração, 1º., Ouro Preto, 1996. *Anais*. São Paulo: ABM. 1996. v.1., p.95-109.
9. CASSOLA, M. S.; MORAES, S. L. Comparação de metodologias de caracterização de produtos da aglomeração de finos de óxido de ferro. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 56º., Belo Horizonte, 2001. *Anais*. São Paulo: ABM, 2001. v.1., /em cd-rom/

### *Bibliografia Pesquisada*

- CASSOLA, M. S.; CHAVES, A. P. Effects of the addition of organic binders on the behaviour or iron ore pellets. **Kona Powder and Particles**, Osaka, v.16, p.136-142, 1998.
- CASSOLA, M. S.; MORAES, S. L.; TUMOLO, M. F. **Aglomeração de finos de óxido de ferro – Resíduo Industrial**. São Paulo: IPT, 2001. 7p. (Publicação IPT 2741)
- CASSOLA, M. S., CHAVES, A. P. **Effects of the addition of organic binders on the behaviour of iron ore pellets**. São Paulo: IPT, 2001, 24p. (Publicação IPT 2713)

- CASSOLA, M. S.; TUMOLO, M. F.; MORAES, S. L. Aglomeração de finos de óxido de ferro – Resíduo Industrial. In: SOUTHERN HEMISPHERE MEETING ON MINERAL TECHNOLOGY, 6º, ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 18º., Rio de Janeiro, 2001. **Anais.** Rio de Janeiro: CETEM, 2001. v.3., p.194-198.
- CASSOLA, M. S.; MORAES, S. L. Comparação de metodologias de caracterização de produtos da aglomeração de finos de óxido de ferro. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 56º., Belo Horizonte, 2001. **Anais.** São Paulo: ABM, 2001. v.1., /em cd-rom/
- CASSOLA, M. S.; MORAES, S. L. Comparação de metodologias de caracterização de produtos da aglomeração de finos de óxido de ferro. In: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO, 31º, SEMINÁRIO DE CONTROLE QUÍMICO EM METALURGIA, 15º, SEMINÁRIO DE CARBOQUÍMICOS, 11º., Santos, 2000. **Anais.** São Paulo: ABM, v.1., p.131-144.
- CASSOLA, M. S.; MORAES, S. L. Estudo do reaproveitamento de finos de minério de níquel. In: SEMINÁRIO DE METAIS NÃO FERROSOS, 10º., São Paulo, 2002. / no prelo/
- CASSOLA, M. S.; CHAVES, A. P. Aglomeração de finos de óxido de Ferro – Resíduo Industrial. In: SEMINÁRIO NACIONAL SOBRE REUSO/RECICLAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS. São Paulo, 2000. **Anais.** São Paulo: CETESB/FIESP. 2000. v.1., /em cd-rom/
- CASSOLA, M. S.; TUMOLO, M. F.; MORAES, S. L. Aglomeração de finos de óxido de Ferro – Resíduo Industrial. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MINÉRIO DE FERRO: Caracterização, Beneficiamento e Aglomeração, 2º., Ouro Preto, 1999. **Anais.** São Paulo: ABM. 1999. v.1., p.247-265.
- Norma IT 216 Determinação da umidade. Companhia Vale do Rio Doce. ES, 1998.
- Norma IT 417 Amostragem, identificação e preparação de amostra de pelotas cruas para testes físicos Companhia Vale do Rio Doce. ES 1998
- Norma IT 517 Determinação do número de quedas de pelotas cruas e resistência a compressão de pelotas cruas e secas. Companhia Vale do Rio Doce. ES 1998
- Norma IT 817 Amostragem, identificação e preparação de amostras de pelotas queimadas para testes físicos, químicos e metalúrgicos. Companhia Vale do Rio Doce. ES, 1998.

## **Anexo I**

### **Resultados obtidos com o minério da FERTECO**

## Anexo I – Resultados obtidos com o minério da FERTECO

Apresentamos neste anexo os ensaios em escala de bancada realizados com o minério da FERTECO, por serem os mais conclusivos e interpretativos do fenômeno que ocorre no decorrer do processo de pelletização com os aglomerantes alternativos à Bentonita.

A amostra de “pellet-feed” denominada A foi fornecida pela FERTECO, sendo esta homogeneizada em pilhas alongadas, sem secagem, e amostrada para análise granulométrica, análise química, determinação de umidade e preparação de mistura com os aglomerantes..

Tabela 1: Resultados químicos, da umidade e densidade real.

Amostra	Umidade (%)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Óxidos(%)			
			P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
A-FERTECO	9,02	4,4	0,11	0,81	3,1	92,3

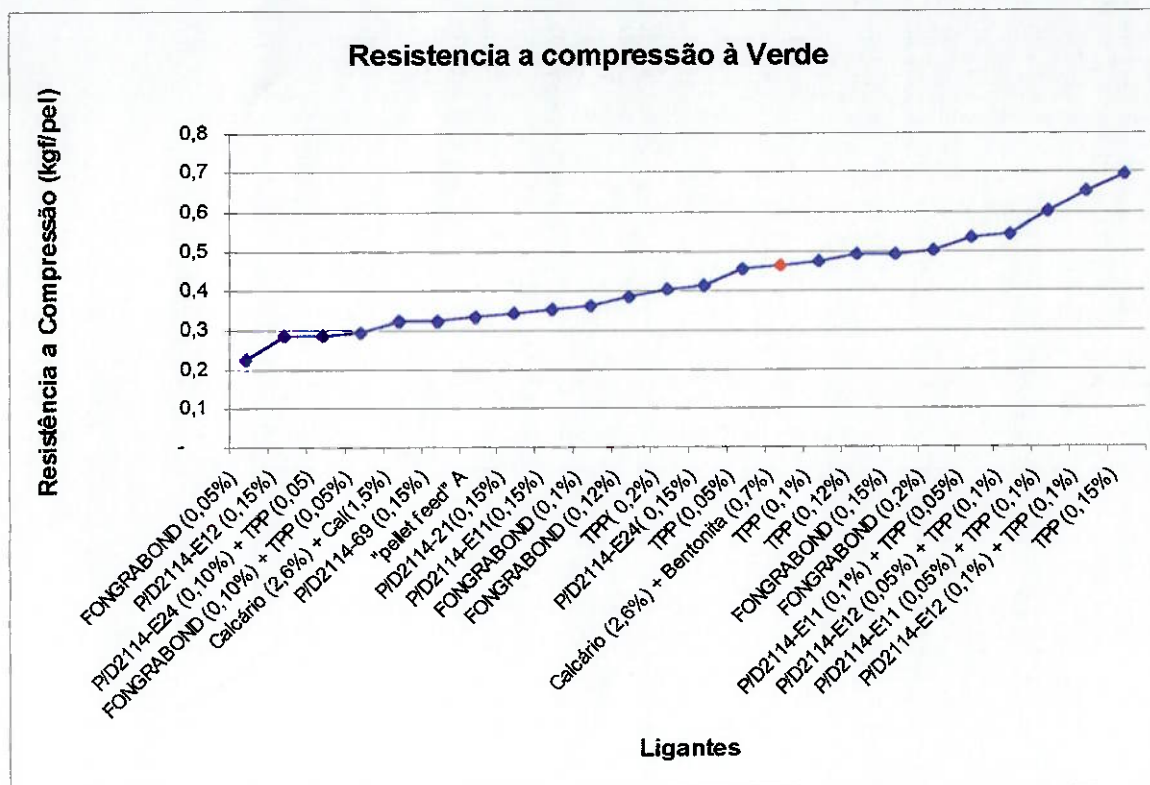
Tabela 2: Resultados da análise granulométrica.

Malha Tyler	"Pellet-feed" A - FERTECO	
	% retida	% acumulada
-48+65	0,30	0,30
-65+100	0,85	1,15
-100+150	1,89	3,04
-150+200	5,54	8,58
-200+270	22,80	31,38
-270+325	28,52	59,90
-325+400	33,78	93,68
-400	6,32	100,00

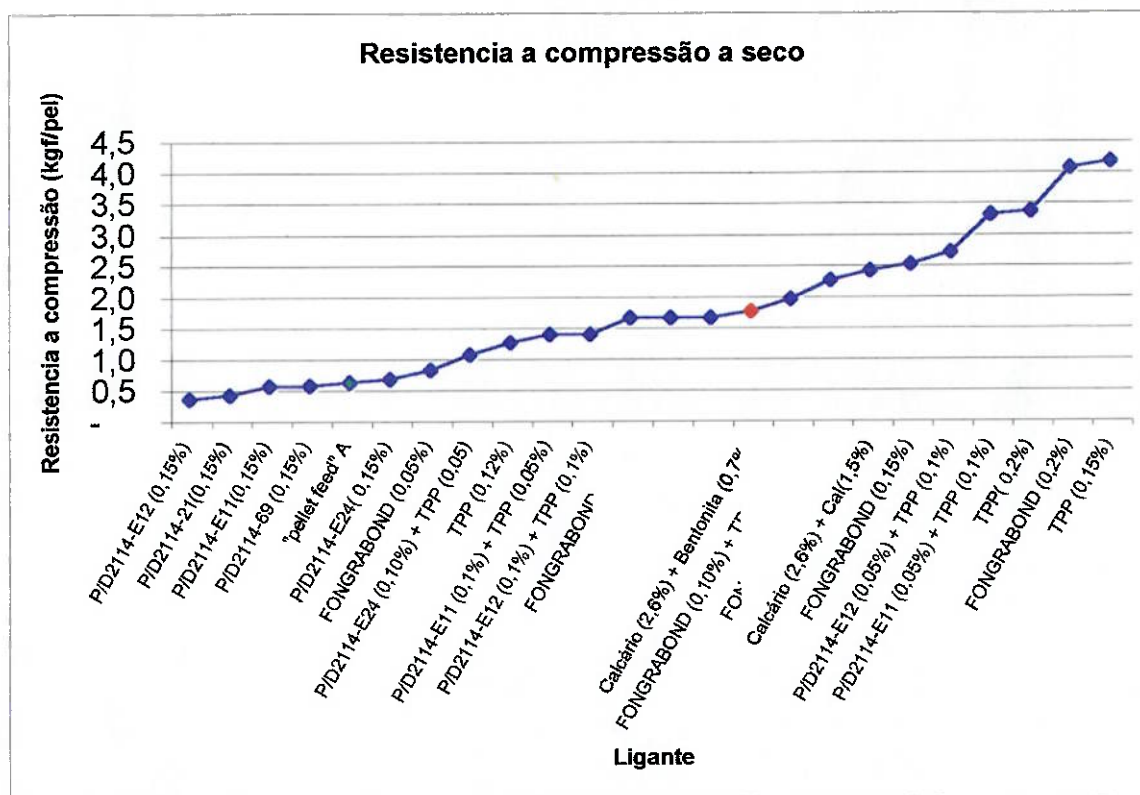


Tabela 3 – Planilha dos ensaios de pelletização das amostras de “pellet feed” A e B

Aditivos Ligantes Dosagem (%)					Resistência a Compressão (kgf/pelota)		Resistência ao choque térmico (kgf/pelota)				
					Verde	Seca	200	300	400	500	600
"pelletfeed"A	A	-	-	-	0,3	0,6	0,6	0,6	0,3	0,4	0,5
"pelletfeed"B	B	-	-	-	0,6	0,3	0,2	0,3	0,4	0,4	0,3
Calcário	A	2,6	Bentonita	0,7	0,5	1,8	2,0	2,1	1,6	1,1	1,8
Calcário	A	2,6	Cal hidratada	1,5	0,3	2,4	1,7	1,9	1,7	2,0	1,6
P/D2114-E11	A	0,05	TPP	0,1	0,6	3,3	3,0	3,0	1,2	0,2	1,5
P/D2114-E11	A	0,1	TPP	0,05	0,5	1,4	1,3	1,2	1,2	1,8	1,5
P/D2114-E11	A	0,15	-	-	0,4	0,6	1,8	0,5	0,2	0,7	0,2
P/D2114-E12	A	0,05	TPP	0,1	0,5	2,7	1,6	0,8	1,5	0,7	1,2
P/D2114-E12	A	0,1	TPP	0,05	0,7	1,4	1,1	1,4	0,7	0,9	0,8
P/D2114-E12	A	0,15	-	-	0,3	0,3	0,2	0,0	0,1	-	0,1
TPP	A	0,05	-	-	0,5	1,7	1,5	1,6	1,6	1,5	1,3
TPP	A	0,1	-	-	0,5	1,7	1,2	1,6	1,3	1,2	1,0
TPP	A	0,12	-	-	0,5	1,3	1,2	1,4	1,4	1,5	1,0
TPP	A	0,15	-	-	0,7	4,2	n/d	n/d	2,2	n/d	1,6
TPP	A	0,2	-	-	0,4	3,4	3,3	2,7	1,5	1,5	1,1
FONGRABOND	A	0,05	-	-	0,2	0,8	0,6	0,5	0,6	0,5	0,5
FONGRABOND	A	0,1	-	-	0,4	1,7	1,5	0,8	1,1	1,0	1,1
FONGRABOND	A	0,1	TPP	0,05	0,3	2,0	1,6	0,6	1,4	1,4	1,1
FONGRABOND	A	0,12	-	-	0,4	2,3	1,2	1,3	1,2	1,2	1,3
FONGRABOND	A	0,15	-	-	0,5	2,5	1,4	1,7	1,3	2,0	1,4
FONGRABOND	A	0,2	-	-	0,5	4,1	3,1	2,8	2,6	1,8	1,5
P/D2114-E24	A	0,1	TPP	0,05	0,3	1,1	0,8	0,9	0,6	0,8	0,3
P/D2114-E24	A	0,15	-	-	0,4	0,7	0,5	0,4	0,3	0,6	0,5
P/D2114-21	A	0,15	-	-	0,3	0,4	0,2	0,3	0,1	0,2	0,2
P/D2114-69	A	0,15	-	-	0,3	0,6	0,5	0,2	0,2	0,3	0,2
FONGRABOND	B	0,15	-	-	0,3	2,3	2,4	2,0	1,8	2,2	2,6
TPP	B	0,15	-	-	0,3	3,8	3,5	3,1	2,7	3,5	3,0
BENTONITA	B	0,5	-	-	0,2	1,4	1,2	1,2	1,2	1,4	1,2
BENTONITA	B	0,75	-	-	0,3	2,8	1,3	2,2	2,3	3,8	2,8



**Figura 7 - Gráfico da resistência a compressão à verde**



**Figura 8 - Gráfico da resistência a compressão à seco**

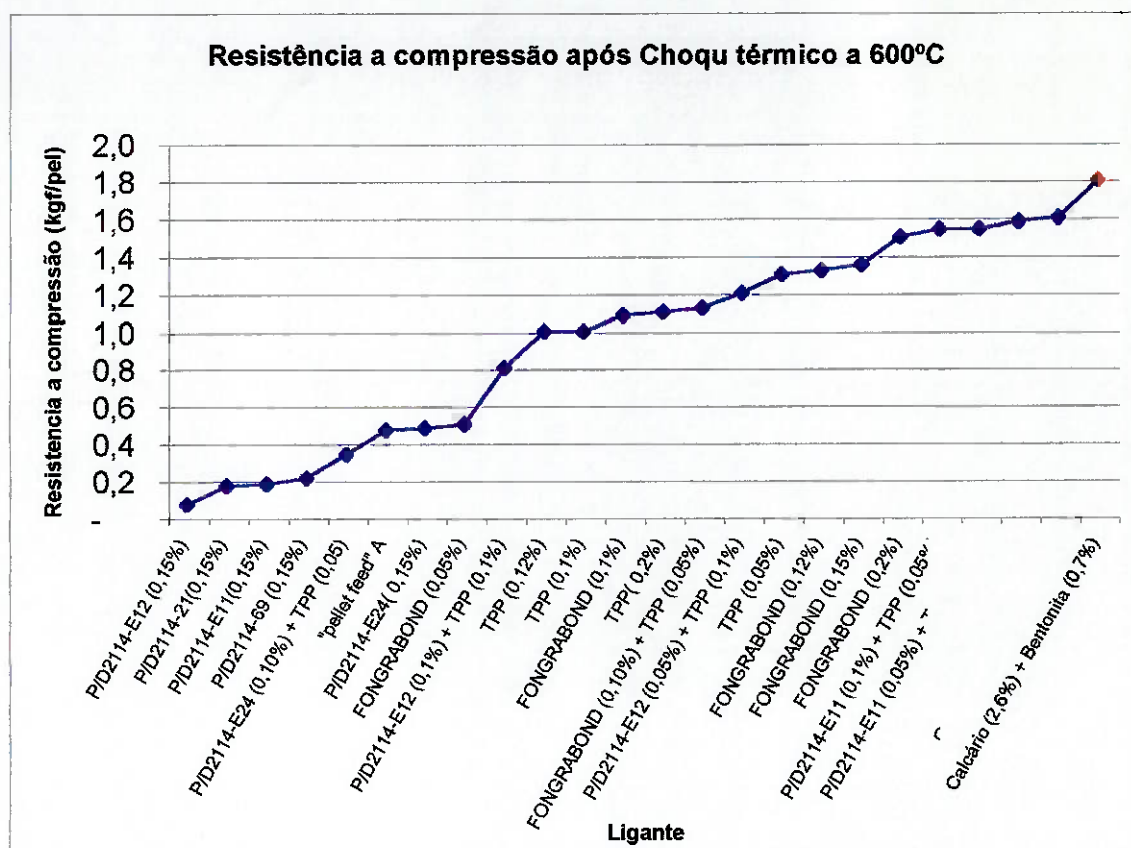


Figura 9 - Gráfico da resistência a compressão após choque térmico.

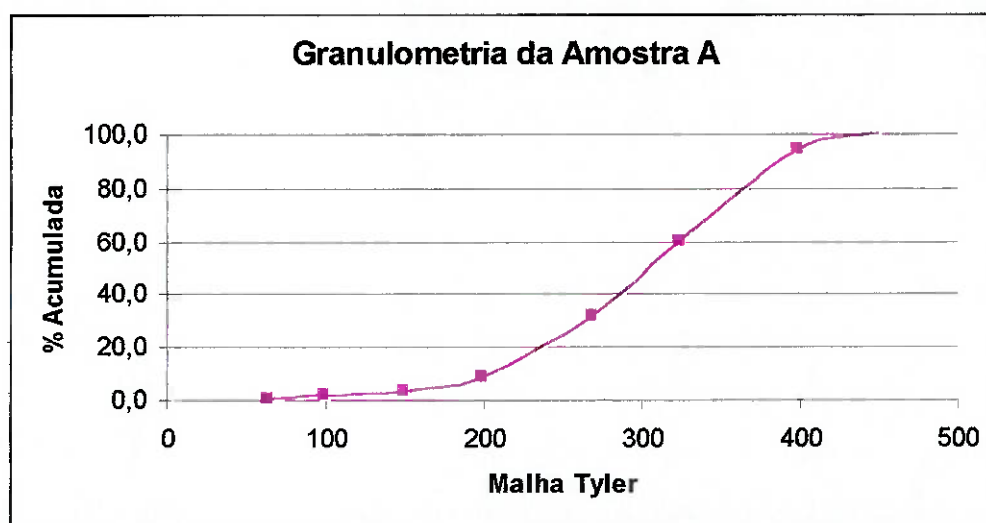


Figura 10 - Gráfico da análise granulométrica da amostra A