

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DEPARTAMENTO DE METALURGIA

ORIENTADOR: PROF. MARCELO B. MOURÃO

ORIENTADO: RONALDO MATHIAZZI

**"ESTUDO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE PELOTAS AUTO-
REDUTORAS A ALTAS TEMPERATURAS"**

TRABALHO DE FORMATURA II

DEZEMBRO/1993.

I- INTRODUÇÃO

Este trabalho será apresentado como avaliação do segundo semestre do Trabalho de Formatura de 1993, disciplina do curso de Engenharia Metalúrgica e de materiais da EPUSP. Sua orientação está sob os cuidados do Prof. Dr. Marcelo B. Mourão e a coordenação é do Prof. Dr. Stephan Wolynek.

A escolha do tema atende a necessidade de aumento de resistência à compressão a altas temperaturas das pelotas auto-redutoras, pesquisando ligantes alternativos bem como alterações nos ciclos térmicos das pelotas.

II- OBJETIVOS DO TRABALHO

Este estudo tem a finalidade de pesquisar os efeitos da sílica coloidal como ligante e compará-la com ligantes mais conhecidos obtidos da mistura de cal hidratada, escória e sílica. Para tanto, produziremos pelotas deste segundo tipo seguindo a bibliografia mais recente e compararemos os resultados de compressão de cada tipo.

Em seguida submeteremos pelotas curadas de ambos os ligantes a várias temperaturas e compararemos as curvas de resistência a compressão em função da temperatura de cada tipo de pelota.

A consequência deste estudo é um melhoramento dos processos de obtenção de ferro gusa a partir de pelotas auto-redutoras, tais como o Processo Tecnores (4).

Decidimos pesquisar a sílica coloidal porque ela é utilizada em moldes cerâmicos refratários (areia) a altas temperaturas, ou seja, em condições de trabalho semelhantes às das pelotas.

III- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1- PELOTAMENTO (6)

As exigências com relação às propriedades mecânicas a frio das pelotas auto-redutoras são significativamente maiores do que para pelotas convencionais, porque estas são submetidas ao processo de queima e sinterização, enquanto as pelotas auto-redutoras são utilizadas diretamente do forno após um determinado período de cura a frio.

Normalmente as pelotas auto-redutoras passam por diferentes fases operacionais que vão desde a sua fabricação no disco pelletizador até o forno de redução/fusão, devendo apresentar em cada fase propriedades adequadas, desenvolvidas pelos ligantes utilizados na sua composição. Assim as pelotas devem apresentar resistência a quedas, manuseio, transporte e empilhamento desde o disco pelletizador até o local de estocagem, onde permanece durante um período de cura de no mínimo 28 dias. Após a cura as pelotas são novamente manuseadas e transportadas para equipamentos de secagem para remover a umidade e então carregadas no forno. Esta última fase operacional (após a cura) requer resistência mecânica relativamente elevada para que as pelotas mantenham sua integridade.

Durante o pelletamento vários setores influenciam os mecanismos de união das partículas tais como: Teor de Unidade; forma, tamanho médio e distribuição granulométrica das partículas; equipamento empregado (no pelletamento também podem ser utilizados tambores e cones); molhabilidade; estrutura dos poros; características químicas, natureza e quantidade do aglomerante; etc.

Para a formação das pelotas cruas, há a interação de duas fases, sendo uma sólida (minério) e outra líquida (no caso presente, a água).

As forças de interface têm um efeito coesivo envolvendo o líquido, o ar e as partículas minerais.

Essas forças, consistem em primeira mão, de forças capilares, desenvolvidas nas pontes líquidas côncavas existentes entre as partículas da superfície da pelota. (figura 1)

As forças resultantes da tensão superficial provocam reações de igual intensidade nas partículas minerais. As superfícies líquidas côncavas formam-se nos poros abertos e a reação capilar mantém as partículas minerais unidas.

Nessas condições, surge uma resistência da pelota crua à tensões mecânicas.

No disco, a mistura de partículas minerais, água e aglomerante é submetida a rolamento contínuo, e por ação da capilaridade e do aglomerante, formam-se pequenos núcleos esféricos, os quais vão crescendo, até que atinjam a faixa de tamanhos desejada na operação e saiam do disco. Esse processo é similar ao crescimento das "bolas de neve".

Através das figuras 2 e 3, são evidenciados mais claramente esses fenômenos.

O aglomerante tem papel relevante no processo de pelletização, conferindo às pelotas cruas a resistência necessária para resistir ao tratamento térmico posterior, o que não seria conseguido com a ação isolada das forças de capilaridade.

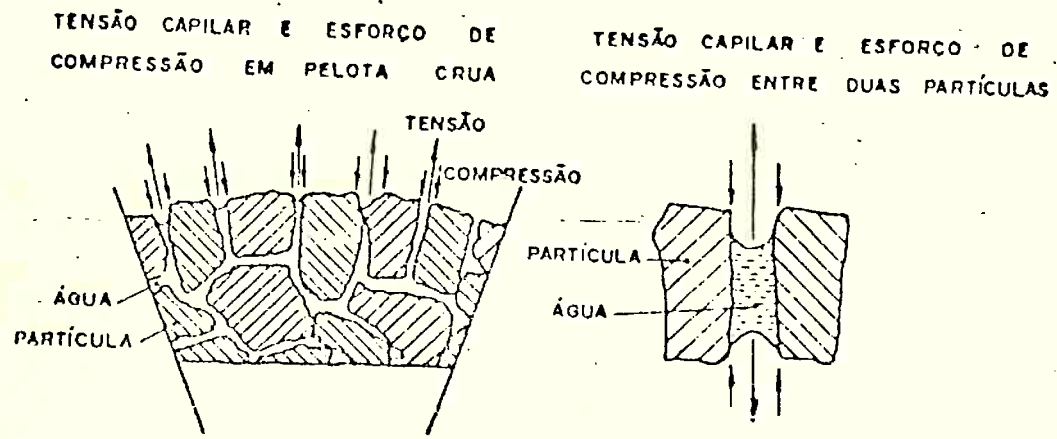


FIG. 1 - INFLUÊNCIA DAS FORÇAS CAPILARES NO MECANISMO DE LIGAÇÃO

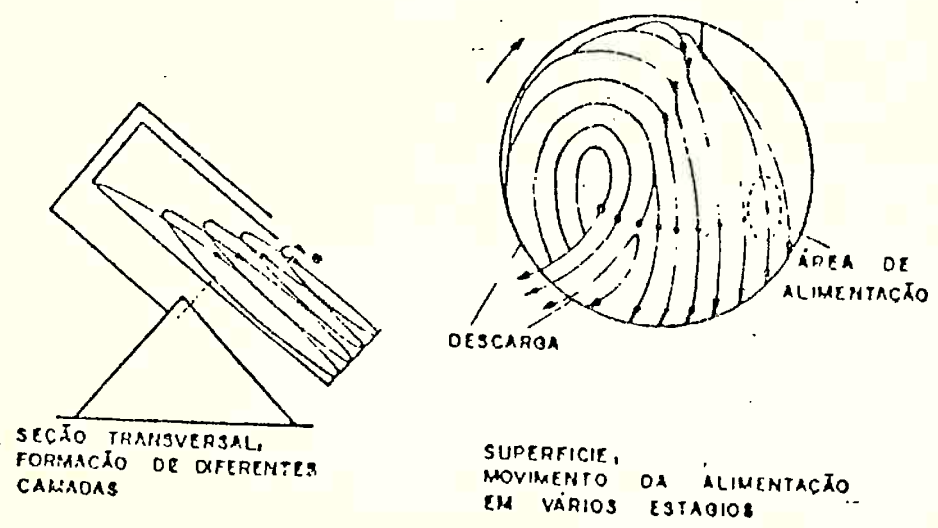


FIG. 2 - MOVIMENTO DO PELLET FEED NO DISCO
(FORMAÇÃO DA PELOTA CRUA, CRESCIMENTO DO TAMANHO E DESCARGA DO PRODUTO)

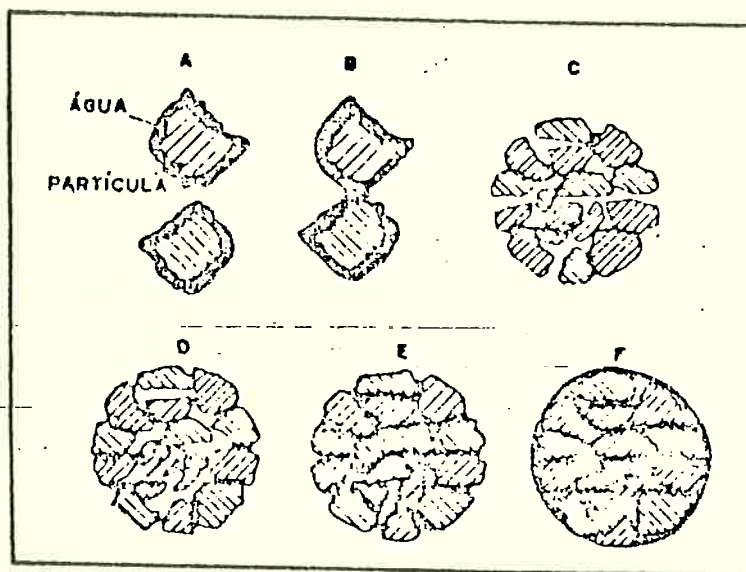


FIG. 3 - INFLUÊNCIA DA ÁGUA NA FORMAÇÃO DAS PELOTAS CRUAS

- a) As partículas de minério são cobertas com uma película de água.
- b) Devido a tensão superficial da água, as pontes líquidas são formadas.
- c) Devido ao rolamento do disco, gotículas d'água contendo uma ou mais partículas minerais unem-se, formando o aglomerado inicial.
- d) As pontes líquidas vão aumentando e o aglomerado é adensado, com o suprimento de água e efeito do rolamento.
- e) Nessa fase as forças capilares das pontes líquidas exercem grande ação. A situação considerada ótima é aquela em que todos os poros internos são preenchidos com água, sem contudo ocorrer um cobrimento total da pelota, o que reduziria drasticamente a resistência do aglomerado.
- f) Situação indesejável, a pelota está totalmente coberta com uma película de água.

2- CONSIDERAÇÕES SOBRE A PRODUÇÃO DE FERRO GUSA PELO PROCESSO TECNORED

O processo Tecnored compreende a redução e fusão de pelotas auto-redutoras de cura a frio, processadas em um forno de geometria especial (Forno de Auto-Redução). As pelotas empregadas no processo (figura 4) são produzidas a partir de uma mistura de finos de minério de ferro, ou de óxidos de ferro de outras origens, redutores (finos de carvão mineral, finos de carvão vegetal, biomassa ou finos de coque) e cal hidratada como agente ligante e fluxante. Essa mistura é aglomerada em discos de pelotização tradicionais e as pelotas obtidas curadas em pátios, ao ar livre, durante período de ordem de 28 dias.

Característica importante e inerente ao processo (figura 5) é a formação de uma atmosfera redutora dentro das pelotas, que resulta em elevadas taxas de redução dos óxidos de ferro, independente da natureza da atmosfera presente dentro do forno.

Os principais elementos construtivos e funcionais do forno FAR são descritos e apresentados na figura 6. O equipamento dispõe de dutos laterais para a alimentação do combustível sólido e uma cuba central, por onde são carregadas as pelotas e por onde passa todo o fluxo gasoso em contra-corrente. Na cuba interior situam-se as ventaneiras refrigeradas a água, para injeção do sopro primário de ar quente. Na base da cuba superior localizam-se as ventaneiras secundárias, para sopro de ar frio.

O forno FAR pode ser dividido em três zonas distintas:

- Cuba Superior: compreendida entre o nível de carregamento das pelotas e as ventaneiras secundárias;
- Zona de Fusão: compreendida entre as ventaneiras secundárias e o topo da cama de combustível; e
- Cuba Inferior: compreendida entre o topo da cama de combustível e as bicas de vazamento de metal.

Na cuba superior as pelotas são pré-aquecidas e ocorre a redução dos óxidos de ferro. A energia necessária ao processo nesta zona é fornecida pelos gases quentes provenientes das zonas inferiores e, também, pela combustão do CO nas ventaneiras secundárias. Uma das principais características do forno FAR, uma vez que não existe combustível sólido na cuba superior, é a não ocorrência da reação endotérmica de Boudouard ($\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$) naquela região, resultando em elevada eficiência térmica e em redução do consumo de combustível.

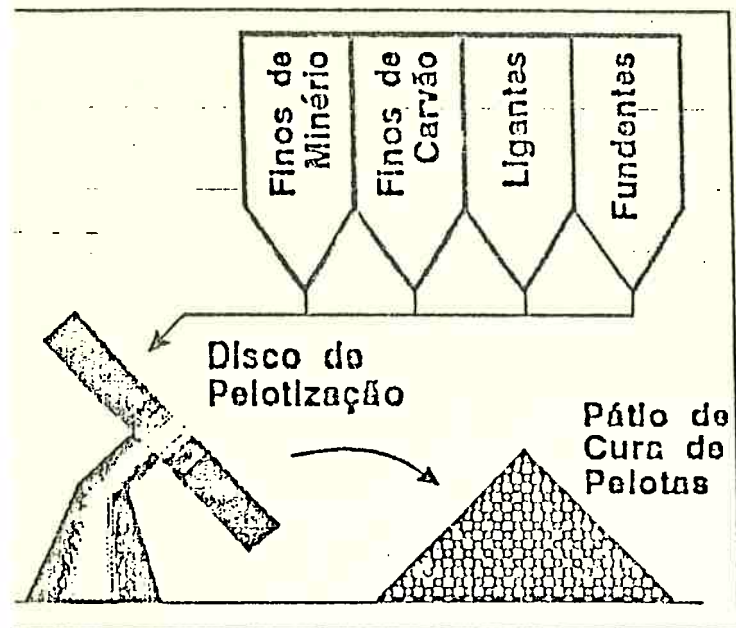
Na zona de fusão ocorrem: a fusão das pelotas reduzidas; a formação da escória; a redução dos óxidos de ferro residuais; bem como parte da carburação do metal. A energia necessária é fornecida pelos gases quentes provenientes da cama de combustível sólido.

Na parte inferior ocorrem: o super-aquecimento do metal e da escória até as temperaturas de vazamento; a carburação final; a redução final dos óxidos residuais; a remoção do enxofre pela escória; e a redução e incorporação do silício ao banho metálico. A energia necessária provém da queima do combustível sólido pelo sopro de ar quente das ventaneiras primárias. À semelhança do alto-forno, o FAR também dispõe de um cone de combustível sólido inerte, que assegura a sustentação de toda a coluna de carga do forno.

O processo Tecnored pode ser utilizado segundo diferentes modelos de operação, envolvendo níveis crescentes de exploração do conceito de combustão secundária do CO na cuba superior do forno.

Figura 4 - Fabricação e cura das pelotas auto-redutoras

MATÉRIAS-PRIMAS/PRODUÇÃO/CURA



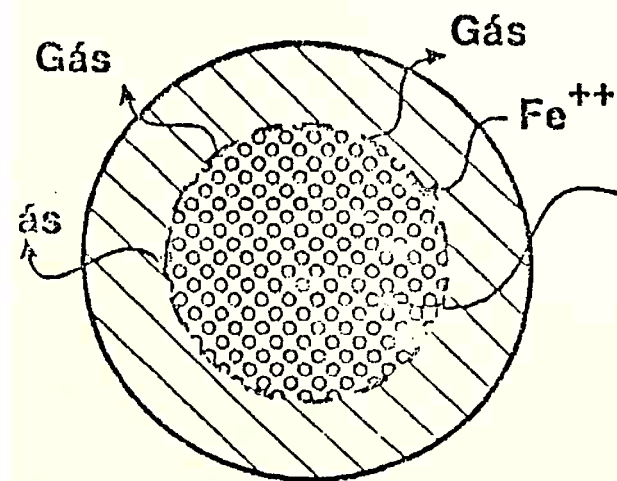
Matérias-primas de baixo custo são usadas, como: finos de minério, finos de carvões não-coqueificáveis, de carvão vegetal ou de coque e outros resíduos.

As matérias-primas e os redutores são misturados com ligantes e fundentes e aglomerados em discos de pelotização tradicionais.

As pelotas são curadas ao tempo, em um período de 28 dias.

Figura 5 - Redução dos óxidos de ferro no interior das pelotas

REDUÇÃO DA PELOTA



■ Nas partículas de carvão
 $\text{CO}_2 + \text{C} \rightarrow 2 \text{CO}$

■ Nas partículas de minério
 $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CO} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO}_2$
 $\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO} \rightarrow \text{FeO} + \text{CO}_2$
 $\text{FeO} + \text{CO} \rightarrow \text{Fe(sólido)} + \text{CO}_2$

Figura 6 Principais características do forno FAR

FORNO FAR

Combustível sólido é carregado por dutos laterais

A reação de Boudouard ($\text{CO}_2 + \text{C} \rightarrow 2\text{CO}$) é evitada economizando energia.

Combustíveis sólidos baratos podem ser usados devido à pequena altura da cuba (2-3m).

Ar frio na cuba superior queima CO para pré-aquecimento e redução das pelotas.

A atmosfera redutora no interior das pelotas impede a re-oxidação.

Combustíveis sólidos

Ar frio

Ar quente

Escória

Metal

Pelotas reduzidas são derretidas sob atmosfera redutora.

Redução final dos óxidos de ferro e escorificação da ganga e cinzas prossegue no estado líquido.

Gotas de metal e escória superaquecem-se e acumulam-se no cadinho

O gráfico do perfil térmico do forno (figura 7) apresentado pelo fabricante (7), mostra as temperaturas da superfície e do centro da pelota durante a descida da mesma, conforme o forno opera.

A escala de tempo (min.) nos diz que a pelota atravessa a faixa de 400°C a 800°C em cerca de 18 minutos. Nesta faixa de temperaturas ocorre a reversão das reações hidráulicas do cimento, conforme veremos no próximo item deste trabalho. Por isso, as curvas levantadas para comparar resistência a compressão em temperaturas definidas tratam de uma região crítica. Também o tempo de 30 minutos de tratamento térmico (item 3.3 descreve), pesquisa a pelota numa situação mais delicada do que apenas os 18 minutos na faixa crítica (400°C - 800°C).

Sabe-se que, se a marcha do forno precisa ser interrompida, ocorre esmagamento (esboroamento) da carga na altura correspondente a 400° a 800° C (50 cm a 80 cm do topo) devido a perda de resistência a compressão da carga. Nesta situação o forno precisa ser desligado e limpo, causando atrasos e inconveniências operacionais.

Como curiosidade observemos ainda que a curva do perfil térmico apresenta na região de 400° - 800° C uma inflexão. Isto se deve à redução de incremento de calor, porque nesta região ocorre a reação de Boudouard ($\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$), que é endotérmica.

3- SISTEMA LIGANTE DA PELOTA (2)

No estágio atual do desenvolvimento, a obtenção de propriedades a frio que satisfaçam os níveis de exigência existentes tem-se fundamentado nos princípios de cura do cimento e da cal hidratada para satisfazer a necessidade de compor uma escória apropriada para a pelota e ou resultantes da ganga do minério de ferro e da própria cal. Estes ligantes endurecem por hidratação e ou carbonatação desenvolvendo resistência na pelota através de mecanismos químicos e físico-químicos bastante complexos.

Os cimentos são materiais cerâmicos estruturais, que adquirem resistência devido à formação de fases hidratadas, tais como carbonatos, de características comumente coloidais (3). Eles têm composição variada e são normalmente classificados em cimentos hidráulicos e não hidráulicos. Os hidráulicos reagem em presença de água formando produto de hidratação estáveis, enquanto os não hidráulicos normalmente se combinam com o CO_2 , fornecendo tanto quanto o outro, estruturas rígidas com propriedades típicas relacionadas com o grau de interação que ocorre entre as espécies reagentes.

Os componentes básicos do cimento são o óxido de cálcio (CaO), o óxido de silício (SiO_2), o óxido de alumínio (Al_2O_3) e o óxido de ferro (Fe_2O_3) cujas composições aproximadas estão indicadas na figura 8.

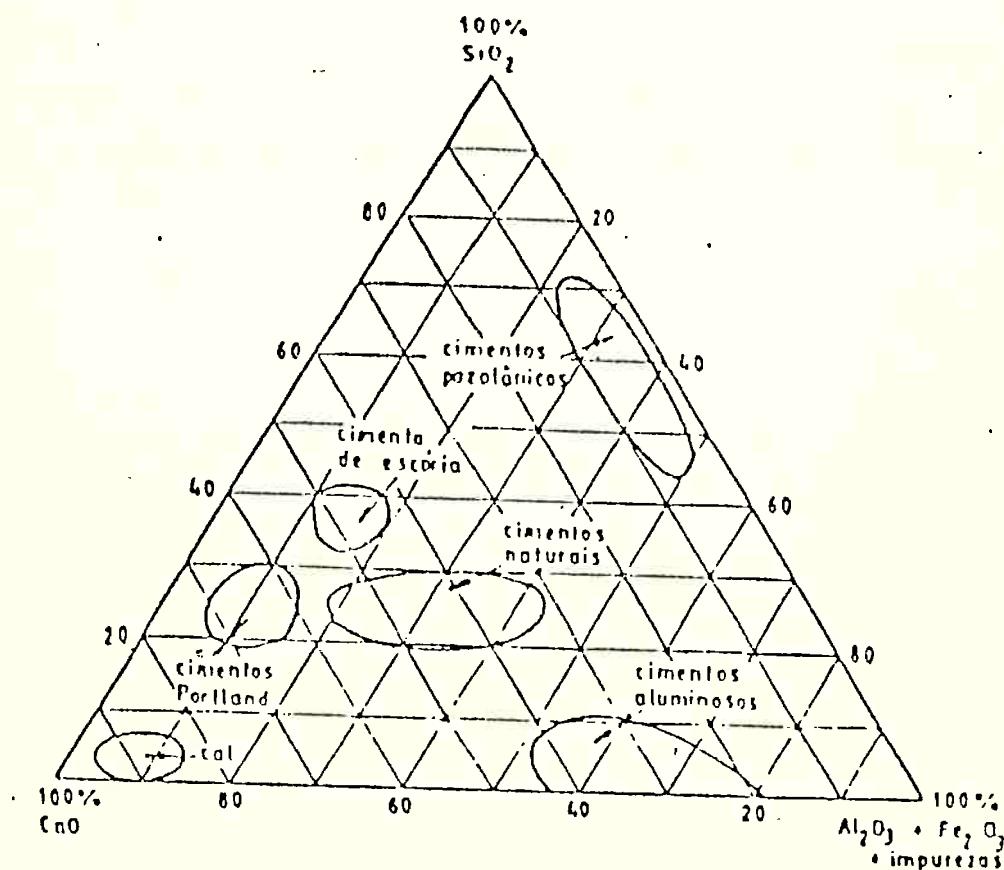


FIGURA 8 - Composição aproximada dos diferentes cimentos.

Conforme veremos no item IV Procedimento Experimental deste trabalho, as pelotas do tipo A tem composição 7,5% CaO, 3,5% escória e 1% sílica em peso na pelota, o que resulta nas proporções 17,1% SiO₂, 74,2% CaO e 8,7% (Al₂O₃ + Fe₂O₃) aproximadamente, se considerarmos a tabela IX da bibliografia 2 no cálculo. Assim, temos uma faixa de composição no ligante tipo 4 próxima às faixas do cimento Portland.

O cimento Portland comum é uma mistura de clínquer moído (silicato tricálcico, silicato dicálcico, aluminato tricálcico e solução sólida de ferrita) e gesso (retardador de pega).

Dentre os diversos tipos de cimento existentes, tornam-se importantes como aglomerantes de pelotas auto-redutoras, principalmente por razões econômicas, o cimento Portland e a cal hidratada, especialmente esta última.

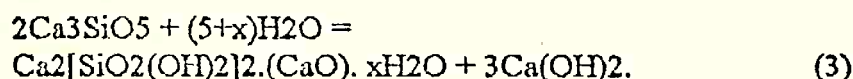
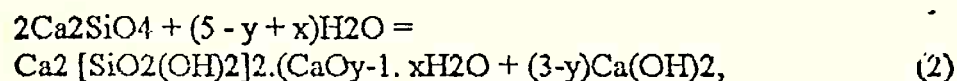
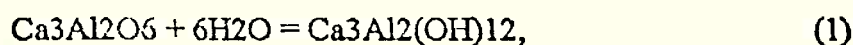
Considerando-se que quando se emprega cal hidratada na composição da pelota além da reação de carbonatação do hidróxido de cálcio, a cal se combina com argilas presentes resultando em produtos que se insolubilizam por hidratação, ou seja, cimentos formados in loco, envolvendo portanto mecanismos de cura semelhantes aos do cimento convencional.

Os cimentos devem antes de tudo, apresentar uma resistência mecânica coesiva dentro de si mesmos. Provavelmente, na mesma ordem de importância, os cimentos devem aderir aos agregados. Resumem-se os requisitos estruturais dos cimentos, apontando o fato de que os melhores cimentos cerâmicos são aqueles produtos que não são altamente cristalinos. Embora isso seja surpreendente a primeira vista, existem justificativas teóricas para tais evidências experimentais: (1) um cimento amorfo ou finamente coloidal é mais fácil de se combinar com a estrutura do agregado e desenvolver melhor adesão do que os cimentos altamente cristalinos, (2) variações interatômicas não produzem ligações em grandes distâncias mal combinadas; (3) uma variação na estequiometria é permitida para os materiais amorfos, (4) uma estrutura amorfa é muitas vezes flexível, de tal forma que não sejam desenvolvidas severas concentrações de tensões quando forem aplicadas cargas ou forem encontradas mudanças dimensionais.

As reações químicas que produzem cimentos cerâmicos estão divididas em duas categorias: (1) aquelas com liberação de água e (2) aquelas que consomem água. Embora o CO₂ e outros reagentes possam ser utilizados nos cimentos, o aditivo mais comum é a água, e um cimento fabricado com água ilustra o comportamento químico dos materiais cimentícios. Os cimentos hidráulicos estão entre aqueles cujas reações consomem água.

Os cimentos portland são os mais comuns entre os cimentos hidráulicos (figura 7). Seus componentes principais são os silicatos di-etricálcico e o aluminato tricálcico. Suas

reações de hidratação, embora muitas vezes complexas, são indicativas dos princípios que governam as reações dos cimentos hidráulicos em geral:



Na Eq. (2), y vale aproximadamente 2,3. O valor de x no silicato de cálcio hidratado (chamado tobermorita) varia desde zero até acima de um, dependendo da pressão de vapor da água disponível. Em cada caso, a forma hidratada é sensivelmente menos solúvel que a fase anidra. Portanto, ocorre a solução e precipitação através do meio líquido.

A desidratação de um cimento hidráulico é comparável à remoção da água de outros colóides. A energia livre da água a ser removida varia com a resistência da ligação, e influencia a temperatura de desidratação. Como um cimento contendo grande quantidade de silicato dicálcico envolve uma faixa de desidratação que se inicia em temperaturas relativamente baixas, não é utilizável para o mesmo nível de temperatura de um cimento contendo aluminato tricálcico hidratado.

A tabela a seguir esquematiza o comportamento do cimento ao longo do tempo.

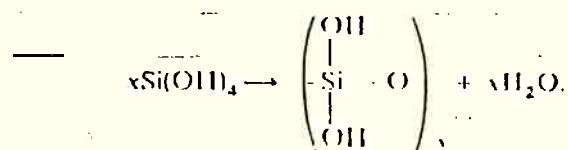
TABELA IV - Etapas da hidratação do cimento

Etapa de hidratação.	Velocidade de reação exotérmica (cal/grau/hora)	Duração típica	Principais transformações químicas ou físicas.
Reação inicial.	40	5 - 10 min.	Hidratação inicial, dissolução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e aumento de pH, precipitação de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ por saturação.
Período inativo.	1	60 min.	Crescimento de produtos de reação em volta das partículas de cimento.
Período de pega.	Aumenta gradualmente para 5 (em 6 horas)	360 min.	Ruptura da membrana hidratada e renovação da hidratação das partículas.
Período de cura.	Decresce gradualmente para 1 (em 24 horas)	360 min. até vários anos.	Produtos de hidratação exudam para dentro de espaços capilares.
Período de hidratação destrutiva.	Negligenciável.	1 a 5 anos	Descontinuidade da pasta circundante endurecida provocada pela expansão devida a hidratação posterior.

O aglomeramento hidratado, responsável pelas propriedades a frio da pelota, com das pelotas tipo A que utilizamos, decompõe-se por volta de 500° C, resultando num esboroamento da pelota, o qual será prejudicial à marcha do forno.

Em sentido contrário, a sílica, aglomerante não hidráulico, deve ter estabilidade a altas temperaturas. O mecanismo de pega é a polimerização dos tetraedros de sílica (3).

O protótipo de reação para esse tipo de cimento é a reação do ácido silícico:



Na maioria, tais cimentos necessitam da existência de um pequeno átomo, coordenado tetraedricamente com os grandes átomos de oxigênio. Tanto as ligações iônicas como as covalentes são comuns. Ainda, as reações poliméricas são encontradas nos silicatos de sódio e potássio, onde o íon sódio funciona como uma ponte iônica entre um ânion de polissilicato e outro. Este reage com muitos materiais agregados, da mesma forma que ocorrem as reações dos cimentos.

Cimentos poliméricos são ainda utilizados como cimentos de pega a frio para usos e temperaturas elevadas. Isso é possível, pois a água da reação é liberada durante a pega. Uma vez mais, como essa água é removida por secagem, a reação não é reversível. Quando as temperaturas de sinterização são atingidas, o cimento forma um líquido de baixo ponto de fusão e uma ligação vítrea.

IV- PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

1- EQUIPAMENTOS UTILIZADOS:

1.1- Balança digital de decigramas;

1.2- Disco pelletizador:

Utilizei o disco pelletizador disponível no "HALL" Tecnológico do Departamento de Metalurgia da EPUSP, o qual gira acoplado à betoneira do mesmo "HALL".

1.3- INSTRON para medidas de compressão:

A máquina está no mesmo "HALL" e foi utilizada sob as explicações do Prof. André Tschiptschin. Usei uma célula de compressão de 50 kg, com fundos de escala de 10 a 20 kg. A velocidade da maior parte dos ensaios foi selecionada em 0,2 cm/min. A máquina foi usada para ensaiar pelotas sem tratamento térmico. A maior dificuldade na utilização do Instron é sua regulagem-calibrar sem deslocar o zero da caneta.

1.4- "Sand Strenght Machine" - Dieter Detroit - Universal - Automática - Máquina para medir compressão de areia. A leitura é em psi, portanto devemos converter a unidade por um fator multiplicativo de 0,143 para resultar em kg.

Ela foi utilizada para ensaiar pelotas tratadas termicamente.

1.5- Forno de retorta tubular com atmosfera de argônio e vazão 1 litro/min para proteger a pelota auto-redutora da queima. Assim que elas são retiradas do forno, são resfriadas sob jato de argônio também.

1.6- Peneiras

As pelotas selecionadas para ensaios de compressão têm diâmetro compreendido entre 12,7 mm e 15,9 mm. Diâmetros menores que 12,7 mm retornavam para o disco pelletizador e as pelotas maiores do que 15,9 mm foram esboroadas manualmente e o pó reaproveitado no disco.

2- COMPOSIÇÃO DAS PELOTAS

Preparamos dois tipos de pelotas:

Tipo A:

	%
Minério	67,4
Cal Hidratada	7,5
Escória	3,5
Carvão Mineral	20,6
Sílica	1,0

Esta mistura era colocada no disco pelletizador: o disco era girado e durante a rotação adicionávamos água com um pissete.

Tipo B:

	%
Minério	76,0
Carvão	24,0

Após misturarmos os pós com esta relação de peso, a mistura era colocada no disco pelletizador e durante sua rotação adicionávamos a sílica coloidal. A densidade da sílica coloidal aquosa empregada foi 1,2 g/ml. O volume aproximado de sílica nas pelletizações foi 25 ml/100 g mistura seca, o que resulta teores de aglomerante (sílica) de 4,8% supondo a densidade de água a 1,0 g/ml e nenhuma expansão volumétrica na adição de sílica fina à água.

3- CALENDÁRIO DE LABORATÓRIO

3.1- Preparação de pelotas

Data	Quantidade	Tipo
11/05	2 Kg	A
18/05	200 g	A
18/05	500 g	B
25/05	200 g	A
25/05	300 g	B
08/06	200 g	B
15/06	200 g	A
15/06	200 g	B

3- Medições (INSTRON)

Realizamos medições dias 08/06 e 15/06/93.

4- Tratamentos Térmicos

A finalidade dos tratamentos térmicos é submeter as pelotas às temperaturas reais de trabalho do forno de auto-redução (FAR) da TecnoRed, só que em atmosfera inerte, para conhecermos o comportamento físico da pelota após 30 minutos a uma temperatura fixa. As pelotas escolhidas do tipo A foram produzidas no dia 11/05/93 e as do tipo B dia 08/06/93.

4- Medições Dieter-Detroit

As medições das pelotas tratadas termicamente foram realizadas dia 01/10/93.

5- RESULTADOS

5.1- GRÁFICOS CARGA X DESLOCAMENTO (INSTRON) DE PELOTAS A VERDE

Os gráficos obtidos na compressão têm pico de máximo no primeiro trincamento da pelota, de modo que o valor de carga de ruptura lido em cada ensaio é o do primeiro pico. Abaixo tabelaremos as cargas calculadas pela média aritmética das diversas leituras de cada tipo de pelotas de cada idade.

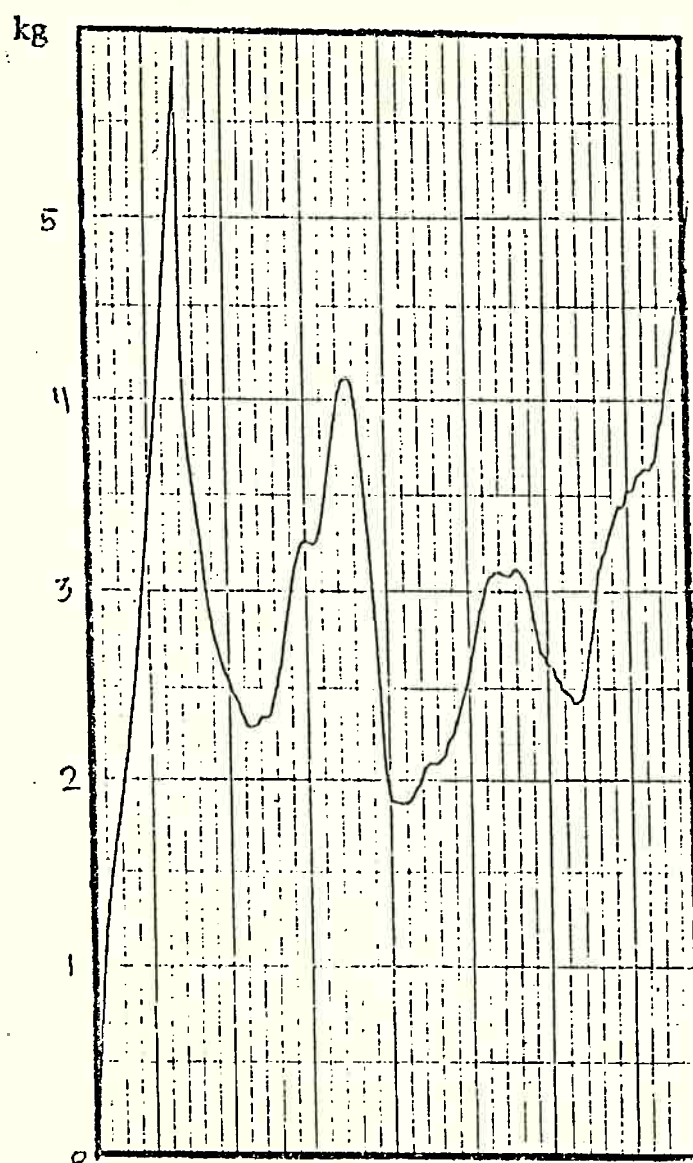
Tipo A

Idade (Semana)	Valores Medidos Kg	Média Aritmética
1		
2	5,3/7,9/7,9	7,0
3	6,3/4,0/5,8/9,5	6,4
4	5,9/6,9/5,7/7,7/8,5/7,4/7,9	7,1
5	6,8/7,8/7,4/9,2	7,8

Tipo B

Idade (Semana)	Valores Medidos Kg	Média Aritmética
1	8,2/8,2/9,2/6,2/7,6/6,8	7,7
2	7,1/9,4/9,0/7,6/6,4	7,9
3	9,8/7,0/8,4/9,6/6,2	8,2

A título de exemplo reproduziremos um gráfico carga X deslocamento típico.

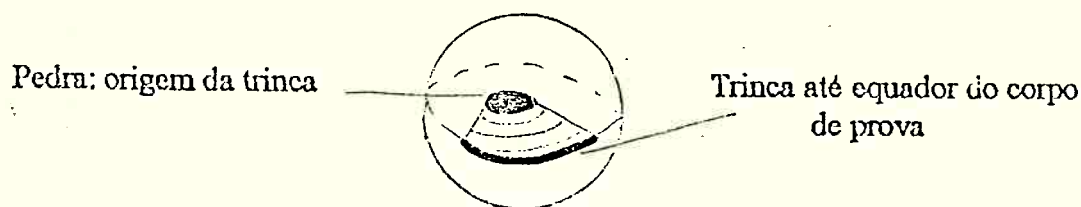


Cimento 3 semanas,
velocidade ensaio 0,2 cm/s

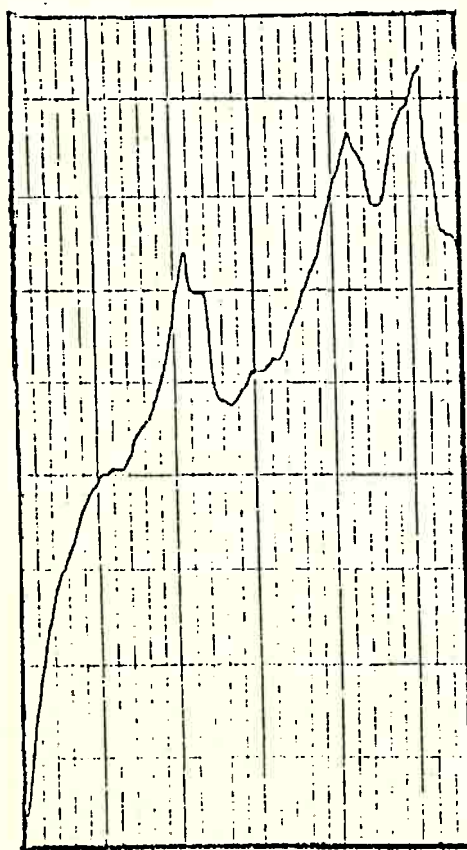
Elo apresenta um valor máximo (primeiro pico) que traduz a primeira trinca da pelota e posteriores picos, cada um revelando outra trinca. Isolamos corpos de prova que mostram esse comportamento, revelado por exame visual.

Assim que o primeiro pico ocorreu no gráfico, paramos o ensaio e retiramos o corpo que aparenta integridade, mas que está trincado, o que se observa com certa acuidade visual.

Observamos dois gráficos anômalos, cujos corpos de prova foram separados que apresentam um primeiro pico de ruptura para um baixo valor de carga e em seguida picos de ruptura com valores maiores de carga, revelando que o primeiro trincamento foi anômalo. Estes corpos de prova tinham no meio uma pedra calcítica responsável pelo primeiro trincamento com baixo valor de carga. Abaixo temos um deles:



kg

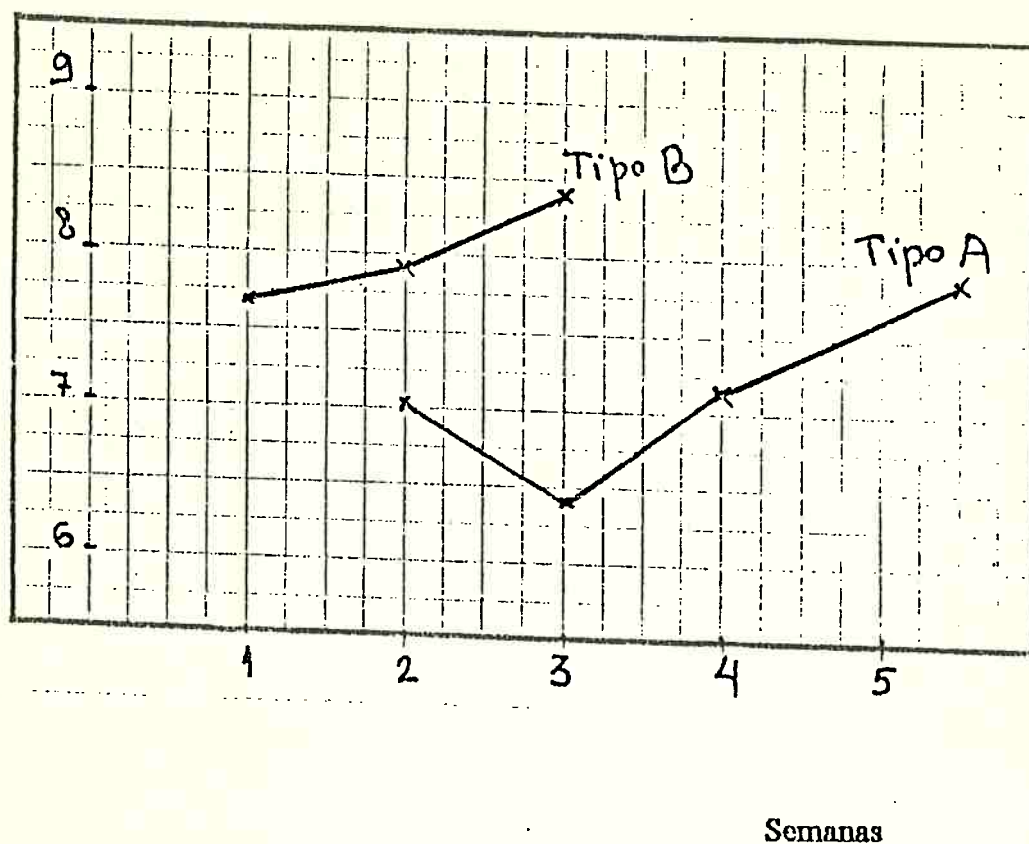


Cimento 3 semanas,
velocidade ensaio 0,2 cm/s

2- ANÁLISE DOS VALORES MEDIDOS DE PELOTAS A VERDE

As pelotas do tipo A nos dão um gráfico com três pontos significativos (3, 4, 5 semanas) mostrando crescimento de resistência mecânica da pelota conforme a mesma sofre a cura. As pelotas do tipo B também produziram um gráfico com três pontos (1, 2, 3, semanas). Estes gráficos estão plotados abaixo:

Compressão (kg)



Este resultado antevê valores maiores de resistência mecânica para as pelotas B, demonstrando que o aglomerante sílica coloidal dá mais resistência a compressão às pelotas a verde.

3- TABELAS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA X TEMPERATURA DAS PELOTAS TRATADAS TERMICAMENTE

Os valores de compressão já transformados para kg estão na tabela abaixo:

Tipo A

Temperatura Graus Celsius	Valores Medidos Kg	Média Aritmética Kg
000	6,2/8,4/6,0/6,9	6,9
100	5,7/4,0/5,4	5,1
200	9,7/5,7/5,7	7,1
300	7,2/8,0/6,6	8,1
400	6,9/5,3/6,9	6,3
500	5,4/4,6	5,0
600	1,7/3,6/2,7	2,7
700	1,1/2,6/1,4	1,7
800	0,3/0,3	0,3

Tipo B

Temperatura Graus Celsius	Valores Medidos Kg	Medida Aritmética Kg
000	13,0/10,8/10,2	11,3
100	6,6/9,3/11,4	9,1
200	9,9/9,9/9,7	9,8
300	9,7/10,0	9,9
400	5,4/7,4/7,6	6,8
500	8,6/8,0/8,9	8,5
600	9,2/8,0/6,6	8,0
700	4,6/4,6/3,4	4,2
800	0,1	0,1

4- ANÁLISE DOS VALORES MEDIDOS

Abaixo plotamos os gráficos das pelotas tipo A e tipo B:

Compressão (kg)



De ambos os gráficos retiramos as seguintes informações:

- a) Ocorre grande queda de resistência no início do aquecimento 100° C;

- b) Temos um pico de resistência em torno de 300°C , resultando um grande aumento em relação a 100°C ;
- c) As duas pelotas A e B perdem a resistência a compressão na faixa $500^{\circ}\text{C} - 600^{\circ}\text{C}$, bem antes da redução do minério de ferro.

VI- DISCUSSÃO

Um dos lotes de pelotas tipo B (18/05) foi preparado com pouca adição de sílica coloidal, ou seja, teores de sílica menores que 25 ml/100g de mistura na pelota verde. Estas pelotas resultam valores de resistência a compressão bem menores e não incluídos no trabalho, mas é importante notar que o teor de sílica altera significativamente a resistência a compressão.

Os valores obtidos nas pelotas tipo A e B foram baixos. Uma das possibilidades a serem discutidas é o tipo de minério-Cauê, bem como sua granulometria. Outra possibilidade forte é a grande fração volumétrica de carvão das pelotas (5).

Finalmente observamos que os valores de resistência a compressão das pelotas de sílica coloidal aumentaram com o tempo desde a medição a verde em 08/06 até as medições de 01/10, subindo de 8,2 kg para pelotas de três semanas para 11,3 kg, demonstrando que a cura prosseguiu.

A sílica coloidal se mostrou um ligamento melhor do que a mistura cal, escória e sílica, no que se refere à resistência à compressão tanto a verde quanto após aquecimento. É de se notar ainda que as pelotas ligadas à sílica coloidal após aquecimento perdem a resistência mecânica significativamente após 600°C , enquanto as pelotas tipo A perdem a resistência já a 500°C .

Entretanto, a sílica coloidal não se apresentou como um ligante não-hidráulico conforme esperávamos. Segundo o modelo de polimerização de TETRAEDROS de sílica, revelando reversão das reações de "pega" nas temperaturas críticas.

BIBLIOGRAFIA

- 1- "Análise do Processo de Redução de Minérios de Ferro por Carbono na Forma de Pelotas Auto-Redutoras", Mourão M. B. dissertação de doutorado, EPUSP, 1988.
- 2- "O Fenômeno de Crepitação em Pelotas Auto-Redutoras", Marchese, E. S., exame de qualificação, EPUSP, 1992.
- 3- "Propriedade dos Materiais Cerâmicos", Van Vlack, L. H., Edgar Blucher, EDUSP.
- 4- "Produção de Ferro Gusa pelo Processo Tecnoired", Construcci, M. A. e outros, ABM, Vol. 49, 417, 1993.
- 5- "Resistência Mecânica de Pelotas Auto-Redutoras", Mourão M. B. e outros, 48º Congresso Anual ABM, Rio de Janeiro, 1993.
- 6- "Pelotização de Minérios de Ferro", Mourão J. M., Curso: Siderurgia para não siderurgistas, Vol. I, ABM, 1986, páginas 107-177.
- 7- "Tecnoired Process", Apostila do fabricante.
- 8- "Pelletization of Fines", Srb, J.; Ruzickova, Z., Developments in Mineral Processing, Vol. 7.