

**BRUNO PESSOA RAMOS**

**ESTUDO DE UM ACELERADOR DE CURA  
PARA PELOTAS AUTO-REDUTORAS**

**Trabalho apresentado à Escola Politécnica da USP  
para a disciplina PMT593/594-Trabalho de Formatura**

**Orientador Cyro Takano**

**São Paulo,dezembro de 1993**

**DEDALUS - Acervo - EPMT**



**31800004075**

## 1.OBJETIVO.

Estudar os mecanismos de cura de pelotas auto-redutoras e aplicar esses conceitos para se tentar diminuir o tempo de cura das pelotas. Nesse sentido realizou-se um estudo experimental, em escala laboratorial, onde preparou-se diferentes composições de pelotas auto-redutoras de minério de ferro com adições de um aditivo de cura rápida (cimento ari) e investigou-se a evolução da resistência a compressão das pelotas em função do tempo.

## 2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.

### 2.1. Introdução

A pelotização é um processo de aglomeração por meio do qual tem-se o aproveitamento integral de recursos minerais não renováveis. A matéria-prima para tal processo consiste de finos gerados nas operações de mineração, briquetagem, moagem e na indústria metalmurgica.

Essa matéria-prima em geral estão numa faixa granulométrica abaixo de 200 malhas (0.075 mm) que não encontra aplicação direta nos processos convencionais de fusão e redução , sendo nesse contexto que insere-se a pelotização como um processo para o aproveitamento desses finos e como forma também de diminuir custos visto que os finos em geral são 30 - 40% mais baratos que o minério bitulado.

A pelotização permite aglomerar minérios muito finos em esferas de 10

a 30 mm de diâmetros, as pelotas; Estas no estágio atual de desenvolvimento podem ser distribuídas em 3 classes:

- Pelotas convencionais curadas em temperaturas elevadas;
- Pelotas convencionais de cura a frio;
- Pelotas auto-redutras de cura a frio;

A produção de pelotas convencionais tem como objetivo principal o uso em altos fornos ou fornos de redução, sendo que as características básicas necessárias a ela são bom comportamento mecânico a alta temperatura (evitar degradação), boa redutibilidade (para se diminuir o consumo específico de coque) e boa resistência ao inchamento e a crepitação . A fabricação dessas pelotas comprehende 3 etapas distintas:

- a. Obtenção de granulometria necessária (moagem fina);
- b. Formação das pelotas cruas ou verdes;
- c. Consolidação das pelotas a temperaturas próximas à do inicio do amolecimento da superfície dos grãos, para obter um material resistente ao manuseio e a pressão da coluna de carga, quando em utilização no alto-forno.

Os processos de cura a frio tanto de pelotas convencionais como de auto-redutoras surgiram no inicio dos anos 50 com o objetivo de se obter pelotas com propriedades adequadas ao alto-forno sem necessidade de se passar pela etapa de consolidação a altas temperaturas (sinterização).

Nesses processos a idéia básica é a utilização de um aglomerante hidráulico, como por exemplo cimento Portland, para o endurecimento das pelotas através de reações químicas. Nesse contexto vários processos foram encontrados em literatura cujas linhas gerais são descritas a seguir:

- Processo Grangcold, que utiliza como aglomerante clinquer de cimento Portland (teor de 10%). Como o clinquer é composto de 2/3 de cal e o restante é composto de sílica, alumina e óxidos de ferro, tem-se que, as pelotas geradas por

tal processo são auto-fluxantes.

- Processo MTU , consiste na pelotização de finos de minério com cal hidratada, sílica ou escória e carvão (ou não). Após a formação das pelotas estas são colocadas em uma autoclave à pressões da ordem de 20 atm durante um intervalo de tempo de 1 a 2 horas.

Existem ainda outros processos de pelotização a frio de pelotas convencionais como o C-B, CHOR, COBO, NKK-CORAK, INDESCO, baseados nos mesmos princípios dos processos anteriores com algumas variantes.

Os processos de pelotização a frio acima citados são na maior parte dos casos destinados a produção de pelotas convencionais, sendo apenas encontrados citações para a produção de pelotas auto-redutoras pelo processo MTU. O uso de pelotas auto-redutoras como forma de carga para redução tem alguns atrativos que indicam um alto potencial de utilização dessa técnica. Podem-se citar entre eles:

1.Possibilidade de utilização de diversas fontes de ferro: finos de minério, resíduos de aciaria, resíduos piritosos usados,etc;

2.Possibilidade de diferentes formas de carbono como redutor: carvões vegetais, carvões fósseis coqueificáveis ou não, carvão de biomassa, coque, etc;

3.Possibilidade de aproveitamento de material fino gerado no manuseio de minério e carvão;

4.Devido a fina granulometria e consequentemente contato íntimo entre as partículas e geração do gás redutor internamente a mistura, pode-se prever um consumo de redutor inferior e velocidade do processo maior em relação aos processos convencionais;

5.Flexibilidade em relação ao equipamento de redução e/ou fusão das pelotas.

Existe em literatura descritos vários processos onde tem-se a participação de pelotas auto-redutoras na etapa de redução, por exemplo, a aplicação em fornos cubilô, fornos elétricos a arco e sob escória líquida, altos-fornos, fornos rotativos de metalização, processo ALPAR para obtenção de aço líquido, etc.

Percebeu-se assim que o desenvolvimento de pelotas auto-redutoras deve estar intimamente associado ao tipo de equipamento de redução/fusão no qual a pelota será usada, procurando sempre compatibilizar as características físicas e térmicas do forno com as propriedades necessárias a pelota para sua utilização.

Assim um determinado processo de redução/fusão pode requerer pelotas com propriedades e características típicas (que podem ou não se aplicar inteiramente a outros processos e equipamentos), tanto no que se refere ao comportamento a frio, como quando submetidos a gradientes elevados de temperatura. Tais propriedades se desenvolvem influenciadas pelas características e propriedades físico-químicas das matérias primas utilizadas na composição da pelota, e das variáveis do seu processo de fabricação e por interações que se estabelecem entre seus constituintes durante a fabricação da pelota, ao longo do período de cura e durante o processo de redução.

Um processo recente onde se utiliza uma carga com 100% de pelotas auto-redutoras é o processo Tecnored cujos níveis de exigência inerentes para a carga são conhecidos e descritos:

1. Manuseio e transporte na saída do disco pelotizador.
2. Empilhamento para cura.
3. Manuseio e transporte na etapa de secagem.
4. Manuseio e transporte na etapa de carregamento do forno.
5. Comportamento na etapa de redução.

As exigências assinaladas em 1 e 2 são ditas propriedades para desempenho a frio das pelotas e estão fundamentalmente relacionadas com o manuseio das pelotas e com o efeito de empilhamento no estoque e no equipamento de secagem, destacando-se a necessidade de uma determinada resistência a queda, friabilidade e resistência a compressão.

É neste contexto que insere-se o objetivo desse trabalho, isto é, o estudo de um acelerador da cura das pelotas auto-redutoras (cimento Ari ), cuja intenção assim é aumentar a resistência das pelotas em menores tempos e diminuir a área para estoque, bem como o capital de giro

## 2.2.Formação das Pelotas

Em termos macroscópicos, as pelotas formam-se a partir do roçamento de uma massa de finos umedecidos sobre uma superfície, por exemplo, de um disco após um determinado tempo de rotação do disco. Ao continuar o roçamento percebe-se que de uma maneira geral as pelotas começam a crescer umas mais que outras, mas uniformemente.

Os principais dispositivos empregados industrialmente para a fabricação da pelota crua ou verde são o tambor, o disco e o cone de peletização. O tambor é um simples cilindro rotativo de comprimento igual a três vezes o diâmetro, inclinação de 5% aproximadamente, e velocidade de cerca 12 rpm; Dispõe na saída de um sistema de peneiramento que faz recircular as pelotas pequenas. O disco é um prato circular de 3.6 a 6.0 m de bordas cilíndricas, inclinado de cerca de 45° e girando com uma velocidade de 5-10 rotações/minuto, aproximadamente. O cone tem a forma de um tronco e exige peneiramento das pelotas.

O mecanismo de aglomeração, associado a formação e crescimento das pelotas, está fundamentalmente baseado na umidade da carga visto que as forças capilares em materiais hidrofilicos endurecem a ligação entre as partículas e que são complementadas pelas forças de compressão na pelota consequente da ação do rolamento da mesma.

De fato a partícula sólida entra em contato com a água e fica recoberta com um filme de água como mostrado na figura 1a, e as partículas molhadas em contatoumas com as outras formam pontes de ligação líquida devido a tensão superficial do filme de água conforme figura 1b. O movimento destas partículas dentro do disco pelotizador e a adição de gotas de água resulta na formação dos primeiros aglomerados (figura 1c) de baixa densidade, com grande volume de vazios entre as pontes líquidas iniciais, porém estas são suficientes para manter a estrutura. A continuidade no fornecimento de água torna o aglomerante cada vez mais denso (figura 1d) e nesse estágio as forças capilares das pontes líquidas individuais são muito ativas. A forma côncava da superfície líquida nos poros externos e a sucção capilar mantém as partículas unidas. O estágio final é atingido quando as partículas sólidas ficam completamente cobertas com um filme de água atingindo-de o ponto ótimo nesta fase quando todos os poros dentro da pelota estão preenchidos(figura 1e). A partir daí acentua-se o efeito de tensão superficial da água e diminui drasticamente as forças de capilaridade, conforme mostra a figura 2.

As forças que interagem na formação das pelotas verdes, provenientes dos finos aglomerados, dividem-se em dois grandes grupos:

1. Forças "naturais", dentre as quais tem-se:
  - forças de Van Der Waals
  - forças magnéticas
  - forças de adesão e coesão em pontes não livremente móveis.

- forças capilares ocasionadas pela presença do líquido intergranular.

## 2. Forças mecânicas, onde temos:

- forças ocasionadas pelo rolamento das partículas no aparelho pelotizador

- forças ocasionadas pela compactação e compressão das partículas durante a pelotização.

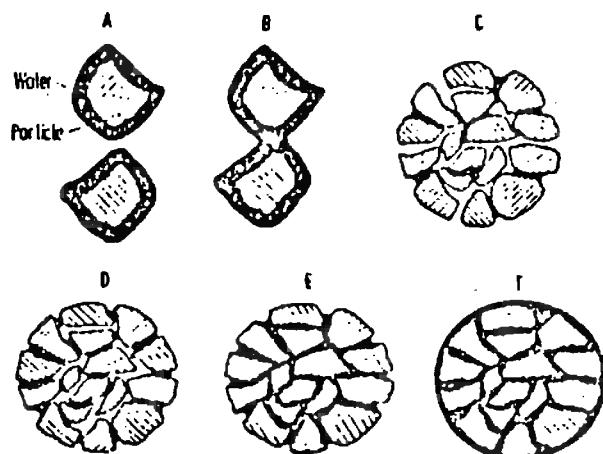


figura 1.[1]-Influência da adição de água na formação de pelota

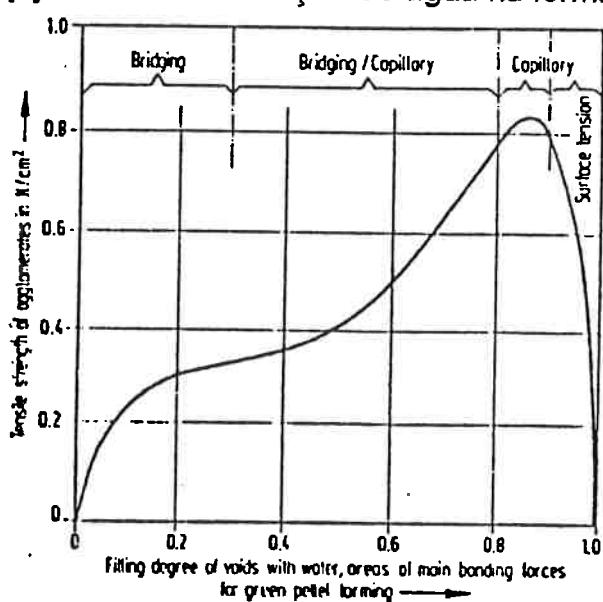


figura 2[1]-Efeito do grau de enchimento capilar na resistência a tração

Percebeu-se que as forças "mecânicas" fazem com que as "naturais" sejam ativadas, isto é, o rolamento, a agitação, a compactação e a compressão fazem com que as forças naturais se tornem mais efetivas.

Na aglomeração acontece na realidade uma combinação de sete eventos simples que são mostrados na figura 3:

- Nucleação, na qual ocorre a união de uma massa de finos livres, formando uma unidade aglomerada (Núcleo).
- Coalescimento, onde tem-se a união de várias unidades aglomeradas, para a formação de uma nova unidade.
- Aglomeracão por camadas, onde uma massa de finos livres adere sobre uma unidade já formada, resultando assim uma nova unidade aglomerada.
- Desagregação total, é o mecanismo oposto ao da nucleação
- Desagregação parcial (oposto ao coalescimento).
- Desagregação em camadas ou atricão, é o mecanismo oposto à aglomeração por camadas.
- Transferencia por abrasão, onde duas unidades aglomeradas (caso mais simples) interagem de maneira que uma das unidades adquire uma parte da massa da outra de forma que , uma unidade cresce em tamanho e a outra diminui.

Nota-se que nos processos de pelotização em batelada (como no caso de laboratório), as principais eventos para o fenômeno de crescimento das pelotas são a nucleação e o coalescimento, enquanto que, em processos industriais, onde existe um contínuo umedecimento da carga e uma continua taxa de alimentação, os principais mecanismos são o coalescimento e a aglomeração por camadas.

## AUMENTO DE TAMANHO

## REDUÇÃO DE TAMANHO

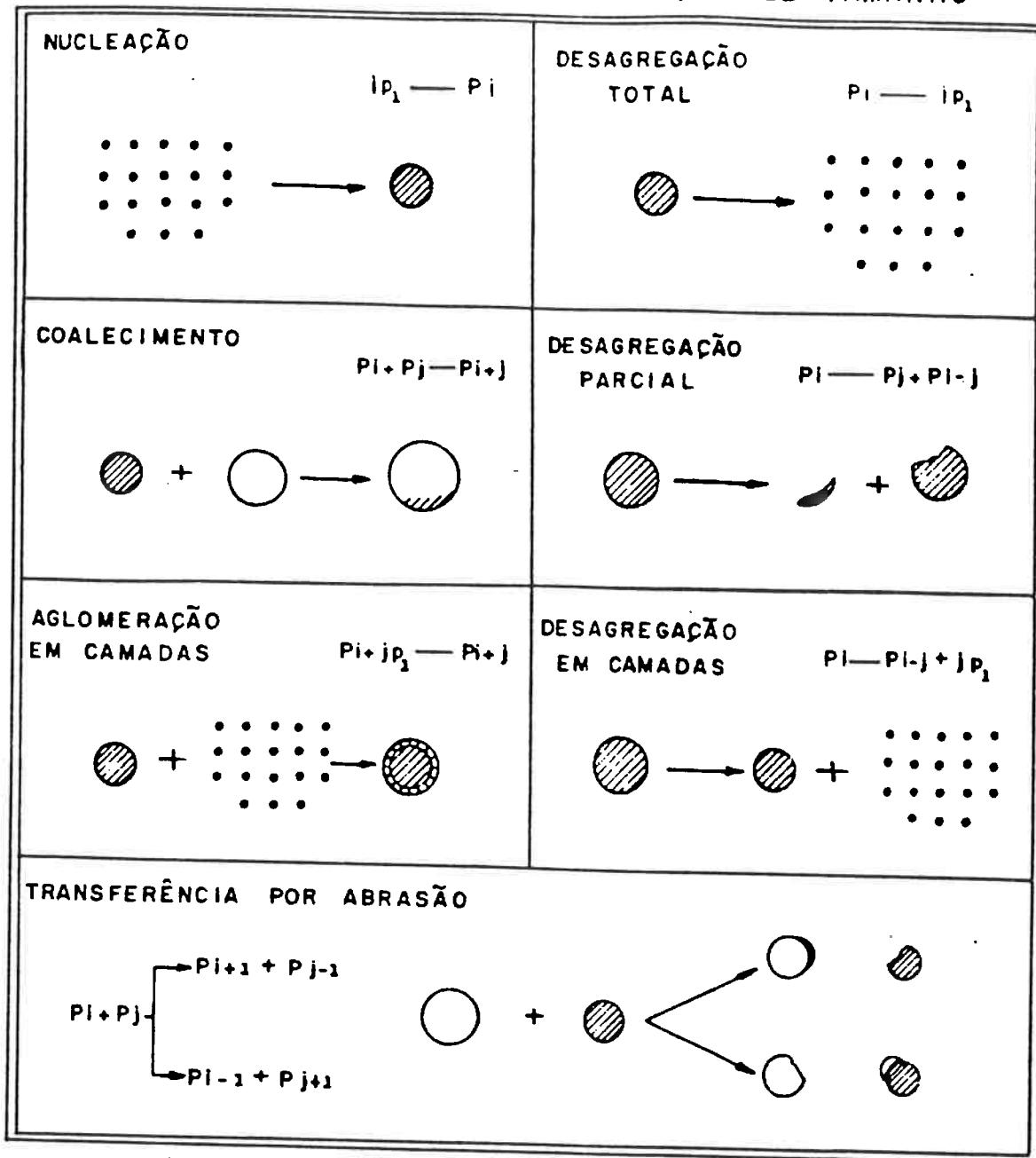
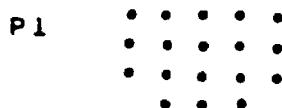
**FINOS****UNIDADE AGLOMERADA**

figura 3.[3].Mecanismos que ocasionam a variação de tamanho dos aglomerados durante a pelotização

### **2.3.Efeito de Variáveis de Processo sobre as Características das Pelotas Verdes.**

Segundo diversos autores citados em [3] vários são os fatores que podem, em maior ou menor grau, influenciar a formação e o crescimento e a resistência física das pelotas.

Quanto a granulometria dos finos de minério de ferro e dos outros constituintes esta deve estabelecer um limite superior da distribuição granulométrica, para as pelotas convencionais, que deve ser de 0.080 mm (180 mesh) e cerca de 80% do material inferior a 0.045 mm (325 mesh), enquanto que para as pelotas auto-redutoras pelo processo Tecnored, 80% deva ser menor que 200 mesh.

É desejável que a forma das partículas seja a mais irregular possível, para favorecer a formação das pelotas. Notou-se que partículas lamelares ou arredondadas dificultam a formação das pelotas. A molhabilidade e consequentemente a tensão superficial do líquido (água) em relação as partículas influem principalmente nos fenômenos capilares, os quais são diretamente relacionados a resistência mecânica das pelotas.

Sabe-se que a resistência mecânica das pelotas verdes é devida a tensão superficial e estas sendo um emaranhado de vasos capilares, a força de coesão é expressa pela seguinte expressão:

$$Z = \frac{0.075 \cdot S \cdot d \cdot (1-p)}{p}$$

onde tem-se:

Z..... é a força capilar ou altura capilar ( cm de coluna de água)

S..... é a superficie específica dos finos ( $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )

d..... é a densidade real do concentrado ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )

p..... é a porosidade da pelota (%)

Da onde se percebe que a força de coesão é diretamente proporcional a superficie específica dos finos e inversamente proporcional ao raio médio capilar, já que a superficie específica dos finos é inversamente proporcional ao raio médio capilar.

O uso de aglomerantes como bentonitas, hidróxido de cálio, argilas, ligantes hidráulicos influe sobre as pelotas no sentido de incrementar a resistência mecânica no manuseio a verde, bem como na formação de compostos químicos em pelotas convencionais como  $\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  e outros com o  $\text{SiO}_2$  e o  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , favorecendo os mecanismos de endurecimento.

No caso de pelotização em disco, a velocidade do mesmo deve estar entre 10 a 30 rpm para o tamanho de disco experimental e a sua inclinação deve estar entre 25° a 65°. Notou-se que quanto maior a inclinação do disco tanto menores serão as pelotas, bem como quanto maior a velocidade de rotação do disco menor será o tempo necessário para que as pelotas atinjam o tamanho desejado[3].

Alguns autores[3] também concluiram que a cinética de crescimento das pelotas depende do teor de umidade durante a pelotização, de modo que quanto maior o teor de umidade durante a operação maior será a taxa de crescimento das pelotas, devido ao fato de a umidade favorecer o mecanismo de coalescimento e portanto, o crescimento das pelotas.

O incremento no teor de carvão e outros componentes hidrofílicos, para um mesmo teor de umidade, é inversamente proporcional ao crescimento das pelotas, visto que a água "não molha" uniformemente as partículas,

proporcionando uma quantidade de água "ativa" cada vez menor para os mecanismos de crescimento durante a pelotização, retardando tal crescimento.

Em experiências de pelotização de finos de hematita em tambor, observou-se que a superfície específica dos finos é diretamente proporcional ao crescimento das pelotas e um aumento do teor de umidade e da taxa de alimentação de finos, há uma diminuição da resistência a compressão a verde das pelotas.

Notou-se também que o aumento do tempo de pelotização leva a um incremento da resistência a verde, isto acontecendo devido a uma maior compactação do aglomerado quando o tempo de pelotização aumenta.

## **2.4.O Mecanismo de Cura das Pelotas Auto-Redutoras (A-R).**

As exigências com relação as propriedades mecânicas a frio das pelotas auto-redutoras são significativamente maiores do que para o caso de pelotas convencionais, pois nestas o endurecimento é obtido principalmente por um mecanismo de intercrescimento dos grãos cristalinos, durante o aquecimento; Ocorrem também reações químicas, fusão incipiente, endurecimento do ligante e cristalização de materiais dissolvidos. Já as pelotas auto-redutoras são diretamente usadas no forno após um determinado período de aproximadamente 28 dias de cura.

Normalmente as pelotas A-R passam por diversas etapas desde a sua fabricação no disco pelotizador até o forno de fusão/redução, devendo apresentar em cada fase propriedades adequadas. Assim as pelotas devem apresentar resistência à quedas, manuseio, transporte e empilhamento na estocagem até a cura (mínimo 28 dias). Após isso as pelotas passam para a etapa de secagem a fim de se remover a umidade e então são carregadas. Esta última fase operacional (após a cura) requer propriedades de resistência mecânica relativamente elevadas para que as pelotas mantenham a sua integridade durante a fusão/redução.

A obtenção de propriedades a frio que satisfaçam os níveis de exigências existentes, tem se fundamentado nos princípios de cura do cimento e da cal hidratada associados ou não com outros materiais empregados também 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. Esses ligantes endurecem por hidratação e/ou carbonatação desenvolvendo resistência na pelota através de mecanismos químicos e físico-químicos bastante complexos.

Os ligantes presentes na composição das pelotas auto-redutoras são basicamente tanto os cimentos do tipo Portland hidráulicos quanto os não-hidráulicos. Os hidráulicos reagem em presença de água formando produtos de hidratação estáveis, enquanto os não-hidráulicos normalmente se combinam com o CO<sub>2</sub>, fornecendo tanto um quanto o outro estruturas rígidas com propriedades típicas relacionadas com o grau de interação que ocorre entre as espécies reagentes.

Dentre os diversos tipos de cimento existentes, tornaram-se importantes como aglomerantes de pelotas auto-redutoras principalmente por razões econômicos, o cimento portland e a cal hidratada. O cimento Portland comum é uma mistura de clinquer moido (silicato tricálcico, silicato dicálcico, aluminato tricálcico e solução sólida de ferrita) e gesso( retardador de pega). A cal hidratada destacou-se como aglomerante em pelotas auto-redutoras porque além da reação com o CO<sub>2</sub> do ar, formando o carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) insolúvel em água, a cal se combina com as argilas presentes resultando em produtos que se solubilizam por hidratação, ou seja, cimentos formados "in loco", envolvendo portanto mecanismos de cura semelhantes aos do cimento convencional, cuja velocidade de cura é lenta (acima de 14dias).

## 2.4.1. Mecanismo de Hidratação dos Cimentos.

Os cimentos Portland consistem essencialmente de vários compostos de cálcio (silicatos e aluminatos) e de outros elementos (óxidos), cujos os principais são listados a seguir:

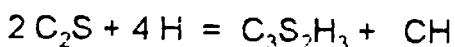
Óxido	Abreviação	Composto	Abreviação
CaO	C	3CaO.SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S
SiO <sub>2</sub>	S	2CaO.SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	A	3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F	4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> AF
MgO	M	4CaO.3Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .SO <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> A <sub>3</sub> S
SO <sub>3</sub>	S'	3CaO.2SiO <sub>2</sub> .3H <sub>2</sub> O	C <sub>3</sub> S <sub>2</sub> H <sub>3</sub>
H <sub>2</sub> O	H	CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O	CS'H <sub>2</sub>

Sendo o cimento Portland composto por uma mistura heterogénea de vários compostos, o processo de hidratação é relativamente complexo e consiste na ocorrência simultânea de inúmeras reações dos compostos com a água. Entretanto, todos os compostos não se hidratam com a mesma velocidade. Sabe-se que os aluminatos reagem muito mais rapidamente que os silicatos.

A reação de hidratação dos aluminatos, representada basicamente pela reação do C<sub>3</sub>A, é imediata, porém só intensa nos primeiros momentos do período de cura. Compostos como C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub>, C<sub>4</sub>AH<sub>19</sub> e C<sub>2</sub>AH<sub>8</sub>, são formados rapidamente, com liberação de grandes quantidades de calor de reação.

Os silicatos, que estão presentes nos cimentos com teores de cerca de 75%, participam ativamente sobre o mecanismo de endurecimento dos cimentos, através das reações de hidratação do tricálcio silicato ( $C_3S$ ) e do dicálcio silicato ( $C_2S$ ).

A completa hidratação do  $C_3S$  e do  $C_2S$  são representadas pelas seguintes equações:



Nota-se que ocorre a liberação de hidróxido de cálcio ( $Ca(OH)_2$ ,  $CH$ ) e um composto denominado tricálcio silicato hidratado ( $C_3S_2H_3$ ), que possui uma estrutura porosa e características de um gel. Assim durante o período de cura a hidratação produz camadas gelatinosas desse produto em volta do grão de cimento. Na solução presente dentro dessa membrana ocorre a solubilização do hidróxido formado e a sua saturação pela sua continua dissolução resulta na precipitação de grandes cristais hexagonais. Após essa supersaturação a membrana de gel sofre ruptura, exudando a solução supersaturada e possibilitando a renovação da frente de reação com a solução de menor concentração. Assim a pega que ocorre durante a hidratação é devido a uma acentuada interconexão entre as partículas hidratadas.

Apesar das reações de hidratação de ambos os silicatos serem semelhantes, algumas diferenças devem ser assinaladas. Notou-se que a reação de hidratação do  $C_2S$  é mais lenta que a do  $C_3S$ , devido basicamente ao fato da estrutura cristalina do  $C_3S$  ser mais aberta (fig 4) e termodinamicamente é um composto metaestável a temperatura ambiente.

Um outro aspecto referente a essas diferenças é que, via cálculos estequiométricos, mostra-se que a hidratação do  $C_3S$  produz 61% de  $C_3S_2H_3$  e 39% de hidróxido de cálcio, enquanto que a hidratação do  $C_2S$  produz 82% de

$C_3S_2H_3$  e 18% de CH. Assim é esperado que devido a menor área superficial ocupada pelo tricálcio silicato hidratado, a resistência final atingida de cimentos com altos teores de  $C_3S$  seja inferior em relação a cimentos com elevados percentagens de  $C_2S$ . Percebe-se também, a partir das equações, que é necessário para a completa hidratação do  $C_3S$  e do  $C_2S$ , 24% e 21% de água, respectivamente.

Assim de uma maneira geral nota-se que as taxas de reatividades com a água de cada um dos compostos do cimento sensivelmente variáveis, é possível mudar as características de resistência dos cimentos simplesmente alterando a composição do mesmo. Resistências iniciais após 3, 7 e 28 dias podem ser conseguidas com cimentos com relativamente altas porcentagens de  $C_3S$  e  $C_3A$ , sendo que no caso de cimentos com altos teores de  $C_2S$ , seriam menores. Também verificou-se que a resistência final de cimentos com altas quantidades de  $C_2S$  seriam superiores as de cimentos com pequenas quantidades de  $C_2S$ . Estudos experimentais confirmam esses dados (fig 5).

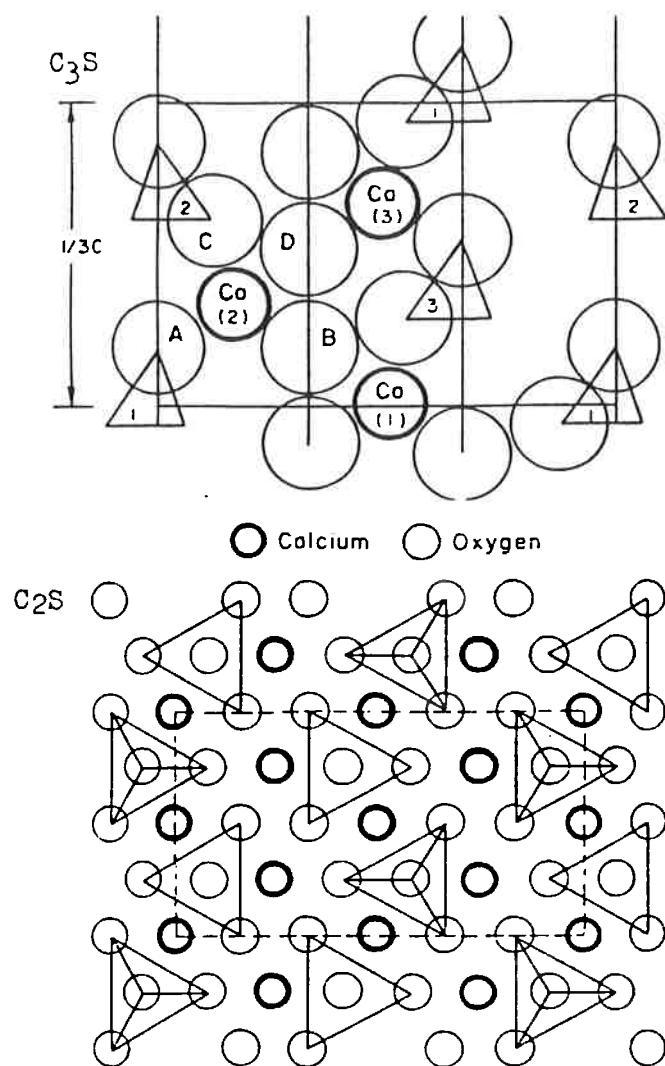


figura 4.[4].Estruturas do C<sub>2</sub>S e C<sub>3</sub>S

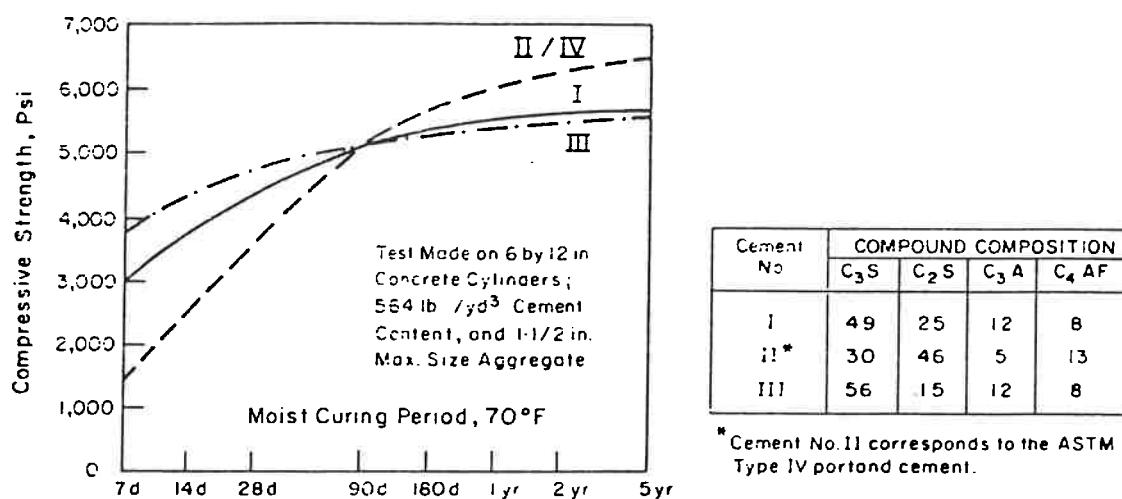
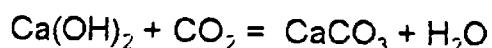


figura 5.[4].Evolução da resistência à compressão

#### **2.4.2.A Hidratação / Carbonatação da Cal Hidratada.**

A ação da cal como ligante se dá através da combinação de duas reações distintas: a reação de carbonatação e a reação hidráulica de hidratação, semelhante ao que acontece na hidratação do cimento, admitida que na presença de sílica e alumina livres formem cimento "in loco".

A reação de carbonatação resulta da reação do hidróxido de cálcio com o CO<sub>2</sub> do ar :



Trata-se de uma reação bastante lenta pela baixa concentração de CO<sub>2</sub> no ar (cerca de 0.04%) e pelo fato de que o carbonato formado na superfície dificulta a difusão de CO<sub>2</sub> e portanto a continuidade da reação. A segunda reação da cal, reação de hidratação, é precedida da reação entre a cal e as argilas presentes com a formação de silicatos e aluminatos que se hidratam desenvolvendo propriedades ligantes, o que caracteriza este tipo de cal como um aglomerante hidráulico. Observa-se que a medida que aumenta o teor de argila, diminui o tempo necessário para o desenvolvimento de pega e melhora o comportamento ligante.

Assim parece evidente que, juntamente com o minério de ferro, os aglomerantes, pelas suas características e pelos produtos que se formam durante a cura, tem uma participação importante e decisiva nas propriedades e no comportamento das pelotas auto-redutoras, tanto a frio quanto em temperaturas elevadas.

### 3.MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho prático consistiu na preparação de pelotas auto-redutoras de diferentes composições (teores crescentes de cimento Ari) e avaliou-se em função das matérias-primas e do tempo a evolução da resistência compressiva das pelotas.

#### 3.1.Materiais

Para a produção das pelotas foram usados os seguintes materiais cuja composição e distribuição granulométrica são mostrados nas tabelas I e II a seguir:

Tabela I - Composições das matérias-primas% - base seca .

	Minério fino de ferro, MBR	Escória de Alto-Forno, CSN	Carvão antracitoso, Sul Africano	Silica Moída	Cal Hidratada, Cobrascal	Cimento Portland Ari
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	97,29	-	-	-	-	2,78
SiO <sub>2</sub>	0,82	34,08	7,67	98,00	0,10	19,05
FeO	-	1,89	1,94	-	-	-
P	0,042	-	-	-	-	-
S	-	-	0,22	-	-	-
CaO	-	41,50	1,35	-	71,84	64,3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,35	10,50	4,10	-	0,62	4,92
MgO	-	6,50	0,20	-	-	0,55
MnO	0,47	2,00	0,08	-	-	-
Cfixo	-	-	70,51	-	-	-
CO <sub>2</sub> (PF)	-	-	-	-	-	-
H <sub>2</sub> O(PF)	-	-	-	-	25,45	-
CO(vol)	-	-	1,40	-	-	-
CH <sub>4</sub> (vol)	-	-	4,20	-	-	-
N <sub>2</sub> (vol)	-	-	1,40	-	-	-
H <sub>2</sub> (vol)	-	-	6,93	-	-	-
SO <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	2,63
K <sub>2</sub> O	-	-	-	-	-	0,73
Na <sub>2</sub> O	-	-	-	-	-	0,04
CaO(livre)	-	-	-	-	-	1,01
outros	1,03	3,53	-	2,00	1,99	3,99

Tabela II - Distribuição granulométrica das matérias-primas (% retida).

PENEIRA Nº ASTM	Minério fino de ferro, MBR	Escória de Alto- Forno, CSN	Carvão antracitoso , Sul- Africano	Silica moida	Cal hidratada	Cimento Portland Ari
40	0,20	-	-	-	-	-
70	1,46	-	1,38	0,022	-	-
100	6,83	-	6,20	0,20	-	-
140	9,00	-	8,23	1,93	-	-
200	24,79	10,10	12,41	2,26	-	-
270	9,56	30,90	11,06	5,10	-	-
325	5,81	-	5,6	5,31	-	-
<150	-	-	-	-	100	100
<325	42,53	69,00-	55,12-	85,19	-	-

Observações:

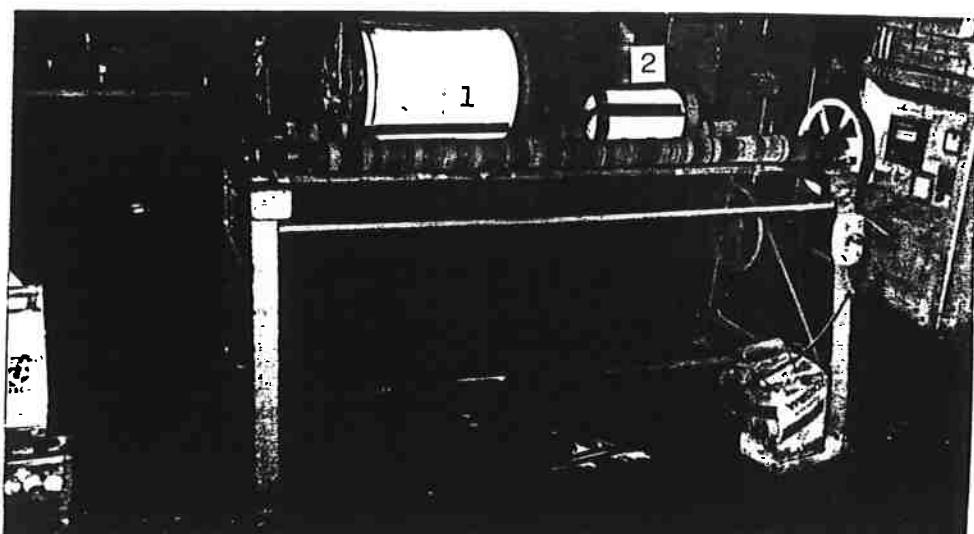
1. A superfície específica do minério de ferro (MBR) é cerca de 1163 Blaine.
2. % de C<sub>3</sub>S no cimento Ari é de aproximadamente 68%.

### **3.2.Métodos Utilizados**

#### **3.2.1. Mistura dos Componentes**

Foram preparadas cargas de 2000 gramas de cada composição sendo que as massas de cada um dos compostos foram medidas em uma balança analítica digital de 2 casas decimais. Após pesagem adicionou-se previamente o minério com o carvão em um cilindro de porcelana ( cilindro1, fig6) no qual inseriu-se juntamente com o material a ser misturado bolas de aço. Essa operação foi realizada durante um intervalo de tempo de 20-30 minutos. Uma operação semelhante foi realizada para a cal e o cimento Ari (cilindro 2, fig6).

Após a mistura do carvão e o minério separou-se cerca de 500 gramas dessa mistura na qual foi adicionada a cal e o cimento já misturados. Assim misturou-se então por mais 10 minutos. Esta última mistura foi então adicionada ao restante de minério e carvão primeiramente misturados e colocadas no cilindro de mistura por mais alguns minutos.



**figura 6.Misturador de bolas**

### **3.2.2.Método de Pelotização**

O disco pelotizador usado para as experiências as experiências é na realidade um prato de bordas cilíndricas (disco) acoplada a uma betoneira (fig.7).O disco possui um diâmetro interno de 50cm, altura da plataforma de 17 cm e velocidade de rotação 27,70 rpm. O ângulo de inclinação é variável, no entanto, foi utilizado valores entre 30- 45° .

Colocou-se uma porção da mistura final no disco no qual iniciava-se o processo de rolamento. Para a nucleação das pelotas pulverizou-se o sistema com uma solução diluída de ácido clorídrico (40ml de H<sub>2</sub>O mais 2 a 3 ml de HCl). Para o crescimento das pelotas a foi realizada uma pulverização periódica juntamente com adição de mistura seca.

O tempo de crescimento não foi padronizado, no entanto o necessário para que se pudesse formar pelotas de diâmetros entre 15 e 18mm que foram classificadas através de um dispositivo manual de classificação ( placa com furos). As pelotas menores que 15mm eram recirculadas, enquanto que as maiores eram destruídas e novamente moídas para dai então serem adicionadas novamente ao disco de pelotização, contudo com menor pulverização.

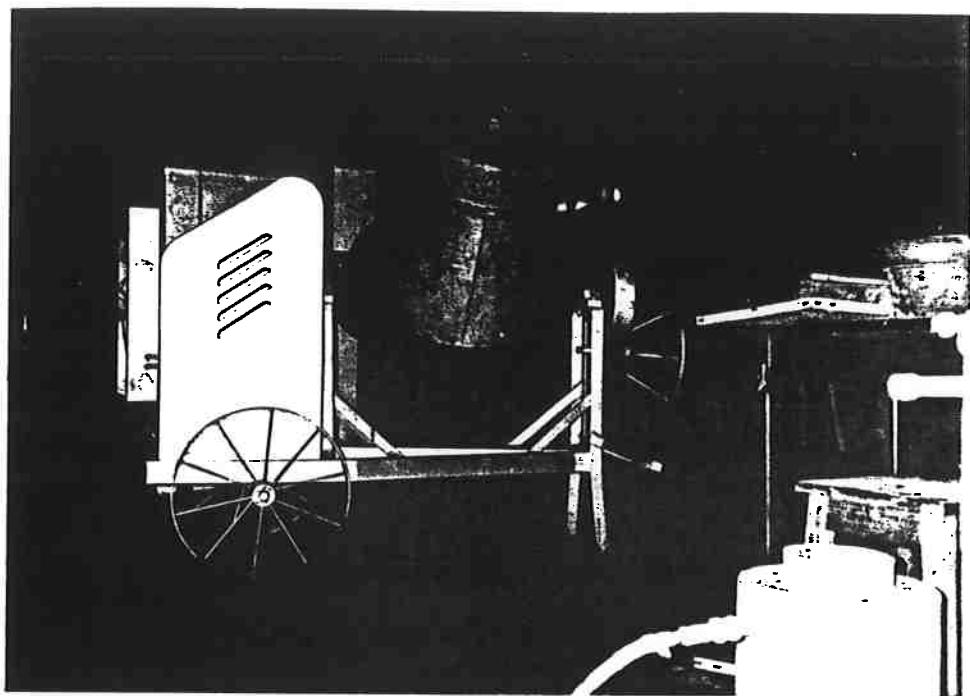


figura 7. Disco pelotizador usado nas experiências

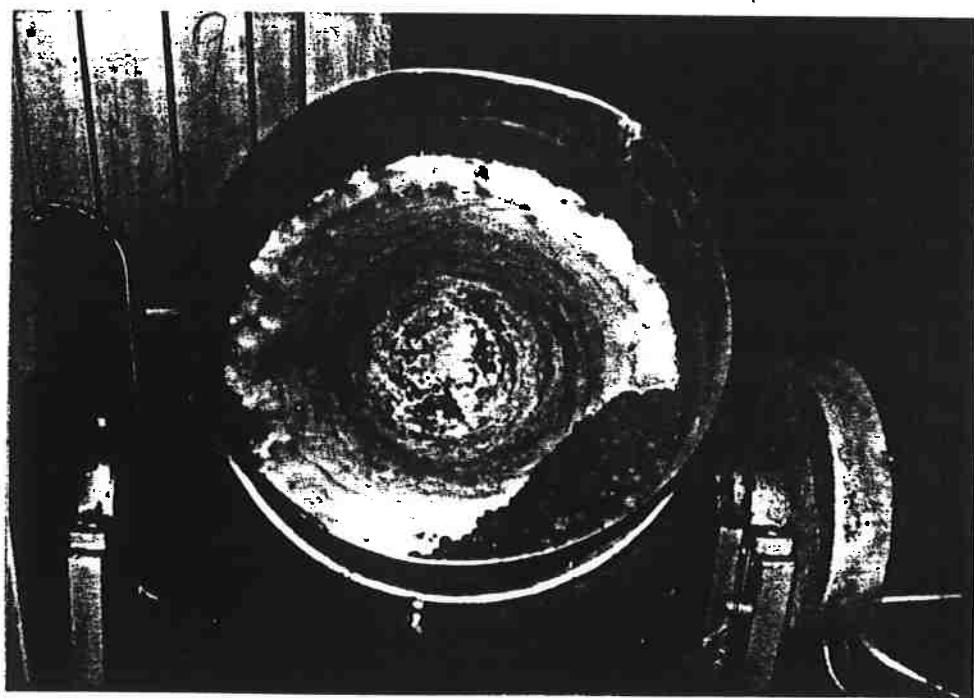


figura 8. Detalhe da operação de pelotização

### **3.2.3.Método de avaliação da resistência à compressão das pelotas**

Nas pelotas formadas a avaliação de sua resistência compressiva foi realizada em uma máquina destinada a medir resistência a verde de corpos de prova de areia que foi adaptada para o uso de pelotas. (fig.8). As pelotas foram ensaiadas logo após o término da pelotização bem como durante o período de cura de cerca de 30 dias. Para cada composição eram ensaiadas 5 a 6 pelotas da onde se obtinha um valor médio de resistência a compressão.

O procedimento para ensaio consiste:

- Colocar o apoio de carga na posição "a" da fig 9;
- Zerar o indicador de pressão (botão 1, fig.9);
- Fixar a pelota entre os discos (fig 10);
- Início do carregamento( botão 2, fig.9);

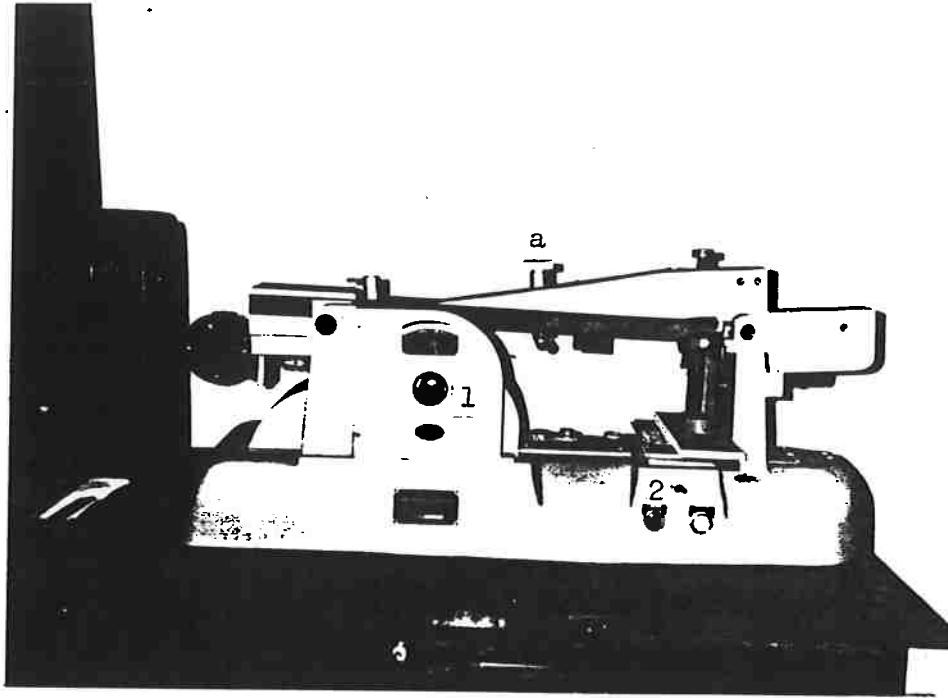


figura 9. Máquina de ensaio de pelotização

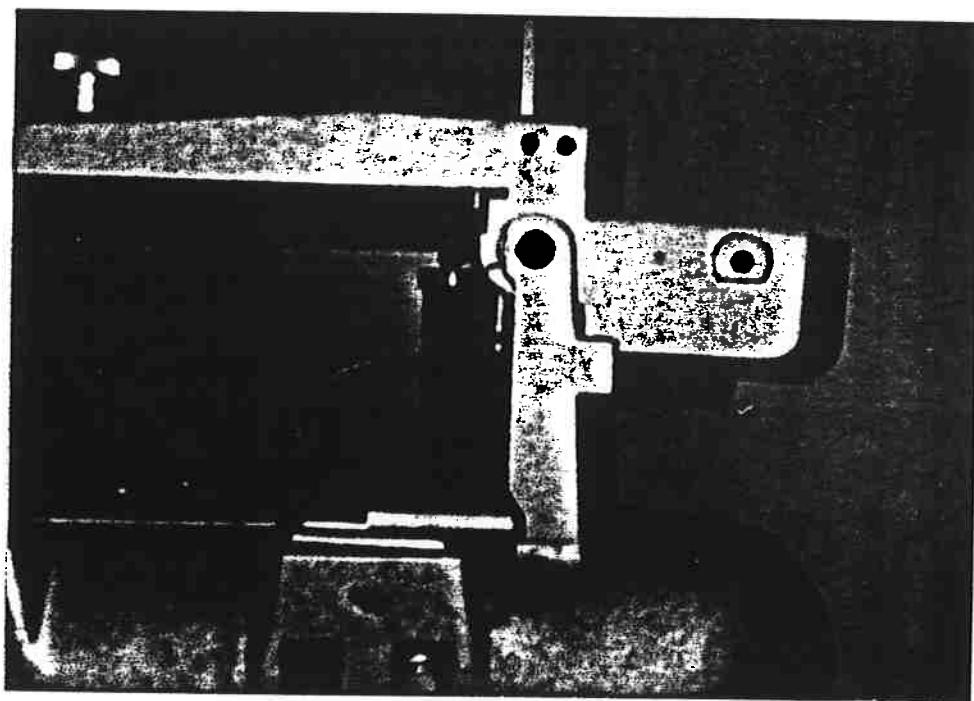


figura 10. Detalhe do carregamento da pelota

#### 4.RESULTADOS OBTIDOS.

A evolução da resistência à compressão das composições estudadas é mostrada nas tabelas a seguir assim como um gráfico comparativo entre as composições(fig11). Nas tabelas os dados de resistência são apresentados na forma como diretamente foram lidos na máquina (VL) e em medidas de kgf/pelota, bem como o parâmetro N corresponde ao número de dias decorridos após a formação da pelota

Tabela IV -- Resistência à compressão das pelotas A-R ,Composição I

DIA	N	Medida 1		Medida 2		Medida 3		Medida 4		Medida 5		Média kgf' pel
		VL	kgf									
21.10	0	6	0.8	5	0.7	5	0.7	8	1.1	6	0.8	0.8±0.2
23.10	2	6	0.8	7	1.0	10	1.4	6	0.8	8	1.1	1.0±0.2
25.10	4	9	1.3	9	1.3	10	1.4	11	1.5	8	1.1	1.1±0.2
27.10	7	8	1.1	8	1.1	10	1.4	9	1.3	10	1.4	1.3±0.2
29.10	9	10	1.4	12	1.7	14	2.0	12	1.7	15	2.1	1.8±0.3
05.11	16	10	1.4	9	1.3	11	1.5	10	1.4	10	1.4	1.4±0.1
12.11	23	20	2.8	20	2.8	18	2.5	20	2.8	18	2.5	2.7±0.2
18.11	30	36	5.0	30	4.2	28	3.9	28	3.9	28	3.9	4.2±0.5

Tabela V -- Resistência à compressão das pelotas A-R ,Composição II

DIA	N	Medida 1		Medida 2		Medida 3		Medida 4		Medida 5		Média kgf/pel
		VL	kgf									
11.10	0	4	0.6	6	0.8	7	1.0	7	1.0	6	0.8	0.8±0.2
14.10	3	20	2.8	30	4.2	24	3.4	30	4.2	24	3.4	3.6±0.6
15.10	4	38	5.3	38	5.3	38	5.3	26	3.6	34	4.8	4.9±0.7
18.10	7	37	5.2	40	5.6	42	5.9	42	5.9	38	5.3	5.6±0.3
20.10	9	44	6.2	51	7.1	41	5.7	54	7.6	46	6.4	6.6±0.8
21.10	10	46	6.4	52	7.3	50	7.0	52	7.3	50	7.0	7.0±0.4
23.10	12	71	9.9	76	10.6	70	9.8	54	7.6	57	8.0	9.2±1.3
25.10	14	67	9.4	105	14.7	70	9.8	90	12.6	88	12.3	11.8±2.2
27.10	16	76	10.6	65	9.1	83	11.6	70	9.8	68	9.5	10.1±1.0
29.10	18	80	11.2	78	10.9	72	10.1	76	10.6	70	9.8	10.5±0.6
05.11	24	78	10.9	76	10.6	76	10.6	82	11.5	86	12.0	11.1±0.6
12.11	31	98	13.7	104	10.4	82	11.5	78	10.9	87	12.1	11.3±1.5
18.11	38	100	14.0	86	12.0	100	14.0	86	12.0	88	12.3	12.9±1.0

Tabela VI -- Resistência à compressão das pelotas A-R , Composição III

DIA	N	Medida 1		Medida 2		Medida 3		Medida 4		Medida 5		Média kgf/ pel
		VL	kgf									
11.10	0	7	1.0	4	0.6	6	0.8	6	0.8	6	0.8	0.8±0.2
14.10	3	854	7.6	46	6.4	62	8.7	56	7.0	58	8.1	7.7±0.8
15.10	4	72	10.0	90	12.6	74	10.4	72	10.0	66	9.2	10.4±1.3
18.10	7	87	12.2	84	11.8	80	11.2	90	12.6	86	12.0	12.0±0.5
20.10	9	102	14.3	95	13.3	100	14.0	104	14.6	98	13.7	14.0±0.5
21.10	10	86	12.0	100	14.0	110	15.4	100	14.0	90	12.6	13.6±1.3
23.10	12	122	17.8	128	17.9	130	18.2	108	15.1	110	15.4	16.9±1.5
25.10	14	109	15.3	97	13.6	119	16.6	98	13.8	101	14.2	14.7±1.2
27.10	16	100	14.0	97	13.6	100	14.0	124	17.4	105	14.7	14.7±1.5
29.10	18	144	20.2	140	19.6	128	17.9	104	14.6	128	17.9	18.0±2.2
05.11	24	152	21.3	144	20.2	148	20.7	148	20.7	142	19.9	20.6±0.5
12.11	31	158	22.1	148	20.7	130	18.2	130	18.2	120	16.6	19.2±2.1
18.11	38	176	24.6	148	20.7	146	20.4	140	19.6	174	24.4	21.9±2.4

Tabela VII --- Resistência à compressão de pelotas A-R, Composição base

DIA	N	Medida 1		Medida 2		Medida 3		Medida 4		Medida 5		Média kgf/pel
		VL	kgf									
15.10	0	10	1.4	10	1.4	6	0.8	6	0.8	10	1.4	1.2±0.3
18.10	3	10	1.4	13	1.8	12	1.7	10	1.4	12	1.7	1.6±0.2
20.10	5	45	6.3	47	6.6	49	6.9	47	6.6	46	6.4	6.6±0.2
22.10	7	66	9.2	60	8.4	66	9.2	60	8.4	66	9.2	8.9±0.4
23.10	8	81	11.3	72	10.0	64	9.0	70	9.8	68	9.5	9.9±0.9
25.10	10	94	13.1	89	12.5	66	9.2	86	12.0	72	10.0	11.4±1.7
27.10	12	110	15.4	92	12.8	81	11.3	102	14.3	70	9.8	12.7±2.2
29.10	14	98	13.7	180	13.7	102	14.3	110	15.4	97	13.6	14.1±0.8
05.11	21	108	15.1	122	17.1	124	17.4	110	15.4	128	17.9	16.6±1.3
12.11	28	130	18.2	138	19.3	122	17.1	150	21.0	154	21.5	19.4±1.9
18.11	35	120	16.8	128	17.9	168	23.5	158	22.1	142	19.9	20.0±2.8

Tabela VIII -Valores médios obtidos de resistência à compressão(kgf/pelota)

N	Composição I	Composição II	Composição III	Composição base
0	0,8-0,2	0,8-0,2	0,8-0,2	1,2-0,3
2	1,0-0,2	-	-	-
3	-	3,6-0,6	7,7-0,8	1,6-0,2
5	-	-	-	6,6-0,2
6	1,3-0,2	-	-	-
7	-	5,6-0,3	12,0-0,5	-
8	1,8-0,3	-	-	9,9-0,9
10	-	7,0-0,4	13,6-1,3	-
14	1,4-0,1	11,8-0,2	14,7-1,2	14,1-0,8
18	-	10,5-0,6	18,0-2,2	-
21	2,7-0,2	-	-	16,6-1,3
24	-	11,1-0,6	20,6-0,5	-
28	4,2-0,5	-	-	19,4-1,9
31	-	11,3-1,5	19,2-2,1	-

# Pelotas Auto-Redutoras

## Evolução da Resistência Compressiva

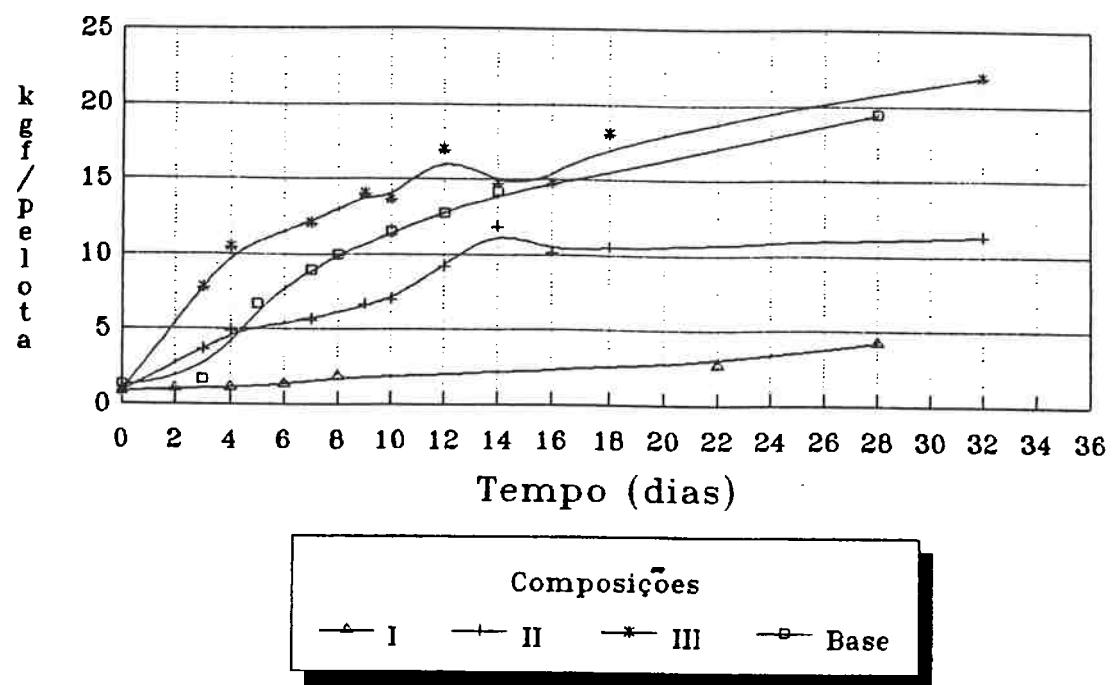


figura 11. Gráfico da evolução da resistência à compressão

## 5.DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Na Tabela VIII percebe-se que a resistência à compressão inicial(a verde) para as pelotas com adição de cimento são cerca de 50% inferiores que os valores para a composição base. Esse fato pode ser explicado pela maior quantidade de ligantes das pelotas de composição base, cerca de 12%, principalmente de cal hidratada, contra aproximadamente 6.5% para as pelotas com adições de cimento.

Pelo o gráfico da figura 11 pode-se também ressaltar alguns pontos. Primeiramente é evidente que a quantidade de ligante utilizada nas pelotas de composição I (1.0% de ari) foi insuficiente para promover um adequado endurecimento da pelota durante a cura, visto que os níveis de resistência obtidos ficaram bastante abaixo do esperado.

Espera-se que níveis de resistência atingidos por pelotas de composição base, após um período de cura de 28 dias, seja obtido por peletas com adições de aceleradores de cura (cimento ari) após um período de endurecimento de 7 a 14 dias. Assim os gráficos apresentados pelas composições II e III dão uma boa indicação que esses resultados podem ser atingidos. A composição II com maior quantidade de cimento (3.0%), em comparação com a composição base, obteve níveis melhores de resistência nos primeiros dias de cura, explicado pela maior quantidade de C<sub>3</sub>S presente em sua composição, sendo a partir de então superado pela composição base. Acredita-se que isso ocorra pela diminuição da porcentagem de C<sub>3</sub>S na composição II, passando o mecanismo de cura dominado pela hidratação do C<sub>2</sub>S, enquanto que na composição base nesse período inicial provavelmente deve ter ocorrido reações entre a cal, sílica e escória livres que promoveram a formação de cimento

"in loco" que se tornou a partir daí em diante o responsável pelo mecanismo de endurecimento.

A composição III foi a que mais se aproximou dos níveis desejados, sendo que nos primeiros 10 dias ela obteve uma elevada ascensão na resistência (devido a maior quantidade de C<sub>3</sub>S) e após esse período percebeu-se uma tendência a estabilização sendo sempre os valores superiores aos da composição base.

## 6.CONCLUSÃO

Dos resultados obtidos nesse trabalho, isto é, níveis iniciais de resistência à compressão de pelotas A-R maiores para pelotas cuja composição apresentem adições da ordem de 6.0% de cimento Portland Ari, realmente comprova-se que os dados de literatura a respeito dos mecanismos de cura de cimentos são coerentes com a prática visto que notou-se experimentalmente que a hidratação do C<sub>3</sub>S (responsável pelo endurecimento das pelotas) é mais rápido se iniciando em um tempo menor que a hidratação do C<sub>2</sub>S.

Assim essas observações podem ser utilizadas na tentativa de se otimizar as composições de pelotas Auto-Redutoras, de modo que níveis de resistência atingidos por pelotas sem adições de cimento de cura rápida após um tempo de cura de 28 dias, sejam obtidos entre 7 e 10 dias.

## 7.SUGESTÃO PARA CONTINUIDADE DO TRABALHO

1.Estudar novas composições de pelotas Auto-Redutoras com teores de cimento Ari da ordem de 10% e verificar a influência desse parâmetro nos níveis de resistência obtidos, bem como a da adição de pequenas quantidades de outros tipos de ligantes como, escória de alto-forno, pouzolanas etc.

2.Estudar composições de pelotas que contenham adições de compostos que também promove a cura rápida [5], como  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{NaCl}$  em teores acima de 2.0%, bem como alguns carbonatos e cloretos alcalinos, como  $\text{MgCl}_2$  e  $\text{AlCl}_3$ .

## 8.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- [1].MARCHESE, E.S.- Crepitação de pelotas Auto-redutoras-Exame de qualificação de mestrado -EPUSP-1993, pág 1-37.
- [2].MOURÃO, M.B- Análise do processo de redução de minério de ferro por carbono na forma de pelotas Auto-Redutoras.-Tese de doutoramento, EPUSP,1988, pág 1-4.
- [3].NASCIMENTO, R.C.- Estudo experimental da .pelotização de finos de minérios de manganês- Dissertação de mestrado, EPUSP,1983, pág 2-39.
- [4].MEHTA, P.K. -Concrete, Structure, Properties and Materials-, Prentice-Hall,1986, pág 171-219.
- [5].LEA, F.M- The Chemistry of cement and concrete - Chemical Publishing Company, Inc, 1971, pág 301.