

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
PMT-594 (Trabalho de Formatura)

***EFEITO DA SUPERFÍCIE ESPECÍFICA DO REDUTOR
NA RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO A FRIO DE
PELOTAS AUTO-REDUTORAS***

Nome : Sérgio Katsutoshi Furukawa
N.USP : 2022307
Orientador : Prof. Dr. Cyro Takano

Resumo

Este trabalho objetivou o estudo do efeito da superfície do carvão mineral na resistência à compressão a frio de pelotas auto-redutoras. Dentre os componentes das pelotas auto redutoras (finos de minério, finos de carvão e aglomerantes, no caso o cimento) o carvão é o que entra em maior proporção após o minério (da ordem de 16%) e é o componente que passa pelo processo de moagem. Assim desejou-se avaliar os benefícios que a moagem mais intensa pode trazer no processo de auto-redução, principalmente pela eventual menor necessidade de teor de aglomerante.

Estudou-se também o efeito do tempo de rolamento, além do tempo de cura na resistência a compressão a frio demonstrando-se que, também constitui em uma das variáveis deste processo.

A necessidade de se obter uma pelota de boa qualidade (resistente a compressão, ou seja, capaz de resistir ao manuseio, carregamento no forno e posterior residência) e que não acarrete em custos excessivos (como grande teor de aglomerantes) foi o grande incentivo para a realização deste experimento.

Diante disso, realizaram-se experimentos com pelotas auto-redutoras contendo: 71,2% de finos de minério de ferro MBR, 6,5% de cimento Portland de alta resistência inicial (ARI) e 22,3% de carvão mineral com 3 superfícies específicas distintas, obtidas através da moagem, sendo que cada composição das pelotas foi submetida a nenhum, 15 minutos e 30 minutos de rolamento após pronto no disco pelotizador, obtendo-se então 9 lotes diferenciados para efeito de comparação.

O efeito da superfície específica e do tempo de rolamento na resistência a compressão a frio foi constatada uma vez que, se obteve resultados que se diferenciam em até 10 kgf para o mesmo tempo de cura, nas condições deste experimento.

Os resultados obtidos foram :

Obs: Para efeito de simplificação designou-se :

Lote 1: Pelotas constituídas de 71,2% de finos de minério de ferro, 6,5% de cimento Portland (ARI) e 22% de carvão mineral com 40% de -325#;

Lote 2: Pelotas constituídas de 71,2% de finos de minério de ferro, 6,5% de cimento Portland (ARI) e 22% de carvão mineral com 56,54% de - 325#; e

Lote 3: Pelotas constituídas de 71,2% de finos de minério de ferro, 6,5% de cimento Portland (ARI) e 22% de carvão mineral com 80% de -325#.

Resistência média de compressão a frio (kgf/pelota de 18mm) em função do tempo de cura (dias)

Obs: os números abaixo da especificação do Lote correspondem ao tempo de rolamento após pronto em minutos.

Tempo de cura (dias)												
	0	4	6	7	8	10	12	14	17	18	20	28
Lote 1 0	0,83	9,34	15,90		15,80		16,20	16,30		17,67	18,18	19,09
Lote 1 15	1,46	11,07	15,42		16,19		16,52	17,14		21,60	21,20	21,40
Lote 1 30	1,44	11,89	16,77		16,20		17,26	18,70		23,67	23,29	23,37
Lote 2 0	1,48	12,37		15,80		16,70	17,08		18,9		25,63	25,79
Lote 2 15	1,47	13,8		15,87		16,99	17,20		20,80		25,84	25,91
Lote 2 30	1,52	15,8		16,89		17,25	17,85		21,41		26,70	26,83
Lote 3 0	1,53	15,97		17,30		18,50	17,38		21,50		26,71	26,80
Lote 3 15	1,81	16,80		17,47		18,30	17,40		21,96		27,84	28,02
Lote 3 30	1,95	16,85		17,55		18,30	18,25		22,55		28,40	29,16

Índice

1. Introdução teórica

- 1.1 Considerações iniciais
- 1.2 Princípios do processo de pelletização
- 1.3 Cinética da pelletização
- 1.4 Propriedades das pelotas
- 1.5 Cura a frio
- 1.6 Moagem do carvão
 - 1.6.1 Distribuição de tamanhos
 - 1.6.2 Mecanismo de moagem dos carvões
 - 1.6.3 Modelo de moagem do carvão
 - 1.6.4 Segregação granulométrica

2. Materiais

- 2.1 Introdução
- 2.2 Minério de ferro
- 2.3 Cimento
- 2.4 Carvão Mineral Antracitoso

3. Métodos

- 3.1 Confeção das pelotas auto-redutoras
- 3.2 Método de moagem do carvão
 - 3.2.1 Problemas com a análise granulométrica do carvão mineral a seco
 - 3.2.2 Análise granulométrica a úmido (processo)
- 3.3 Caracterização da matérias-primas
 - 3.3.1 Minério de ferro MBR
 - 3.3.2 Cimento Portland (Alta resistência inicial)
 - 3.3.3 Carvão Mineral Antracitoso
 - 3.3.4 Umidade das matérias primas
 - 3.3.5 Análise granulométrica no MALVERN
 - 3.3.6 Determinação da superfície específica

- 3.4 Composição química (base seca) das matérias-primas
- 3.5 Composição com base na análise granulométrica a úmido
- 3.6 Procedimento de mistura para pelletização
- 3.7 Processo de pelletização (Prática)

4. Resultados experimentais e discussões

4.1 Resistência a compressão a frio de pelotas do Lote 1(71,2% de Minério de Ferro, 6,5% de cimento Portland, 22,3% de Carvão Mineral 40% -325# na análise a úmido), em função do tempo de cura e do tempo de rolamento no disco pelletizador após pronto.

4.2 Resistência a compressão a frio de pelotas do Lote 2(71,2% de Minério de Ferro, 6,5% de cimento Portland, 22,3% de Carvão Mineral 56,54% -325# na análise a úmido), em função do tempo de cura e do tempo de rolamento no disco pelletizador após pronto.

4.3 Resistência a compressão a frio de pelotas do Lote 3(71,2% de Minério de Ferro, 6,5% de cimento Portland, 22,3% de Carvão Mineral 80% -325# na análise a úmido), em função do tempo de cura e do tempo de rolamento no disco pelletizador após pronto.

5. Conclusões

6. Referências Bibliográficas

1.Introdução Teórica

1.1 Considerações iniciais

Provavelmente o mais antigo processo empregado para a obtenção de metais consiste na mistura de um minério oxidado com uma fonte de carbono, que pode ser vegetal ou fóssil, e o subsequente aquecimento dessa mistura, em geral pela queima de parte do próprio carbono. Em linhas gerais este processo continua até hoje como o mais importante na metalurgia extrativa e na siderurgia.

Uma das vias de utilização de carbono sólido como redutor, em processos de redução direta (2) (redução do minério por redutor sólido ou gasoso, sem fusão do produto e em processos envolvendo redução-fusão), que tem merecido os esforços de pesquisa em vários países, é a que utiliza pelotas auto-redutoras, constituídas de minério de ferro e carvão (vegetal ou fóssil), podendo conter ainda aglomerantes e/ou fluxantes. O uso de pelotas auto-redutoras como forma de carga para redução tem alguns atrativos que indicam um alto potencial de utilização desta técnica. Podem-se citar entre eles: 1) possibilidade de utilização de diversas fontes de ferro: finos de minério de ferro, resíduos de aciaria, resíduos piritosos ustulados, etc.; 2) possibilidade de utilização de diversas 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, contato íntimo entre as partículas, e geração do gás redutor internamente à mistura, pode-se prever 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, que podem ser : fornos de cuba, fornos cubilô, fornos rotativos, fornos elétricos a arco, retortas, etc.

Um dos principais motivos que leva ao estudo das pelotas auto-redutoras, é a de se tratar de um processo de aproveitamento de finos de minério de ferro, que se encontra numa faixa granulométrica que não possui aplicação direta nos processos convencionais de redução.

O processo de fabricação de pelotas auto redutoras envolve, em princípio, três etapas distintas, são elas:

- 1) preparação das matérias primas;
- 2) fabricação das pelotas; e
- 3) cura a frio das pelotas.

O objetivo da pelotização é a obtenção das pelotas de tamanho desejado e com resistência adequada para ser transportada para o local de cura, bem como posteriormente, para o equipamento de secagem e o forno.

1.2. Princípios do processo de pelotização

Quando finos de um material é umedecido, uma fina película líquida se desenvolve na superfície de cada grão, e ligações intergranulares são formadas nos pontos de contacto, ocorrendo uma interação gradual à medida que as partículas são roladas no disco pelotizador (*figural*).

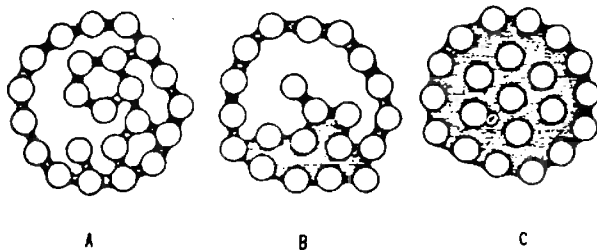


figura 1 : Mecanismo de formação de pelotas

A força de atração inicial (1) se deve a “pontes” de água ou meniscos, as quais não são capazes de garantir ainda uma resistência suficiente. A medida que a água é adicionada, as películas líquidas presentes sobre a superfície começam a coalescer, unindo-se, porém não evitando a presença de cavidades contendo ar. A coerência das partículas é afetada pelas forças superficiais devidas ao movimento do menisco entre cada grão. A pelota cresce na proporção que os finos são adicionados e passem a se unir ao núcleo. Forças mecânicas que são produzidas pelo choque entre as pelotas são responsáveis pela expulsão do ar enclausurado nas cavidades e o estágio de capilaridade começa. Neste estágio a água passa a preencher os vazios intergranulares deixados pelo ar, passando a exercer uma força de capilaridade (*figura 2*).

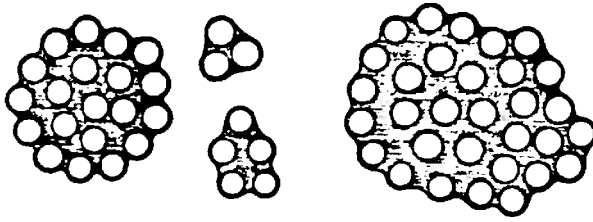


figura 2 : Mecanismo de formação de pelotas através da força de capilaridade

A primeira teoria de pelletização foi criada por C.V.Firth em 1944, ele atribuiu ao disco pelletizador a coerência entre as partículas. A intensidade da força de atração é devida ao seguinte fato : uma pelota grande colide-se com uma pelota pequena recém produzida forçando a se compactar .

A Teoria da força de capilaridade (1) foi proposta por M.Tigerskjöld e P.A.Ilmoni, a intensidade da força é ligada a altura da coluna do líquido (água) no capilar, então:

$$h = 2\sigma \cos\delta / r\rho g$$

onde:

- σ é a tensão superficial do líquido (N.cm^{-1})
- δ é o ângulo de contacto entre o líquido e a fase sólida
- r é o raio de capilaridade (cm)
- ρ é a densidade do líquido (g.cm^{-3}), e
- g é a aceleração da gravidade (cm.s^{-2})

Então, dentro de uma pelota a coesão entre os grãos e sua resistência são diretamente proporcionais ao valor de h , o qual aumenta com a diminuição do diâmetro dos capilares. Como a água é o principal líquido no processo de pelletização, podemos considerar:

$\delta=0^\circ$ portanto $\cos \delta=1$, e $\rho(\text{água}) = 1\text{g.cm}^{-3}$ a 20°C para simplificação. Então o chamado constante de capilaridade (1) é obtido pela equação :

$$k_c = 2 \sigma \cos \delta / \rho g = 0,15$$

sendo assim :

$$h = 0,15 \cdot r \text{ (cm)}$$

1.3. Cinética da pelotização

Pelotização de finos é um processo contínuo; neste processo partículas de material são umedecidas, aglomeradas pela movimentação do disco pelotizador. Além desses fatores, há também a participação do fenômeno de capilaridade e interações surgidas pelo movimento de rotação. Existem 2 fases na pelotização : 1) formação dos núcleos; e 2) crescimento das pelotas.

A nucleação começa quando o material é atingido por um “spray” de água que umedece o material particulado. As partículas umedecidas se movem juntamente e começam a se unir devido as interações decorrentes da presença de água (vide item 1.2 princípio do processo de pelotização), sendo que seu crescimento se dá a medida que a mistura é alimentada no disco pelotizador.

1.4 Propriedades das pelotas

As principais propriedades das pelotas estão associadas as :

1) capacidade de conformação das pelotas - decorre de inúmeros fatores como granulometria e sua distribuição, superfície específica, molhabilidade e composição mineralógica;

2) composição granulométrica do material - é responsável pela resistência da pelota, decorrente da coesão das partículas e cinética de formação;

3) superfície específica - está intimamente ligada a granulometria e a porosidade. A resistência deve aumentar com o aumento da superfície específica, porém não necessariamente de maneira proporcional;

4) molhabilidade - combinada com a tensão superficial do líquido é responsável pela conformabilidade e resistência a verde da pelota; e

5) eficácia da mistura - é uma propriedade importante pois nas pelotas é imprescindível a sua homogeneização.

1.5 Cura a frio

A alma deste tratamento é criar um esqueleto através do aglomerante (cimento, nesta pesquisa), o qual garante a coesão entre os grãos individuais ,ou como um todo. A melhor estrutura é aquela em que cada propriedade é favorecida pela obstrução dos poros da pelota a ser

confeccionada. A temperaturas baixas o comportamento do aglomerante é de significativa importância, pois determina toda a sequência de processos a serem utilizados na confecção, na pelotização e no processo de aumento de resistência. Podem ser usados como aglomerantes: cimento, aglomerantes baseados em magnésio, sulfetos ferrosos, substâncias betuminosas, piche, calcáreo, alcatrões, sulfatos, resinas epóxi, etc. Contudo, apenas alguns destes são largamente usados, pois, muitos destes possuem voláteis incapazes de serem retirados. No caso do cimento, seu poder aglomerante se deve a uma série de mecanismos de hidratação que serão descritos da seguinte forma:

Para facilitar o manuseio, as fórmulas químicas das substâncias envolvidas nas reações do cimento podem ser escritas de forma simplificada, como se segue:

C = CaO (óxido de cálcio)

S = SiO₂ (óxido de silício)

A = Al₂O₃ (óxido de alumínio)

F = Fe₂O₃ (óxido de ferro)

H = H₂O (água)

CH = Ca(OH)₂ (hidróxido de cálcio, cal hidratada)

Cs = CaSO₄ (sulfato de cálcio)

C₃S = 3CaO . SiO₂ (silicato tricálcico)

β-C₂S = β-2CaO . SiO₂ (silicato β-dicálcico)

C₃S₂H₃ = 3CaO . 2SiO₂ . 3H₂O (silicato tricálcico hidratado ou tobermorita)

Normalmente considera-se que as reações de hidratação do cimento ocorrem em 5 etapas distintas, conforme apresentado na *tabela 1* (5).

A reação de hidratação na etapa inicial, tanto do silicato tricálcico (C₃S) quanto do dicálcico (C₂S), libera Ca(OH)₂ que se solubiliza fácil e rapidamente na água, provocando um aumento de pH para valores da ordem de 13 (5).



O valor de x (relação molar H/S) no silicato hidratado varia entre 1,5 e 1,0, enquanto o valor de y (relação molar C/S) diminui progressivamente de 3 (inicial) até cerca de 1,5.

A saturação da solução pela dissolução contínua de Ca(OH)₂ resulta na sua precipitação na forma de cristais hexagonais. Nesta etapa inicial a hidratação do cimento é da ordem de 1%, sendo a maioria dos produtos de reação solúveis e aderem ao grão de cimento.

tabela 1 : Etapas de hidratação do cimento (5)

Etapa de hidratação	Velocidade de Reação Exotérmica (cal/grau/hora)	Duração Típica	Principais Transformações Físicas ou Químicas
Reação inicial	40	5 - 10 min.	Hidratação inicial, dissolução de Ca(OH)_2 e aumento de pH, precipitação de Ca(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 das partículas.
Período de cura	Decresce gradualmente para 1 (em 24 horas)	360 min. até vários anos	Produtos de hidratação exudam para dentro dos capilares.
Período de hidratação destrutiva	Negligenciável	1 a 5 anos	Descontinuidade da pasta circundante endurecida provocada pela expansão devida a hidratação posterior.

A reação de hidratação do silicato dicálcico (C_2S) é mais lenta do que a do silicato tricálcico (C_3S), devido ao fato da estrutura cristalina do C_3S ser mais porosa e termodinamicamente menos estável.

O período de inatividade se caracteriza por uma diminuição na velocidade de hidratação na medida em que as superfícies tornam-se revestida com uma camada dos produtos de reação.

Durante o período de cura a hidratação produz camadas gelatinosas de silicato de cálcio em volta do grão de cimento. Através desta membrana gelatinosa que envolve o cimento a água se difunde para o interior do grão e os produtos hidratados se difundem para fora. O mecanismo de difusão é controlado pelos gradientes de concentração das espécies e pelas suas constantes de difusão. O estágio de velocidade limite é provavelmente a difusão do íon SiO_2 através da camada gelatinosa (íon de maior tamanho), ou seja, a membrana é mais permeável ao íon cálcio do que ao íon SiO_2 , resultando inicialmente na precipitação de cristais de Ca(OH)_2 fora da membrana e na formação preferencial de silicatos gelatinosos dentro da membrana, produzindo uma zona de transição supersaturada entre o grão e as vizinhanças da membrana.

A camada gelatinosa cresce a medida que a partícula se dissolve e a massa de água transferida para o interior da membrana é maior do que a dos produtos de reação que se difundem para fora, produzindo pressão osmótica.

A membrana de gel sofre ruptura, exudando a solução supersaturada e possibilitando a renovação da frente de reação com solução de menor concentração. Com isso há um aumento na velocidade de reação até um novo material gelatinoso provocar uma nova ruptura.

As rupturas ocorrem aleatoriamente tanto em relação ao tempo quanto à localização, intensificando a reação exotérmica e provocando o início da pega. A pega é identificada pelo período de rupturas.

Nem todas as reações de hidratação resultam na entrada em solução em cimento. Parte das reações de hidratação podem se dar através do mecanismo topoquímico, reações de estado sólido, principalmente nos estágios finais quando a difusão se torna mais difícil.

A pega se deve a hidratação do silicato tricálcico - $\text{C}_3\text{S} + (3-y+x) \rightarrow \text{CySHx} + (3-y)\text{Ca(OH)}_2$ - cujo produtos forma lamelas interconectadas. No final da pega (6 horas) cerca de 15% do cimento está hidratado, com uma acentuada interconexão entre as partículas hidratadas. A pega rápida se dá pela hidratação do $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 (\text{C}_3\text{A})$, podendo ser retardada pela adição de gesso, que provoca uma diminuição na concentração.

Após esta fase inicia-se o período de cura que pode se prolongar por vários meses, através do preenchimento dos espaços capilares com gel de cimento. A hidratação ocorre normalmente até uma profundidade de 5 a 9 microns num espaço de 9 meses, sendo que em torno de 50% das partículas de cimento apresentam dimensões maiores do que 10 microns. Quando o cimento atinge hidratação completa contém em torno de 25% de hidróxido de cálcio e 50% de silicato tricálcico hidratado em volume. O

silicato tricálcico contribui para a resistência à tração e da resistência a compressão.

A intensidade das reações de hidratação estão relacionadas com as atividades dos vários compostos que participam dessas reações. Uma forma de se avaliar o comportamento das substâncias com relação a este aspecto é através da medida de profundidade de hidratação com o tempo de reação.

Na *tabela 2* apresenta-se valores de profundidade de hidratação dos principais compostos que participam das reações no cimento (5).

tabela 2 : profundidade de hidratação com o tempo para compostos de cimento (5).

TEMPO DE REAÇÃO	PROFUNDIDADE DE HIDRATAÇÃO (microns)		
	$3\text{Ca} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$2 \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$
3 horas	4,35	1,68	-
1 dia	-	2,25	0,28
3 dias	5,68	-	-
7 dias	-	4,32	0,62
28 dias	5,68	4,44	0,83
150 dias	-	-	3,5

Os dados da tabela anterior indicam que a resistência inicial (até 3 dias) é dada pela hidratação dos aluminatos tricálcicos ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ e $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), com maior atividade para os aluminatos. Posteriormente (até o 7º dia) há um aumento na hidratação do silicato tricálcico ($3\text{CaO}_3 \cdot \text{SiO}_2$), e em menor intensidade estende-se até o 28º dia determinando o aumento da resistência, com pequena contribuição da hidratação do silicato dicálcico ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$). O aumento da resistência do cimento após o 28º dia se deve ao aumento da hidratação do silicato dicálcico.

O mecanismo de hidratação do cimento é relativamente complexo e envolve um número acentuado de reações possíveis. Já em 1935 Schwete (6) apresentava uma série de reações de hidratação que foram sofrendo modificações ao longo do tempo. As reações atualmente aceitas são as seguintes (7) :

- $\text{C}_3\text{S} + y\text{H} \rightarrow \text{CSH} \text{ (C/S = 0,8 a 2,0)}$
- $\text{C}_2\text{S} + y\text{H} \rightarrow \text{CSH} + \text{CH} \text{ (C/H = 0,8 a 2,0)}$
- $\text{C}_3\text{A} + 6\text{H} \rightarrow 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
- $\text{C}_3\text{A} + \text{CH} + 12\text{H} \rightarrow 4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$

- e) $C_2(A,F) + CH + 5H \rightarrow 3Ca \cdot (Al_2O_3, Fe_2O_3) \cdot 6H_2O$
 f) $C_2(A,F) + 2CH + 11H \rightarrow 4CaO \cdot (Al_2O_3, Fe_2O_3) \cdot 13H_2O$
 g) $C_2(A,F) + CH + S_n + H(5-2n) \rightarrow 3CaO(Al_2O_3, Fe_2O_3)_n SiO \cdot (6-2n)H_2O$
 h) $C_3A + Cs + 12H \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$
 i) $C_2A(A,F) + Cs_n + CH(2-n) + 11H \rightarrow 3CaO \cdot (Al_2O_3, Fe_2O_3)_n CaSO_4 \cdot (1-n) +$
 $Ca(OH_2) \cdot 12H_2O$
 j) $C_3A + 3Cs + 32H \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$
 l) $C_2(A,F) + Cs_n + CH(4-n) + 31H \rightarrow 3CaO \cdot (Al_2O_3, Fe_2O_3)_n + CaSO_4(3-n) +$
 $Ca(OH_2) \cdot 32H_2O$

Verifica-se que das reações de hidratação resulta um número acentuado de produtos com elevado grau de hidratação. Certamente, senão na totalidade, ou pelo menos uma parcela significativa destas reações devem ocorrer na pelota contendo cimento como ligante, durante o seu período de cura, e no aquecimento no forno esta água é eliminada na forma de vapor d'água, numa faixa de temperatura típica (normalmente acima de 550 a 600°C).

A reação de carbonatação é também mais lenta que a de hidratação devido a teores baixos de CO₂ na atmosfera, além do carbonato formado atuar como "barreira".

Resumindo, as pelotas ganham resistência por processos que envolvem transformações físico-químicas do aglomerante.

1.6. Moagem do carvão

O carvão tem um comportamento à moagem muito peculiar quando comparado a outros minerais. Este comportamento decorre de vários fatores que passamos a enumerar :

1) o carvão mineral é um material heterogêneo. Além dos diversos macerais, cada um com um comportamento mecânico individualizado, contém matéria mineral que pode ser liberada da matéria carbonosa, ou intimamente associada a ela. No primeiro caso, a matéria mineral vai ter seu comportamento mecânico próprio; no segundo, ela vai alterar o comportamento do seu litotipo ao qual estiver associada.

2) o carvão possui uma quantidade enorme de poros, trincas, interfaces e capilaridades. Cada uma dessas singularidades se constitui num ponto de fraqueza. Bond (4) estabeleceu o princípio, segundo o qual o ponto mais fraco de um sólido é quem determina a sua resistência mecânica. No carvão, as descontinuidades são tantas que elas prevalecem sobre quaisquer outros fatores e determinam a capacidade de resistência do carvão a cominuição. São tantas estas imperfeições e é tão marcante

sua influência, que, para fins de teorização, o carvão pode ser considerado como um sólido pré-fraturado;

3) o carvão tem uma quantidade de água (umidade) superficial ou contida nos poros e capilares muitas vezes maior que a usual para os minerais de uso comum. Está muito bem estabelecido que a presença de água aumenta o caráter elasto-plástico dos materiais. Está também muito estabelecido que rochas secas são mais frágeis que rochas úmidas, o que traduz em uma diminuição da sua resistência a compressão em até 40% .

A explicação para este último comportamento é dada em termos de tensão superficial . A presença de água acarretaria em um reajustamento das superfícies das trincas. Baugham (4), em 1945 verificou que a adsorção de vapor de água facilita a deformação plástica do carvão, dificultando em consequência, a sua moagem. No sentido inverso, Brown (4), em 1953, aqueceu carvão a 130 °C e verificou que o carvão seco quebrava com muito maior facilidade; e

4) esta mesma quantidade de água torna muito mais difícil as operações de peneiramento, estocagem e manuseio.

1.6.1 Distribuição de tamanhos

Na Inglaterra, entre 1945 e 1947, uma comissão composta de produtores e distribuidores de carvão tentou padronizar os tamanhos em que o carvão seria comercializado, de modo a racionalizar e maximizar seu aproveitamento. A conclusão dos três anos de trabalho foi de que nada havia de ser feito, e que a classificação normalmente utilizada para produzir os tamanhos comercializados estava de acordo com uma lei de distribuição dos tamanhos de partículas de carvão.

Em 1933, Rosin e Rammler haviam (4) descobrimos que os finos de carvão se distribuem segundo uma lei exponencial, que leva o seu nome. Em 1936 Bennet demonstrou que essa lei era estendida para todos os tamanhos de ROM. Posteriormente, verificou-se que a lei de Rosin-Rammler governava a distribuição de tamanhos de todos os produtos de moagem de carvões.

Este fato foi comprovado por Nóvoa (4), em 1968, para os carvões brasileiros. Pode se assumir como fato consumado que todo produto de moagem de carvão obedece a distribuição de Rosin-Rammler.

A lei de Rosin-Rammler (4) é a seguinte:

$$\% \text{ retida} = 100. e^{-\left(\frac{d}{f}\right)^n}, \text{ onde :}$$

d é a abertura da peneira ,

f é a constante de finura ,

n é a constante de dispersão da distribuição.

Quatro fatos decorrem dessa propriedade:

- 1) qualquer carvão escalpado superiormente conterá uma quantidade constante de finos, que nota-se ser significativa ;
- 2) o cuidado que se toma na cominuição do carvão de modo a alterar a distribuição, de modo a gerar menores quantidades de finos, pode resultar em tamanhos maiores de partículas. Isto entretanto ocorrerá à custa da resistência mecânica, e, qualquer esforço a que as partículas sejam submetidas implicará na reversão à distribuição estável de tamanhos ;
- 3) uma vez conhecida a constante de dispersão de um dado carvão, a distribuição granulométrica dos diferentes produtos de moagem pode ser prevista com total confiança, com o peneiramento em uma única peneira; e
- 4) o *rank* dos carvões não afeta o fato de a sua distribuição granulométrica obedecer a Lei de Rosin-Rammler, embora as propriedades à moagem, abrasão, cisalhamento e dureza sejam afetadas.

1.6.2 Mecanismo de moagem dos carvões.

Comportamento microscópico

Os macerais (4) possuem as seguintes características :

vitrinina : a caolinita e a telinita são fases homogêneas e contínuas. Destacam-se facilmente dos demais constituintes. Assemelham-se a um sólido visco-elástico quando lhe é aplicada uma força, ocorre uma superposição de uma deformação puramente elástica, de uma deformação remanente temporária e de uma deformação permanente que pode ser considerável;

exinita : a esporinita se constitui de grãos duros e resistentes, com formato arredondado. A cutinita apresenta essas mesmas características em planos basais, paralelos ao acamamento, reportando o mesmo comportamento visco-elástico. É de se esperar entretanto, acentuada anisotropia no caso da cutinita;

inertinita : é em tudo semelhante ao carvão vegetal, com propriedades mecânicas desprezíveis.

Comportamento macroscópico

Desta forma, os litotipos (4) apresentam os seguintes comportamentos :

fusênio : caráter frágil, baixas propriedades mecânicas. É extremamente friável e se desagrega em pó fino sob a menor ação mecânica;

vitrênio : é caracterizado por um diaclasamento intenso, o que atenua a sua resistência mecânica. Tem entretanto propriedades superiores às do fusênio e apresenta certa plasticidade;

durênio : é duro e frágil, dez vezes mais resistente que o vitrênio; e

clarênio : apresenta propriedades intermediárias ao vitrênio e durênio.

1.6.3 Modelo de moagem de carvão.

Tudo isto leva a idealizar o carvão como um sólido pré-fraturado, isto é, com fraquezas e descontinuidades dispostas aleatoriamente por todo o seu volume. O modelo de moagem do carvão admite então :

- 1) as fraturas se iniciam nestas descontinuidades; e
- 2) uma parte da energia aplicada é empregada na propagação das fraturas e o restante, para gerar novas fraquezas.

Simulando esse mecanismo e considerando a distribuição das fraquezas pré-existentes como aleatória, bem como a das fraquezas geradas, obtém-se uma lei estatística de distribuição de tamanhos semelhante a lei de Rosin-Rammler.

1.6.4 Segregação granulométrica

É de se esperar que os vários microconstituintes do carvão venham a se distribuir de maneira diferenciada nas diferentes frações granulométricas de um produto de moagem. É de se esperar também a concentração do fusênio nas frações finas e do durênio nas frações grossas.

2. Materiais

2.1 Introdução

Na elaboração das pelotas auto-redutoras foram utilizados os seguintes materiais : 1) Minério de Ferro (MBR), 2) Cimento Portland de alta resistência inicial (ARI) $\Rightarrow$ aglomerante, 3) Carvão Mineral Antracitoso $\Rightarrow$ agente redutor, com 3 granulometrias distintas (uma sem moagem, e outras duas com intensidades de moagens diferenciadas)

2.2 Minério de Ferro

Os finos de minério de ferro hematítico utilizado na confecção das pelotas pertence a Minerações Brasileiras Reunidas (MBR), gerado nas operações de mineração. O minério de ferro brasileiro, de modo geral, é considerado como sendo uma hematita não hidratada, porém, identificou-se a presença de fases hidratadas através de ensaios de difração de Raios-X (8).

2.3 Cimento

Os cimentos são aglomerantes inorgânicos de composição variada e normalmente classificados em cimentos hidráulicos e não hidráulicos (9,10). No caso de pelotas auto-redutoras são mais importantes os cimentos hidráulicos. Os hidráulicos reagem em presença de água formando produtos de hidratação estáveis. O cimento Portland comum é uma mistura de clínquer moído (silicato tricálcico - C_3S , silicato dicálcico - C_2S , aluminato tricálcico - C_3A e solução sólida de ferro aluminato tetracálcico - C_4AF) com gesso. O cimento ARI contém teores maiores de C_3S e é mais fino.

2.4 Carvão Mineral Antracitoso

Dentre as principais matérias-primas que compõe a pelota, os agentes redutores participam das reações de redução de óxido de ferro em temperaturas normalmente superiores a $800^{\circ}C$, sendo considerados praticamente inertes em relação a aglomeração e aos mecanismos de cura envolvidos.

Considerando-se o uso do carvão mineral como redutor, que possui carbono fixo superior a 50%, sua composição de matérias voláteis certamente contribui para o aumento do volume das fases gasosas no interior da pelota submetida ao aquecimento.

Às características e ao comportamento das diferentes matérias-primas utilizadas na confecção de pelotas auto-redutoras se somam fatores relacionados com as variáveis envolvidas no processo de fabricação.

3. Métodos

3.1 Confecção das pelotas auto-redutoras

O estudo e a fabricação de pelotas auto-redutoras envolve, em princípio, cinco etapas distintas, quais sejam :

- 1) caracterização das matérias primas (Análise granulométrica, cálculo do teor de umidade e determinação da superfície específica);

2) preparação das matérias primas (Secagem em mufla a aproximadamente 95 °C, peneiramento (peneira Tyler 65# ou USS 70#), moagem com duas intensidades distintas no caso do carvão e processo de mistura dos componentes (item 3.5);

3) a fabricação das pelotas propriamente dita;

4) a cura das pelotas; e

5) caracterização das pelotas quanto a sua resistência à compressão.

3.2 Método de moagem do carvão

Como o tema da pesquisa se refere a influência da superfície específica na resistência a compressão de pelotas auto-redutoras, procedeu-se a moagem de 2 lotes de 2,5 kg com intensidades distintas de modo a se obter um quadro comparativo.

⇒ lote 1:

- moagem em um moinho de bolas durante 3 minutos para se verificar a eficiência do moinho

- fez-se o quarteamento da mistura moída e procedeu-se a análise granulométrica de aproximadamente 50g da amostra.

- secou-se na mufla segundo as mesmas condições do (item 3.1) obtendo as seguintes valores *tabela 3* :

tabela 3: Análise granulométrica do carvão mineral antracitoso moído durante 3 minutos

massa a ser analisada = 45,61 g

Peneira (Tyler)	massa retida (g)	% retida em cada peneira	% passante
100#	1,98	4,37	95,63
200#	19,70	43,52	52,11
250#	5,99	13,23	38,88
325#	16,44	36,32	2,54
-325#	1,15	2,54	
	$\Sigma = 45,26$		

-Diante dos resultados acima, estimou-se que para se obter uma granulometria diferenciada do carvão natural (sem moagem) dever-se-ia moer o primeiro lote durante aproximadamente 30 minutos.

moinho utilizado: moinho de bolas

duração da moagem : 23 minutos

- fez-se novamente o quarteamento obedecendo o procedimento descrito anteriormente

- obteve-se os seguintes resultados (*tabela 4*):

⇒ lote 2:

- moagem em um moinho de bolas durante 3 horas

- fez-se o quarteamento da mistura moída

3.2.1 Problemas com a análise granulométrica do carvão mineral a seco.

Segundo (4), o carvão mineral antracitoso é um material muito gorduroso, sendo assim, compromete a análise granulométrica a seco uma vez que este passa a se impregnar nas peneiras obstruindo a passagem de grãos subseqüentes.

Diante desta constatação decidiu-se em proceder a análise granulométrica a úmido, trabalhando em termos da porcentagem de grãos menores que 325 # (Tyler).

3.2.2 Análise granulométrica a úmido (Processo).

- colocar na peneira uma massa conhecida do material a ser analisado;

- colocar água em um recipiente (preferencialmente uma bacia);

- movimentar a peneira sobre a água, de tal maneira que a sua tela esteja situada exatamente no nível da superfície de água;

- repetir este procedimento trocando as bacias até que a água permaneça incolor;

- adicionar floclantes nas bacias de modo que os grãos do material se aglomerem, vindo a se precipitar;

- retirar a água com cuidado, evitando a saída dos “flocos” de material;

- secar em estufa a massa retida na peneira (massa retida); e

- Secar em estufa a massa das bacias, massa em “flocos” (massa passante).

Observação : A gordura presente no carvão, sendo ele imiscível em água entra em suspensão evitando a obstrução da peneira.

3.3 Caracterização das matérias primas

3.3.1 Minério de ferro MBR

- 1) Peneiramento de 150g (peneira USS 70# ou Tyler 65#)
- 2) Secagem em uma mufla a aproximadamente 95 °C até sua constância em peso.
- 3) Realização da análise granulométrica utilizando os seguintes instrumentos:
 - a) peneiras Tyler 100#, 200#, 250#, 325 #; e
 - b) vibrador de mesa (fotografia 1) com:
 - 300 rpm
 - durante 15 minutos.

Obteve-se a seguinte granulometria (tabela 4):

3.3.2 Cimento Portland (Alta resistência inicial)

- 1) Peneiramento de 55g (peneira USS 70# ou Tyler 65#)
- 2) Secar em uma mufla a aproximadamente 95 °C até sua constância em peso.
- 3) Realizar uma análise granulométrica utilizando os seguintes instrumentos:
 - a) Peneiras Tyler 100#, 200#, 250#, 325 #; e
 - b) Vibrador de mesa com:
 - 300 rpm
 - durante 15 minutos.

Obteve-se a seguinte granulometria (tabela 4):

3.3.3 Carvão Mineral Antracitoso

- 1) Peneiramento de 55g (peneira USS 70# ou Tyler 65#)

2) Secar em uma mufla a aproximadamente 95°C até sua constância em peso.

3) Realizar uma análise granulométrica utilizando os seguintes instrumentos:

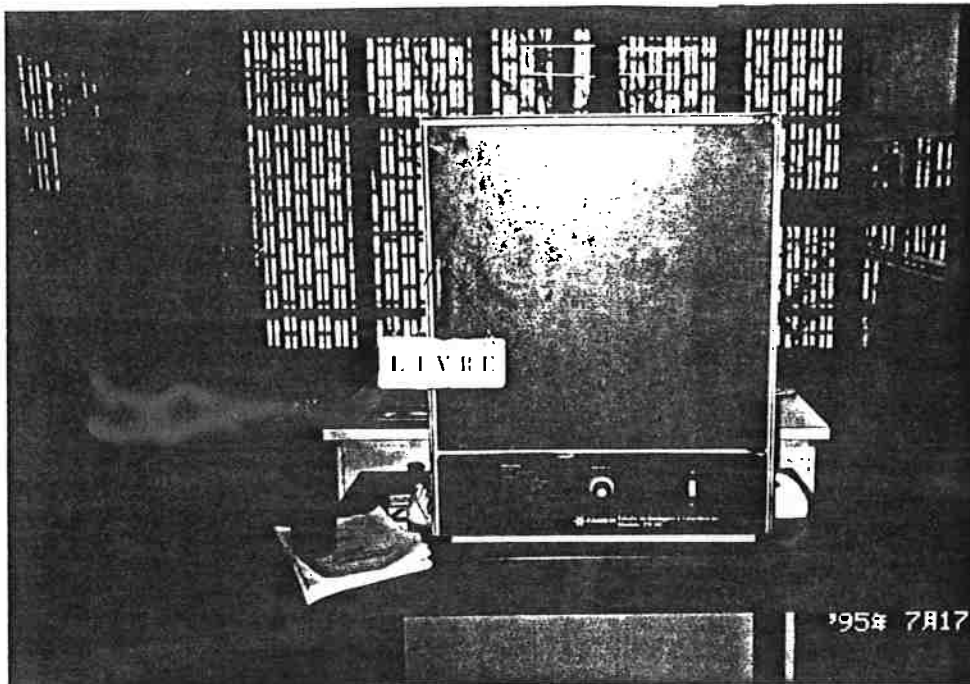
a) Peneiras Tyler 100#, 200#, 250#, 325 #; e

b) Vibrador de mesa (fotografia 1) com:

- 300 rpm

- durante 15 minutos.

Obteve-se a seguinte granulometria (*tabela 4*):



fotografia 1 : Mufla utilizada para secagem e cálculo da umidade

tabela 4: Análise granulométrica das matérias-primas

Análise granulométrica a seco do carvão mineral sem moagem			
Peneira (Tyler)	massa retida (g)	% retida em cada peneira	% passante
100#	2,39	4,83	95,17
200#	19,15	38,73	56,44
250#	4,01	8,11	48,33
325#	23,24	47,0	1,31
-325#	0,65	1,31	
	$\Sigma = 49,44$		

Análise granulométrica a seco do carvão mineral moído durante 23 minutos			
Peneira (Tyler)	massa retida (g)	% retida em cada peneira	% passante
100#	1,26	2,7	97,3
200#	20,84	44,75	52,5
250#	6,01	12,9	39,64
325#	16,89	36,3	3,37
-325#	1,57	3,37	
	$\Sigma = 46,57$		

Análise granulométrica a úmido do carvão mineral sem moagem		
PENEIRAS	MASSA	%
> 325 #	24,9 g (retida na peneira)	53,89 % (retido)
< 325 #	21,3 g (floculado no recipiente)	46,10 % (passante)
	$\Sigma = 46,2 \text{ g}$	

Análise granulométrica a úmido do carvão moído durante 23 minutos		
PENEIRAS	MASSA	%
> 325 #	21,0 g (retida na peneira)	46,36 % (retido)
< 325 #	24,3 g (floculado no recipiente)	53,64% (passante)
	$\Sigma = 45,3 \text{ g}$	

Análise granulométrica a úmido do carvão mineral moído durante 3 horas		
PENEIRAS	MASSA	%
> 325 #	11,8 g (retida na peneira)	25,6 % (retido)
< 325 #	34,3 g (floculado no recipiente)	74,4 % (passante)
	$\Sigma = 46,1 \text{ g}$	

Análise granulométrica a seco do minério de ferro MBR			
Peneira (Tyler)	massa retida (g)	% retida em cada peneira	% passante
100#	5,05	4,95	95,05
200#	16,52	16,19	78,05
250#	7,17	7,03	71,82
325#	24,49	24	47,82
-325#	48,78	47,82	
	$\Sigma = 102,01$		

Análise granulométrica a seco do cimento Portland			
Peneira (Tyler)	massa retida (g)	% retida em cada peneira	% passante
100#	0,02	0,04	99,96
200#	8,31	15,60	84,36
250#	6,29	11,80	72,56
325#	20,82	39,14	33,37
-325#	17,75	33,37	
	$\Sigma = 53,19$		

3.3.4 Umidade das matérias-primas

tabela 5 : Umidade das matérias-primas

Matéria-prima	Umidade (%)
Minério de ferro MBR	0,18 %
Carvão Mineral Antracitoso	4,73 %
Cimento Portland	0,35 %

3.3.5 Análise granulométrica no MALVERN

Para se certificar da diferença existente na granulometria entre os três lotes, foi solicitado uma análise em um aparelho MALVERN, obtendo os seguintes resultados:

Certificado 091/95 - PMT

Mostr.: CARVÃO MINERAL (C1) S/MUER

Meio de Dispersão: álcool

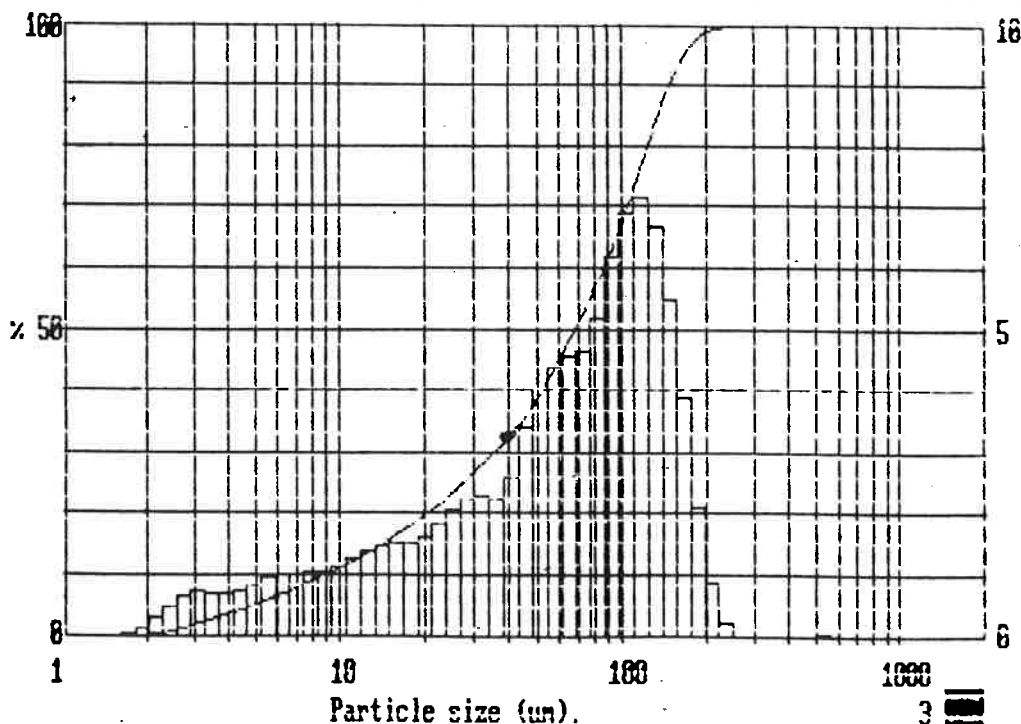
Lentes: 63/300mm

Op.: Dora

Data: 22/02/95

2/24 pil 1KV1604 **MALVERN SB.83 **

High Size	Under %	High Size	Under %	High Size	Under %	High Size	Under %	High Size	Under %	High Size	Under %	Span
												2.03
564	100	156	92.8	43.0	34.1	11.9	13.1	3.27	2.3	0.90	0.0	D14.5J
502	100	138	87.3	38.2	31.3	10.5	11.8	2.91	1.7	0.80	0.0	74.11µm
446	100	123	80.6	34.0	23.2	9.38	10.8	2.59	1.0	0.71	0.0	
397	100	110	73.4	30.2	26.9	8.33	9.8	2.30	0.5	0.64	0.0	D13.2J
353	100	97.5	66.5	26.9	24.6	7.42	8.5	2.05	0.2	0.57	0.0	22.91µm
314	99.9	86.7	60.3	23.9	22.6	6.60	7.5	1.82	0.1	0.50	0.0	
279	99.9	77.1	55.1	21.3	20.7	5.87	6.5	1.62	0.1	0.45	0.0	D12.0.5J
249	99.9	68.6	50.5	18.9	19.1	5.23	5.5	1.44	0.0	0.40	0.0	146.03µm
221	99.7	61.0	45.9	16.8	17.5	4.65	4.7	1.28	0.0	0.35	0.0	
197	98.8	54.3	41.5	15.0	16.0	4.14	3.9	1.14	0.0			D12.0.1J
175	96.7	48.3	37.5	13.3	14.5	3.68	3.2	1.02	0.0			8.76µm
source = Res.:blended												D12.0.5J 67.73µm
Quality = 95.268												
Volume distribution						Sp.S.H 0.2619 g/cc.						



Certificado 092/95 - PMI

Amostra: CARVÃO MINERAL (C2) MUIVO

Meio de dispersão: álcool

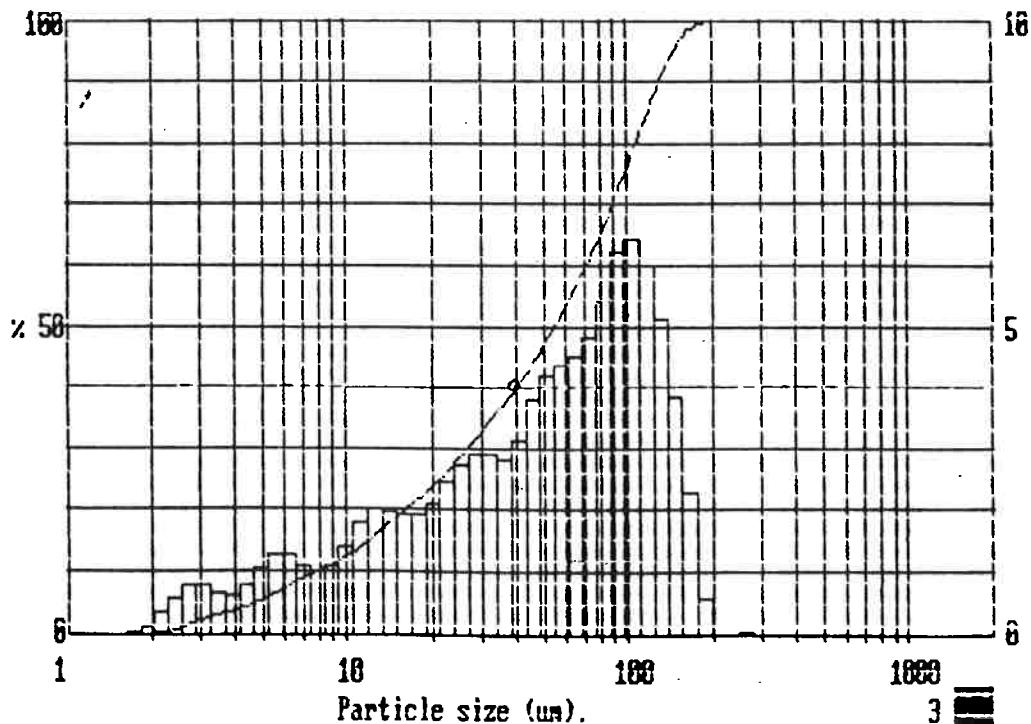
Lente 45: b3/30000

Up: uora

Data: 22/02/95

2/24 pil. 1KV1654 **MLHKMs SEI B U **

High Size	Under %	High Size	Under %	High Size	Under %	High Size	Under %	High Size	Under %	High Size	Under %	Span
564	100	156	97.1	43.0	42.1	11.9	13.0	3.27	2.8	0.50	0.0	D[4,3]
502	100	138	93.2	38.2	39.0	10.5	13.2	2.91	2.0	0.80	0.0	62.11µm
446	100	123	88.1	34.0	36.1	9.38	11.8	2.59	1.2	0.71	0.0	
397	100	110	82.1	30.2	33.2	8.35	10.6	2.30	0.8	0.64	0.0	D[3,2]
353	100	97.5	75.6	26.9	30.3	7.42	9.6	2.05	0.2	0.57	0.0	20.33µm
314	100	86.7	69.3	23.9	27.6	6.60	8.5	1.82	0.1	0.50	0.0	
279	100	77.1	63.9	21.3	25.1	5.87	7.2	1.62	0.0	0.45	0.0	D[v,0.9]
249	100	68.6	59.1	18.9	23.0	5.23	5.9	1.44	0.0	0.40	0.0	128.29µm
221	100	61.0	54.5	16.8	21.0	4.65	4.9	1.28	0.0	0.35	0.0	
197	99.9	54.3	50.1	15.0	19.0	4.14	4.1	1.14	0.0			D[v,0.1]
175	99.4	48.3	45.9	13.3	17.0	3.68	3.4	1.02	0.0			7.76µm
Source = Res.: Blended												D[v,0.5]
Quality = 95.582												54.09µm
Volume distribution												
Sp.S.H 0.2351 g/cc.												



Certificado 033/95 - FMI

Mostra: LHKVHU MINERAL (CS) + MUIDO

Meio de dispersão: álcool

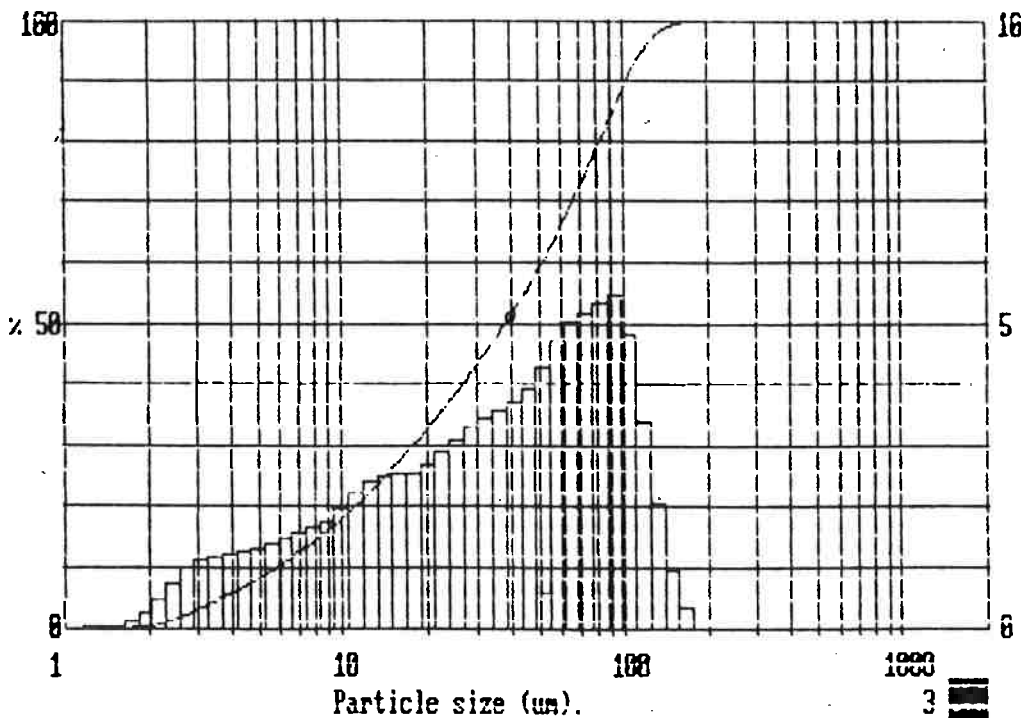
Lentes: 63/30000

Op.: Dora

Data: 22/02/95

2724 pil 1KV1634 **HLKMS SET B D **

High Under Size %	High Under Size %	High Under Size %	High Under Size %	High Under Size %	High Under Size %	Span
504 100	136 99.7	43.0 94.2	11.9 21.3	3.27 4.0	0.90 0.0	014.31
502 100	138 98.7	38.2 90.5	10.5 19.0	2.91 2.8	0.80 0.0	46.76µm
446 100	123 96.6	34.0 46.9	9.38 17.1	2.59 1.6	0.71 0.0	
397 100	110 93.2	30.2 43.5	8.35 15.3	2.30 1.1	0.64 0.0	013.21
353 100	97.5 88.3	26.9 40.1	7.42 13.6	2.05 0.6	0.57 0.0	15.33µm
314 100	86.7 82.8	23.9 37.0	6.60 12.0	1.82 0.3	0.50 0.0	
279 100	77.1 77.4	21.3 34.1	5.87 10.5	1.62 0.2	0.45 0.0	019.0.91
249 100	68.6 72.2	18.9 31.4	5.23 9.0	1.44 0.1	0.40 0.0	101.24µm
221 100	61.0 67.2	16.8 28.6	4.65 7.7	1.28 0.1	0.35 0.0	
197 100	54.3 62.4	15.0 26.3	4.14 6.4	1.14 0.0		019.0.11
175 100	48.3 58.1	13.3 23.7	3.68 5.2	1.02 0.0		5.67µm
Source = Res.: Blended						
Quality = 93.326						019.0.51
Volume distribution						37.62µm
Sp.S.H 0.3914 #/cc.						



Certificado 098/95 - F.M.

Mostra: MINERIO DE FERRO (MOR)

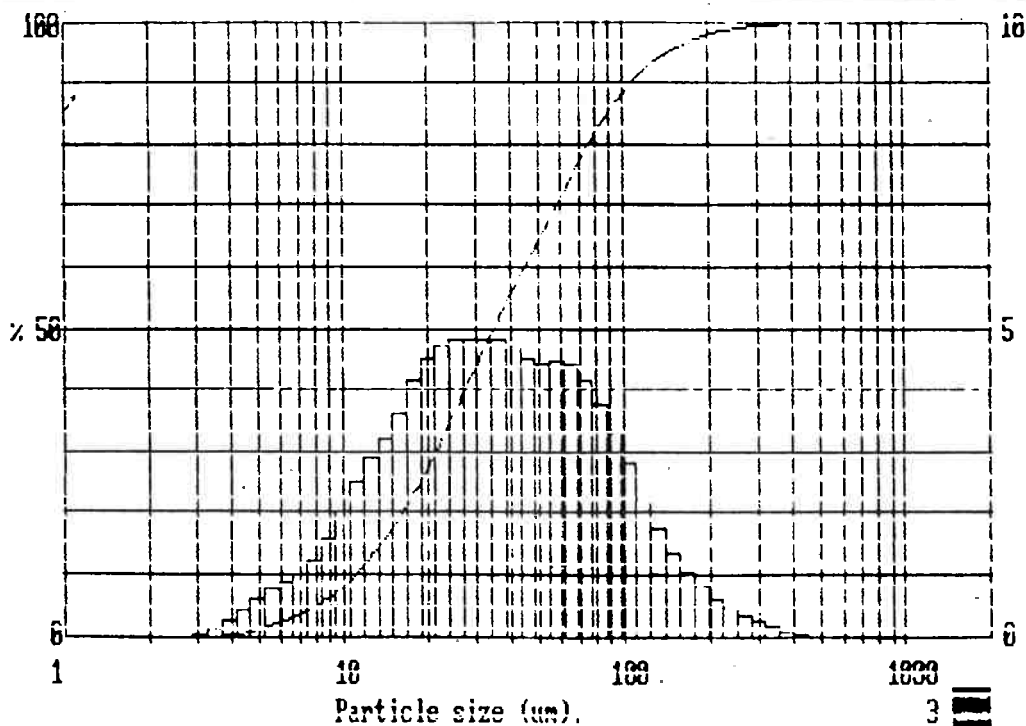
Meio de dispersao: alcool Lentes: 63/300mm

Op. 1: Lora

Data: 22/06/95

2724 p11 IKV1654 **HLKMS sel B D **

High Size	Under λ	High Size	Under λ	High Size	Under λ	High Size	Under λ	High Size	Under λ	High Size	Under λ	Span σ ₁ /σ ₀
564	100	136	96.1	43.0	58.8	11.3	11.6	3.27	0.0	0.90	0.0	014.31
502	100	138	94.7	38.2	54.1	10.5	9.1	2.91	0.0	0.80	0.0	50.27µm
446	100	123	93.0	34.0	43.2	9.38	7.1	2.59	0.0	0.71	0.0	
337	93.9	110	90.7	30.2	44.4	8.33	5.5	2.30	0.0	0.64	0.0	013.21
353	93.8	97.5	87.9	26.9	33.6	7.42	4.2	2.05	0.0	0.57	0.0	23.62µm
314	93.7	86.7	84.6	23.5	34.8	6.60	3.2	1.82	0.0	0.50	0.0	
279	93.4	77.1	80.8	21.3	30.0	5.87	2.3	1.62	0.0	0.45	0.0	014.0.91
249	93.1	68.6	76.6	18.9	25.5	5.23	1.5	1.44	0.0	0.40	0.0	106.07µm
221	98.6	61.0	72.2	16.8	21.4	4.65	0.9	1.28	0.0	0.35	0.0	
197	98.0	54.3	67.7	15.0	17.7	4.14	0.5	1.14	0.0			014.0.11
175	97.1	48.3	63.3	13.3	14.5	3.68	0.2	1.02	0.0			11.03µm
Source = Res.: Blended				Quality = 98.60%				Div. 0.51				34.62µm
				Volume distribution				Sp. S.H 0.2040 B4/CC.				



Certificado 095/95 - FRI
 Mostra: LIMENIO KURILMANO
 Meio de Dispersao:alcoo1

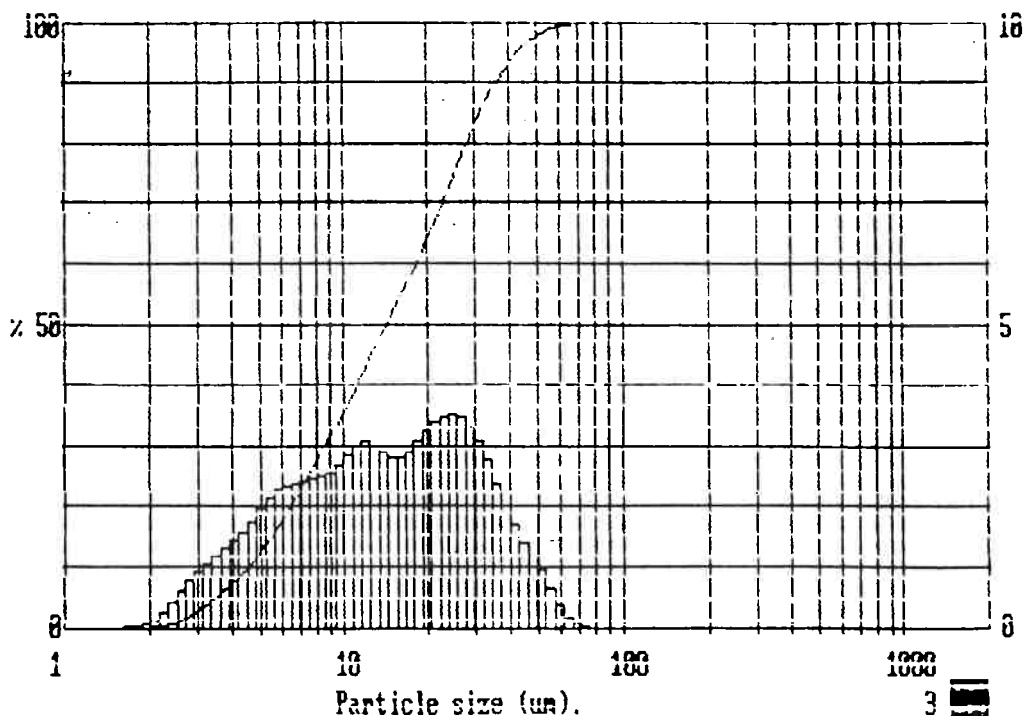
Lente:63mm

Op. 1207a

0000010003
 Data:22/02/95

2/24 pil 1KV1634 **HLHRMS Sel b D **

High Size	Under %	High Size	Under %	High Size	Under %	High Size	Under %	High Size	Under %	High Size	Under %	Span 2.20
118	100	53.3	98.6	24.0	72.6	10.8	38.6	4.84	11.8	2.18	0.4	DL4.3J
110	100	49.5	97.6	22.3	69.1	10.0	35.8	4.50	10.0	2.03	0.2	17.6/μm
102	100	46.1	96.4	20.7	65.7	9.31	33.0	4.13	8.4	1.88	0.1	
95.2	100	42.8	95.0	19.3	62.4	8.66	30.3	3.83	7.0	1.73	0.1	DL3.2J
88.6	100	39.8	93.3	17.9	59.3	8.03	27.9	3.62	6.7	1.63	0.1	9.81μm
82.4	100	37.0	91.2	16.7	56.3	7.43	25.3	3.37	4.3	1.31	0.0	
76.6	100	34.4	88.8	15.5	53.5	6.77	23.0	3.13	3.4	1.41	0.0	DLV.0.3J
71.2	99.9	32.0	86.1	14.4	50.7	6.48	20.6	2.91	2.3	1.31	0.0	33.63μm
66.2	99.9	29.8	83.0	13.4	47.8	6.02	18.3	2.71	1.7	1.22	0.0	
61.6	99.7	27.7	79.6	12.5	44.8	5.60	16.0	2.52	1.1			DLV.0.1J
57.3	99.3	25.8	76.1	11.6	41.7	5.21	13.8	2.34	0.6			4.30μm
Source = Data:datat995												Model indp
Record No. = 157												Log. Ditr. = 2.702
Local length = 63												Volume Conc. = 0.04/bx
Presentation = pil												Sp. S.M 0.6118 #/cc.
Volume distribution												DLV.0.3J
												14.15μm



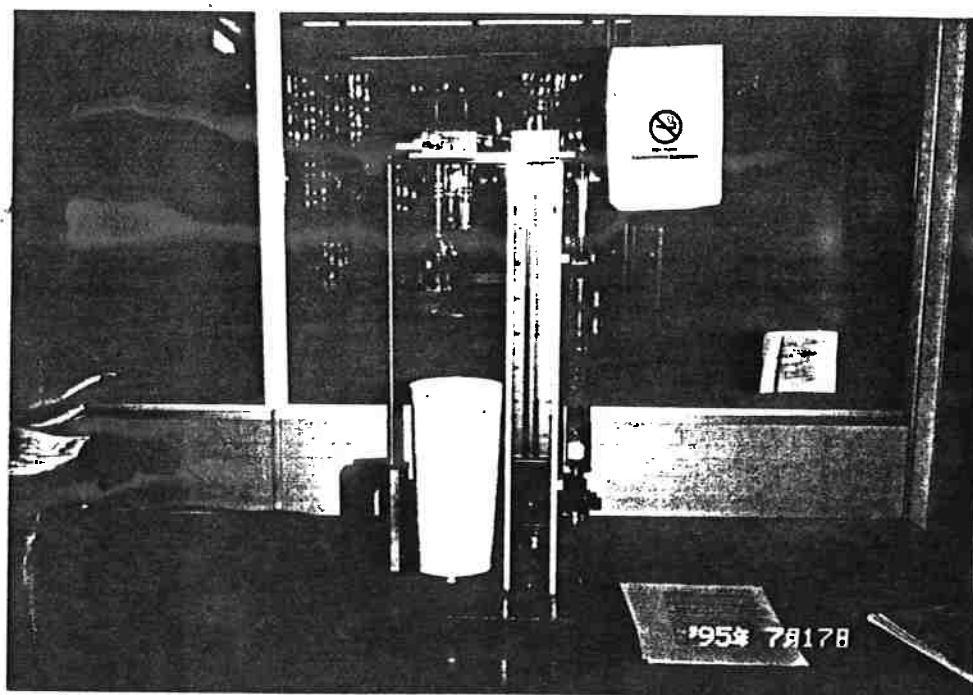
3.3.6 Determinação da superfície específica

A determinação da superfície específica foi feita por um processo conhecido como BET *, obtendo os seguintes resultados (tabela 6) :

tabela 6 : superfície específica das amostras de carvão

CARVÃO	Superfície específica (m ² /g)
Carvão 1	84,48
Carvão 2	88,05
Carvão 3	95,67

* Método BET : O processo, através de uma diferença de pressão indicada no manômetro diferencial, determina o resultado com apenas uma isoterma de adsorção (quantidade de gás homogeneamente adsorvida em função da pressão). Além disso, a área de superfície específica é obtida através de um nomograma, por cálculo simples. O aparelho Area Meter II (fotografia 2), utilizado neste processo, possui também um termostato, que possibilita um aquecimento e purga contribuindo para a agilidade do processo.



fotografia 2 : Aparelho Area Meter II, utilizado na determinação da superfície específica.

3.4 Composição química (% - base seca) das matérias-primas

Componentes	Minério fino de ferro MBR	Carvão Antracitoso Sul Africano	Cimento Portland ARI
Fe_2O_3	97,29		2,78
SiO_2	0,82	6,67	19,05
FeO	-	1,94	-
P	0,042	-	-
S	-	0,22	-
CaO	-	1,35	64,63
Al_2O_3	0,35	4,10	4,92
MgO	-	0,20	0,55
MnO	0,47	0,08	-
C_{fixo}	-	70,51	-
H_2O	-	-	-
CO		1,40	
CH_4		4,20	
N_2		1,40	
H_2		6,93	
SO_2			2,63
K_2O			0,73
Na_2O			0,04
$\text{CaO}_{(\text{livre})}$			1,01
outros	1,03	-	3,99

3.5 Composição com base na análise granulométrica a úmido

Para se obter granulometrias bastante distintas entre si, decidiu-se fazer a composição dos lotes de carvão.

1) Peneirou-se os três lotes (sem moagem/ 23 minutos de moagem/ 3 horas de moagem) em uma peneira 325# e recolheu-se a fração < 325#.

2) Em seguida procedeu-se a composição :

lote 1 (carvão sem moagem)

massa total = 3330g

massa de -325# = 1535,13g , ou seja, < 325# = 46,10%

* para maior diferença granulométrica o carvão sem moagem deve ter em torno de 40% de -325#, portanto:

$$\begin{array}{rcl} 1535,13\text{g} & \text{-----} & 46,10\% \\ x & \text{-----} & 40\% \end{array}$$

$$x = 1332\text{g}$$

portanto deve-se retirar 203,13 g da fração < 325#

lote 2 (carvão moído durante 23 minutos)

massa total = 2180g

massa de -325# = 1169,35 , ou seja, < 325# = 53,64%

* o carvão com 23 minutos de moagem deve ter em torno de 60% de -325#, portanto:

$$\begin{array}{rcl} 1169,35\text{g} & \text{-----} & 53,64\% \\ (1169,35+63,41)\text{g} & \text{-----} & x \end{array}$$

$$x = 56,54\%$$

portanto adicionou-se 63,41% da fração < 325# do lote 1

lote 3 (carvão moído durante 3 horas)

massa total = 2495g

massa de -325# = 1856,28g , ou seja, < 325# = 74,4%

* o carvão com 3 horas de moagem deve ter em torno de 80% de -325#, portanto:

$$\begin{array}{rcl} 1856,28\text{g} & \text{-----} & 74,4\% \\ x & \text{-----} & 80\% \end{array}$$

$$x = 1996\text{g}$$

portanto deve se adicionar 139,72g da fração < 325# retirado do lote 1.

Portanto a configuração final ficou (*tabela 7*):

tabela 7 : % de passante na peneira 325# nas amostras de carvão

CARVÃO	% de -325#
Carvão 1	40%
Carvão 2	56,54%
Carvão 3	80%

3.6 Procedimento de mistura para pelletização.

Composição da mistura :

- * minério de ferro MBR : < 65# = 71,2% em peso
- * carvão mineral : < 65# = 22,3% em peso (Lote 1, Lote 2 e Lote 3 separadamente, de modo que se obtenham 3 lotes de mistura com carvões de granulometrias distintas)
- * cimento Portland : < 65# = 6,5% em peso

1) Inicialmente faz-se a secagem dos componentes da pelota em uma mufla;

2) Pesa-se :

1424g de minério de ferro

446g de carvão mineral

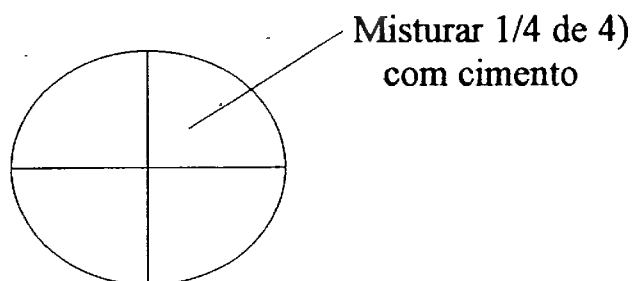
130g de cimento Portland

,2000g de mistura

3) Misturar em uma bacia (minério+carvão);

4) Misturar (minério+carvão) no misturador (*fotografia 3*) durante 4 horas e agitar de 30 em 30 minutos;

5) Quarteamento : Dividir em 4

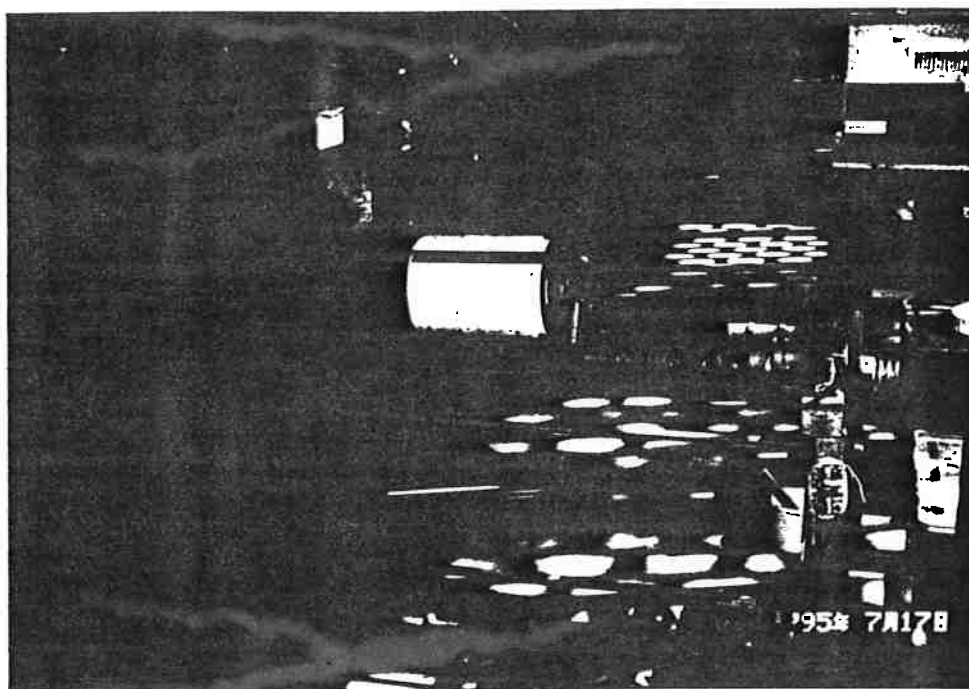


6) Misturar primeiramente na bacia e depois no misturador durante 2 horas com agitação de 1/2 em 1/2 hora;

7) Unir e misturar 6) + $\frac{3}{4}$ que sobrou do 5) na bacia, e em seguida no moinho de bolas durante (2 horas) com agitação de $\frac{1}{2}$ em $\frac{1}{2}$ hora.

8) Preparar 1 litro de solução que será adicionado a mistura para confecção das pelotas:

$\text{H}_2\text{O} + 0,5\% \text{HCl}$ concentrado, que corresponde a 1000ml de água + 5 ml de HCl



fotografia 3 : Misturador utilizado

3.7 Processo de Pelotização (Prática).

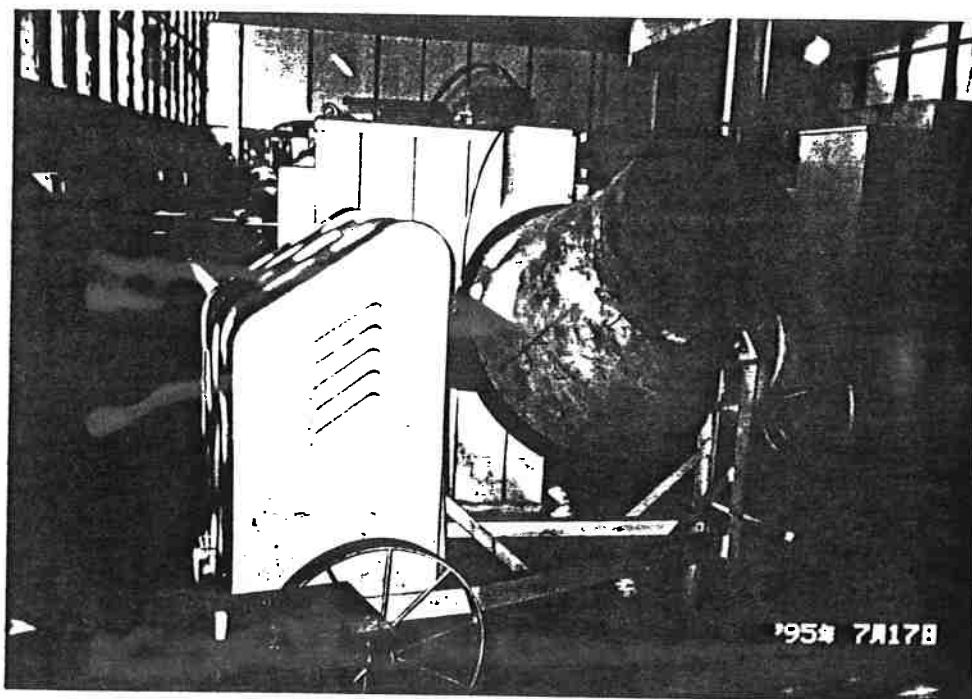
A prática do processo de pelotização inicia-se com a adição de uma pequena quantidade da mistura no disco pelotizador em movimento, seguido de um “spray” de solução de (água + HCl) para a formação dos núcleos (cujo diâmetro deve estar compreendido entre 4mm e 8mm) segundo o princípio do “rolamento”. Em seguida deve-se adicionar intercaladamente uma fração da mistura e um “spray” de solução até que a pelota fique com um diâmetro de aproximadamente 18mm. Para se controlar o crescimento das pelotas, são utilizados peneiras com aberturas de malhas menores e maiores que 18mm, por exemplo 15,9mm e 19,1mm

sendo que as pelotas com diâmetro compreendidas entre estes valores de aberturas das malhas, estão com tamanhos adequados ao experimento.

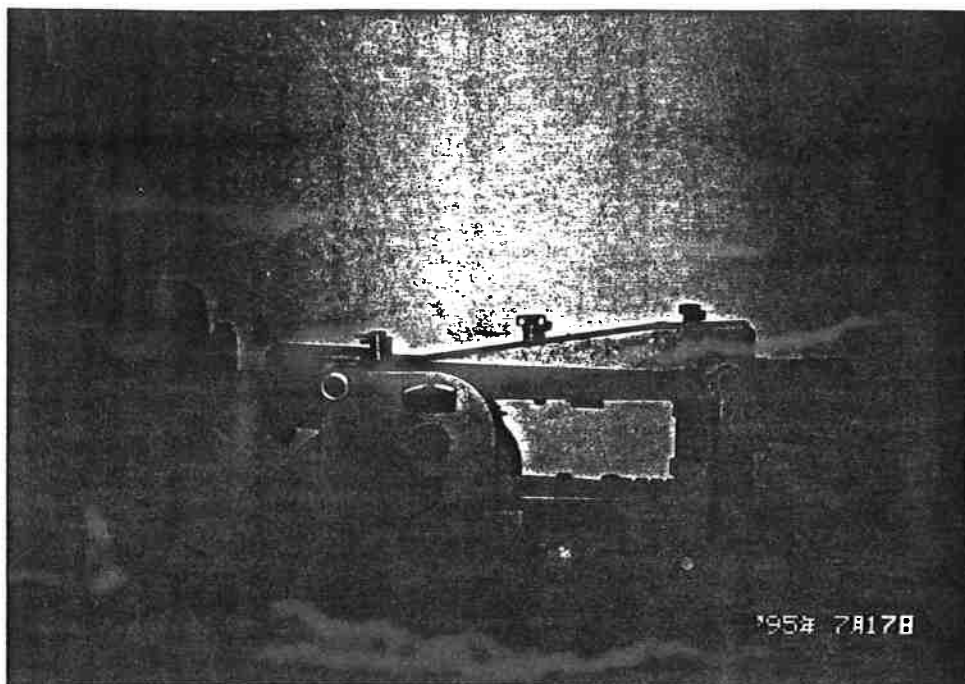
Observações : 1) pelotas com diâmetros diferenciados das demais devem ser retiradas do disco pelletizador, de modo que se obtenha um crescimento uniforme, evitando o gasto excessivo da mistura em pelotas que não serão utilizadas posteriormente;

2) deve-se padronizar o intervalo de adição da solução, pois isto influenciará consideravelmente no que se diz respeito a eficiência do processo de cura; e

3) Após a pelota estar pronta, retirou-se 1/3, deixou-se 1/3 do lote em rolamento no disco pelletizador (fotografia 4) durante 15 minutos e 1/3 restante em rolamento durante 30 minutos, com o objetivo de se verificar a influência do tempo de rolamento na resistência a compressão a frio.



fotografia 4 : Disco pelletizador



fotografia 5 : Aparelho utilizado para a medida da resistência à compressão a frio.

4. Resultados experimentais

Para facilitar a nomenclatura passaremos a chamar de :

⇒ Lote 1 : as pelotas cujos componentes são :

- 1) Minério de ferro (71,2% em peso)
- 2) Cimento Portland (6,5% em peso)
- 3) Carvão Mineral com 40% de -325# na análise granulométrica a úmido (22,3% em peso)

⇒ Lote 2 : as pelotas cujos componentes são :

- 1) Minério de ferro (71,2% em peso)
- 2) Cimento Portland (6,5% em peso)
- 3) Carvão Mineral com 56,54% de -325# na análise granulométrica a úmido (22,3% em peso)

⇒ Lote 3 : as pelotas cujos componentes são :

- 1) Minério de ferro (71,2% em peso)
- 2) Cimento Portland (6,5% em peso)
- 3) Carvão Mineral com 80% de -325# na análise granulométrica a úmido (22,3% em peso)

Portanto a configuração final dos lotes será :

Lote	Composição (% em peso)			
	minério de ferro	cimento Portland	Carvão Mineral	% de carvão mineral passante na malha 325 #
lote 1	71,2	6,5	22,3	40%
lote 2	71,2	6,5	22,3	56,54 %
lote 3	71,2	6,5	22,3	80 %

4.1 Resistência a compressão a frio de pelotas do Lote 1(71,2% de Minério de Ferro, 6,5% de cimento Portland, 22,3% de Carvão Mineral 40% -325# na análise a úmido), em função do tempo de cura e do tempo de rolamento no disco pelotizador após pronto (tabela 8).

Obs : O valor da resistência a compressão a frio é determinado a partir do valor lido e do diâmetro da pelota, segundo a seguinte fórmula:

Resistência = Valor lido . 0,14 . (18²/diâmetro²), onde as unidades são:

Resistência a compressão : kgf/pelota de 18mm

Valor lido no aparelho : PSI

Diâmetro da pelota : mm

tabela 8 : Resistência a compressão a frio de pelotas auto-redutoras do Lote 1

Lote 1 : (0 minutos de rolamento)						
dias de cura	valor lido (PSI)	diâmetro (mm)	resistência (kgf/pelota 18mm)	resistência média (kgf/pelota 18mm)	desvio padrão	
0	6	18	0,858			
	7	20	0,810	0,834	0,033	
4	80	19,9	9,36			
	75	19,9	8,77			
	76	19,7	9,07			
	80	19,5	9,75			
	80	19,5	9,75	9,34	0,43	
6	114	17,9	16,48			
	120	19,1	15,24			
	113	18,4	15,46			
	111	17,8	16,23			
	115	18,2	16,08	15,90	0,53	
8	109	17,7	16,11			
	117	18,4	16,01			
	124	19,3	15,42			
	129	19,2	16,21			
	112	18,3	15,49	15,85	0,36	

12	115	18,1	16,26		
	121	18,3	16,74		
	121	18,4	16,55		
	127	18,9	16,47		
	113	18,7	14,97	16,2	0,7
14	113	17,9	16,34		
	119	18,2	16,64		
	120	18,6	16,07		
	128	19,0	16,42		
	110	17,8	16,09	16,31	0,24
18	129	18,2	18,04		
	131	18,3	18,12		
	130	18,7	17,22		
	125	18,1	17,67		
	128	18,5	17,32	17,67	0,40
20	133	18,2	18,60		
	129	18,1	18,24		
	130	18,4	17,79		
	132	18,3	18,27		
	139	18,9	18,03	18,18	0,30
28	132	17,9	19,09		
	136	18,1	19,23		
	142	18,9	18,42		
	135	18,3	18,67		
	153	18,8	20,05	19,09	0,63
Lote 1 : (15 minutos de rolamento após pronto)					
dias de cura	valor lido (PSI)	diâmetro (mm)	resistência (kgf/pelota 18mm)	resistência média (kgf/pelota 18mm)	desvio padrão
0	9	15,8	1,67		
	8	17,2	1,25	1,46	0,29

4	92	19,9	10,76		
	80	18,6	10,71		
	90	18,4	12,31		
	90	19,5	10,96		
	87	19,5	10,60	11,07	0,71
6	108	17,9	15,62		
	122	18,9	15,82		
	107	17,9	15,47		
	97	17,3	15,01		
	105	17,9	15,18	15,42	0,32
8	110	17,8	16,09		
	117	18,3	16,19		
	120	18,4	16,42		
	121	19,0	15,53		
	116	17,9	16,77	16,19	0,45
12	130	19,1	16,51		
	119	18,5	16,10		
	116	17,9	16,77		
	118	18,2	16,50		
	115	17,8	16,81	16,54	0,28
14	123	18,2	17,20		
	121	18,2	16,92		
	119	18,5	16,10		
	122	17,9	17,64		
	126	18,1	17,82	17,14	0,67
18	157	18,1	22,20		
	153	18,3	21,16		
	153	18,2	21,40		
	150	18,1	21,21		
	170	18,9	22,05	21,60	0,48
20	153	18,0	21,88		
	150	18,2	20,98		
	159	18,5	21,52		
	152	18,3	21,03		
	164	19,2	20,61	21,20	0,50

28	156	18,2	21,82		
	148	18,1	20,93		
	151	18,2	21,12		
	139	17,5	21,02		
	153	17,9	22,12	21,40	0,53
Lote 1 : (30 minutos de rolamento após pronto)					
dias de cura	valor lido (PSI)	diâmetro (mm)	resistência (kgf/pelota 18mm)	resistência média (kgf/pelota 18mm)	desvio padrão
0	10	16	1,81		
	8	16,7	1,33		
	10	19,7	1,20	1,44	0,32
4	99	19,9	11,58		
	93	19,0	11,90		
	92	18,4	12,60		
	89	18,3	12,31		
	86	19,0	11,03	11,89	0,61
6	129	18,4	17,65		
	137	18,9	17,77		
	104	17,2	16,28		
	111	17,9	16,05		
	103	17,2	16,13	16,77	0,86
8	122	18,4	16,70		
	120	18,1	16,97		
	118	18,3	16,33		
	119	18,4	16,29		
	115	18,9	14,91	16,23	0,79
12	132	18,7	17,49		
	124	18,3	17,16		
	121	18,1	17,11		
	119	17,9	17,20		
	127	18,4	17,37	17,26	0,16
14	135	18,1	19,09		
	137	18,3	18,95		

	141	18,9	18,28		
	137	18,6	18,35		
	144	18,8	18,88	18,71	0,37
18	160	17,6	23,93		
	163	18,1	23,05		
	171	18,4	23,40		
	194	19,1	24,64		
	165	18,1	23,34	23,67	0,63
20	169	18,4	23,13		
	164	18,0	23,45		
	171	18,5	23,15		
	168	18,3	23,24		
	189	19,3	23,50	23,30	0,17
28	160	18,0	22,88		
	163	17,8	23,84		
	169	18,3	23,38		
	172	18,4	23,54		
	166	18,2	23,22	23,37	0,356

4.2 Resistência a compressão a frio de pelotas do Lote 2 (71,2% de Minério de Ferro, 6,5% de cimento Portland, 22,3% de Carvão Mineral 56,54% -325# na análise a úmido), em função do tempo de cura e do tempo de rolamento no disco pelletizador após pronto (tabela 9).

tabela 9 : Resistência a compressão a frio de pelotas auto-redutoras do Lote 2

Lote 2 : (0 minutos de rolamento)						
dias de cura	valor lido (PSI)	diâmetro (mm)	resistência (kgf/pelota 18mm)	resistência média (kgf/pelota 18mm)	desvio padrão	
0	9	16,5	1,53			
	8	16,1	1,43	1,48	0,07	
4	100	19,9	11,70			
	97	19,1	12,31			

	92	18,4	12,59		
	89	18,2	12,44		
	100	19,0	12,83	12,38	0,42
7	120	18,8	15,73		
	131	19,2	16,46		
	107	18,3	14,80		
	109	17,5	16,49		
	99	17,1	15,69	15,83	0,7
10	130	18,9	16,86		
	118	18,1	16,69		
	113	17,8	16,52		
	132	19,0	16,94		
	127	18,9	16,47	16,7	0,2
12	134	18,6	17,94		
	121	18,2	16,92		
	118	17,9	17,06		
	119	18,4	16,28		
	123	18,2	17,20	17,08	0,59
17	136	18,2	19,02		
	141	18,4	19,29		
	142	18,7	18,81		
	140	18,6	18,75		
	139	18,5	18,82	18,93	0,22
20	182	18,1	25,74		
	187	18,3	25,87		
	181	18,2	25,31		
	179	18,2	25,03		
	202	18,9	26,20	25,63	0,46
28	181	18,2	25,31		
	194	18,5	26,26		
	204	19,1	25,90		

	172	17,5	26,02		
	182	18,2	25,45	25,79	0,39
Lote 2 : 15 minutos de rolamento após pronto					
dias de cura	valor lido (PSI)	diâmetro (mm)	resistência (kgf/pelota 18mm)	resistência média (kgf/pelota 18mm)	desvio padrão
0	9	16,8	1,48		
	9	16,9	1,46	1,47	0,014
4	105	18,5	14,21		
	89	16,9	14,43		
	95	17,9	13,73		
	96	18,7	12,72		
	113	19,4	13,91	13,80	0,66
7	122	19,1	15,49		
	127	19,2	15,96		
	114	18,2	15,94		
	111	17,9	16,05		
	115	18,3	15,91	15,87	0,2
10	119	18,1	16,83		
	117	18,1	16,54		
	125	18,3	17,29		
	128	18,8	16,77		
	128	18,4	17,51	16,99	0,39
12	128	18,3	17,70		
	125	18,4	17,10		
	121	18,1	17,11		
	124	18,2	17,34		
	120	18,2	16,78	17,21	0,34
17	148	18,3	20,47		
	146	18,2	20,42		
	154	18,7	20,40		
	159	18,5	21,52		
	157	18,5	21,25	20,82	0,53
20	188	18,2	26,29		
	182	18,0	26,03		
	199	19,1	25,27		

	204	18,9	26,45		
	180	18,2	25,18	25,84	0,58
28	207	19,3	25,74		
	202	19,1	25,65		
	185	18,2	25,87		
	186	18,3	25,73		
	188	18,1	26,58	25,91	0,38
Lote 2 : (30 minutos de rolamento após pronto)					
dias de cura	valor lido (PSI)	diâmetro (mm)	resistência (kgf/pelota 18mm)	resistência média (kgf/pelota 18mm)	desvio padrão
0	10	17	1,60		
	9	17	1,44	1,52	0,11
4	117	18,5	15,84		
	120	18,3	16,60		
	105	17,9	15,18		
	102	17,1	16,16		
	113	18,3	15,63	15,88	0,53
7	130	18,7	17,22		
	131	19,2	16,46		
	117	18,1	16,54		
	123	18,3	17,01		
	119	17,9	17,20	16,89	0,36
10	123	18,5	16,65		
	126	18,4	17,24		
	125	18,3	17,29		
	130	18,5	17,60		
	135	18,9	17,51	17,25	0,37
12	124	18,2	17,34		
	131	18,5	17,73		
	127	18,1	17,96		
	129	18,3	17,84		
	136	18,5	18,41	17,85	0,38

17	154	18,4	21,07		
	152	18,1	21,49		
	154	18,2	21,54		
	160	18,9	20,75		
	164	18,5	22,20	21,41	0,54
20	197	18,3	27,25		
	208	19,0	26,70		
	190	18,2	26,60		
	194	18,5	26,26		
	185	17,9	26,75	26,70	0,36
28	192	17,9	27,76		
	209	19,1	26,54		
	185	18,1	26,16		
	186	18,0	26,60		
	196	18,3	27,11	26,83	0,62

4.3 Resistência a compressão a frio de pelotas do Lote 3 (71,2% de Minério de Ferro, 6,5% de cimento Portland, 22,3% de Carvão Mineral 80% -325# na análise a úmido), em função do tempo de cura e do tempo de rolamento no disco pelletizador após pronto (tabela 10).

tabela 10 : Resistência a compressão a frio de pelotas auto-redutoras do Lote 3

Lote 3 : (0 minutos de rolamento)						
dias de cura	valor lido (PSI)	diâmetro (mm)	resistência (kgf/pelota 18mm)	resistência média (kgf/pelota 18mm)	desvio padrão	
0	12	19,0	1,540			
	11	18,2	1,530	1,535	0,007	
4	113	18,2	15,80			
	107	17,5	16,18			
	119	18,3	16,46			
	117	18,7	15,50			
	120	18,7	15,90	15,97	0,37	
7	141	19,1	17,90			
	139	19,0	17,84			

	113	17,6	16,90		
	123	18,5	16,65		
	129	18,7	17,09	17,28	0,57
10	137	18,3	18,95		
	141	18,9	18,29		
	150	19,1	19,05		
	138	18,7	18,28		
	132	18,4	18,06	18,53	0,44
12	126	18,4	17,24		
	130	18,3	17,98		
	119	17,9	17,20		
	131	18,9	16,99		
	128	18,4	17,51	17,39	0,38
17	155	18,2	21,68		
	146	18,1	20,64		
	164	18,7	21,72		
	165	18,5	22,33		
	158	18,6	21,16	21,51	0,63
20	198	18,2	27,7		
	184	18,3	25,45		
	192	18,2	26,85		
	198	18,5	26,80		
	202	18,7	26,76	26,71	0,80
28	192	18,4	26,28		
	200	18,3	27,67		
	185	18,1	26,16		
	186	17,9	26,89		
	204	18,7	27,02	26,80	0,61
Lote 3 : (15 minutos de rolamento após pronto)					
dias de cura	valor lido (PSI)	diâmetro (mm)	resistência (kgf/pelota 18mm)	resistência média (kgf/pelota 18mm)	desvio padrão
0	10	16,1	1,787		
	13	18,1	1,838	1,813	0,036
4	123	18,2	17,20		

	107	17,2	16,76		
	119	18,0	17,02		
	119	18,7	15,77		
	125	18,3	17,30	16,8	0,61
7	132	18,7	17,49		
	128	18,5	17,32		
	130	18,5	17,59	17,47	0,13
10	137	18,4	18,75		
	135	17,9	19,52		
	137	19,0	17,58		
	142	19,2	17,84		
	121	17,8	17,69	18,27	0,8
12	123	18,1	17,39		
	128	18,5	17,33		
	121	18,1	17,11		
	135	18,7	17,88		
	128	18,4	17,51	17,44	0,29
17	155	18,3	21,44		
	154	18,1	21,77		
	160	18,5	21,66		
	165	18,7	21,86		
	165	18,2	23,08	21,96	0,64
20	196	18,0	28,03		
	199	18,1	28,14		
	198	18,2	27,70		
	193	18,0	27,60		
	190	17,8	27,80	27,85	0,22
28	198	18,1	28,00		
	200	18,3	27,67		
	195	18,1	27,58		
	220	18,9	28,54		
	223	19,1	28,32	28,02	0,41

Lote 3.: (30 minutos de rolamento após pronto)

dias	de	valor lido	diâmetro	resistência	resistência	desvio
------	----	------------	----------	-------------	-------------	--------

cura	(PSI)	(mm)	(kgf/pelota 18mm)	média (kgf/pelota 18mm)	padrão
0	13	18	1,86		
	10	15,1	2,03	1,95	0,12
4	127	18,1	17,96		
	105	17,1	16,64		
	115	18,3	15,91		
	124	18,7	16,43		
	128	18,5	17,33	16,85	0,80
7	116	17,7	17,16		
	123	17,8	17,98		
	127	18,1	17,96		
	139	19,2	17,47		
	130	18,7	17,22	17,55	0,40
10	128	18,1	18,10		
	136	18,3	18,82		
	141	18,9	18,29		
	137	18,6	18,35		
	144	19,2	18,10	18,33	0,29
12	132	18,2	18,46		
	129	18,3	17,84		
	134	18,7	17,75		
	139	18,6	18,61		
	130	18,0	18,59	18,25	0,42
17	168	18,3	23,24		
	175	19,1	22,22		
	168	18,7	22,26		
	161	18,1	22,77		
	154	17,9	22,27	22,55	0,44
20	201	18,1	28,42		
	209	18,3	28,91		
	199	18,2	27,84		
	197	18,0	28,17		
	217	18,7	28,75	28,42	0,43

28	204	18,0	29,17		
	219	18,3	30,29		
	202	18,1	28,56		
	209	18,4	28,60		
	211	18,3	29,19	29,17	0,70

tabela 11 : Resistência média de compressão a frio (kgf/pelota de 18mm) em função do tempo de cura (dias)

Tempo de cura (dias)												
	0	4	6	7	8	10	12	14	17	18	20	28
Lote 1 0	0,83	9,34	15,90		15,80		16,20	16,30		17,67	18,18	19,09
Lote 1 15	1,46	11,07	15,42		16,19		16,52	17,14		21,60	21,20	21,40
Lote 1 30	1,44	11,89	16,77		16,20		17,26	18,70		23,67	23,29	23,37
Lote 2 0	1,48	12,37		15,80		16,70	17,08		18,9		25,63	25,79
Lote 2 15	1,47	13,8		15,87		16,99	17,20		20,80		25,84	25,91
Lote 2 30	1,52	15,8		16,89		17,25	17,85		21,41		26,70	26,83
Lote 3 0	1,53	15,97		17,30		18,50	17,38		21,50		26,71	26,80
Lote 3 15	1,81	16,80		17,47		18,30	17,40		21,96		27,84	28,02
Lote 3 30	1,95	16,85		17,55		18,30	18,25		22,55		28,40	29,16

Gráfico 1 : Resistência a compressão a frio em função do tempo de cura e do tempo de rolamento para o Lote 1

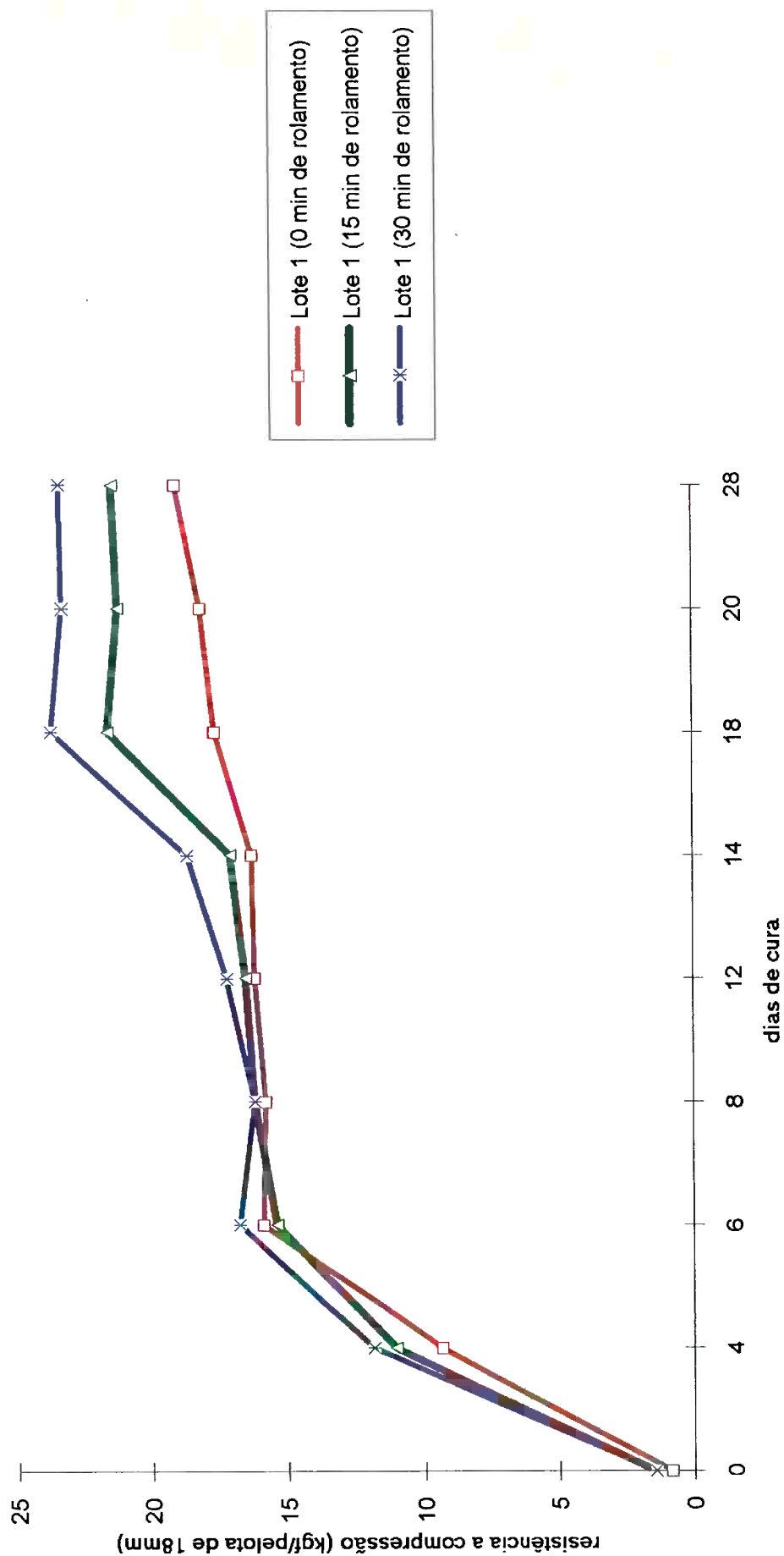


Gráfico 2 : Resistência a compressão a frio em função do tempo de cura e do tempo de rolamento para o Lote 2

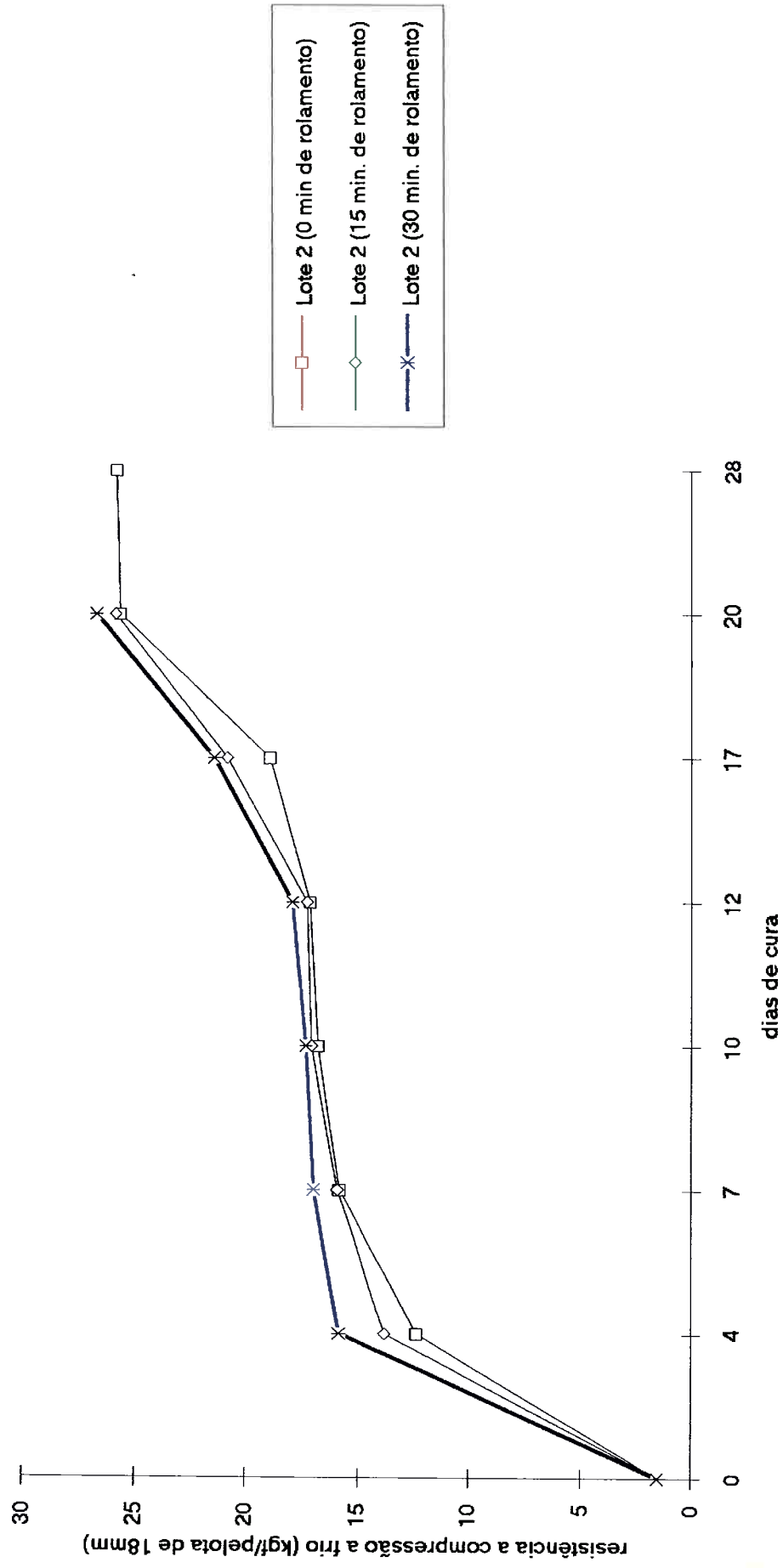


Gráfico 3 : Resistência a compressão a frio em função do tempo de cura e do tempo de rolamento para a Lote 3

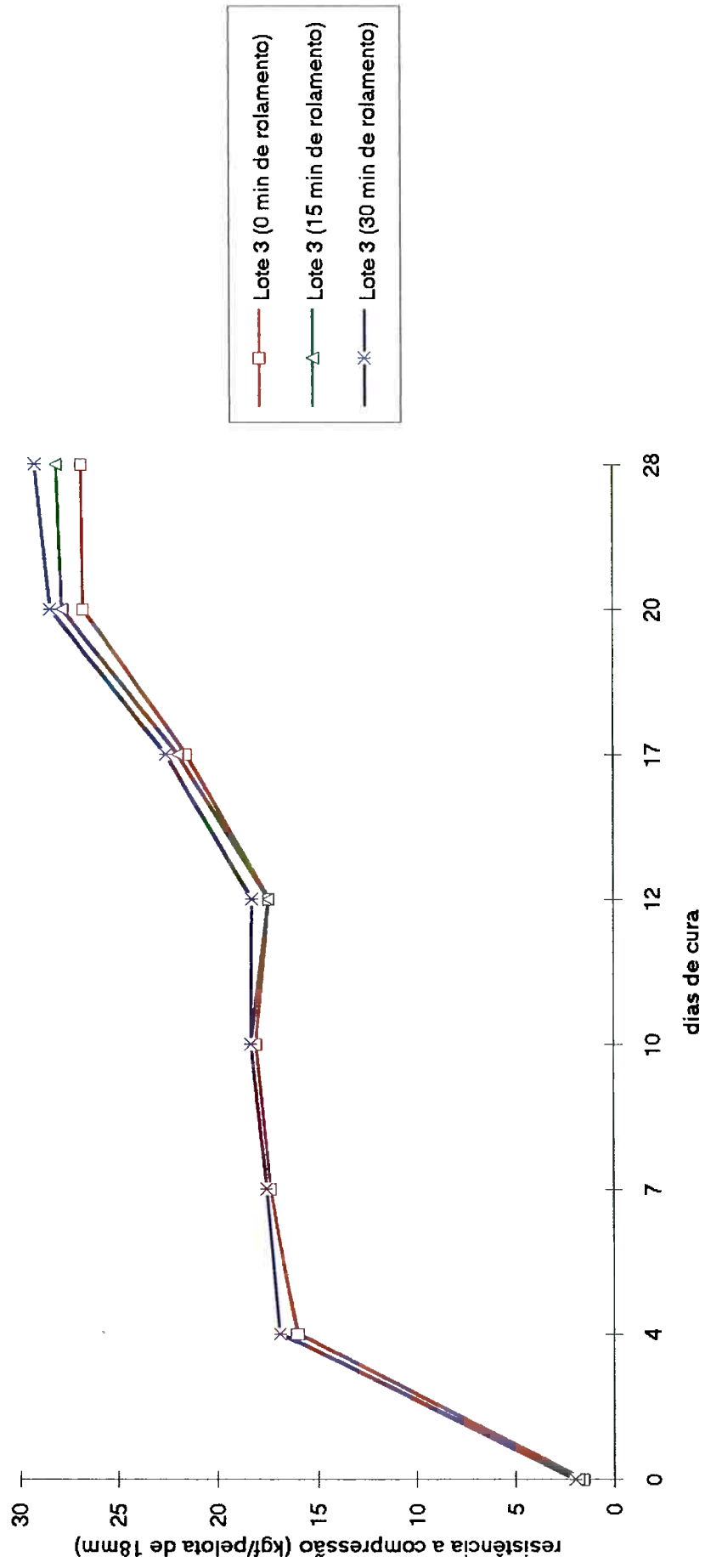


Gráfico 4 : Resistência a compressão a frio em função do tempo de cura e da granulometria para 0 min. de rolamento

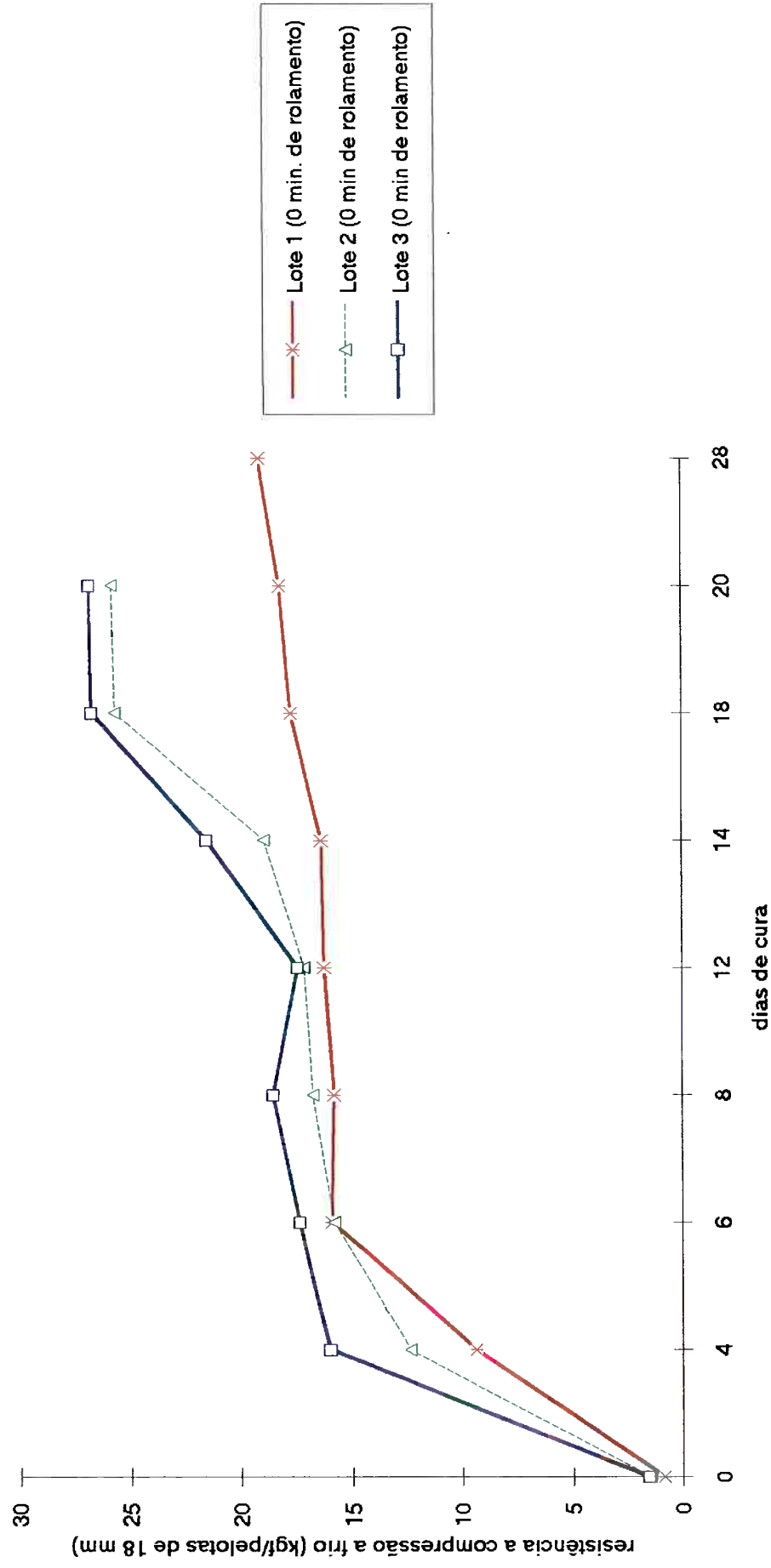


Gráfico 5 : Resistência a compressão a frio em função do tempo de cura e da granulometria para 15 min. de rolamento

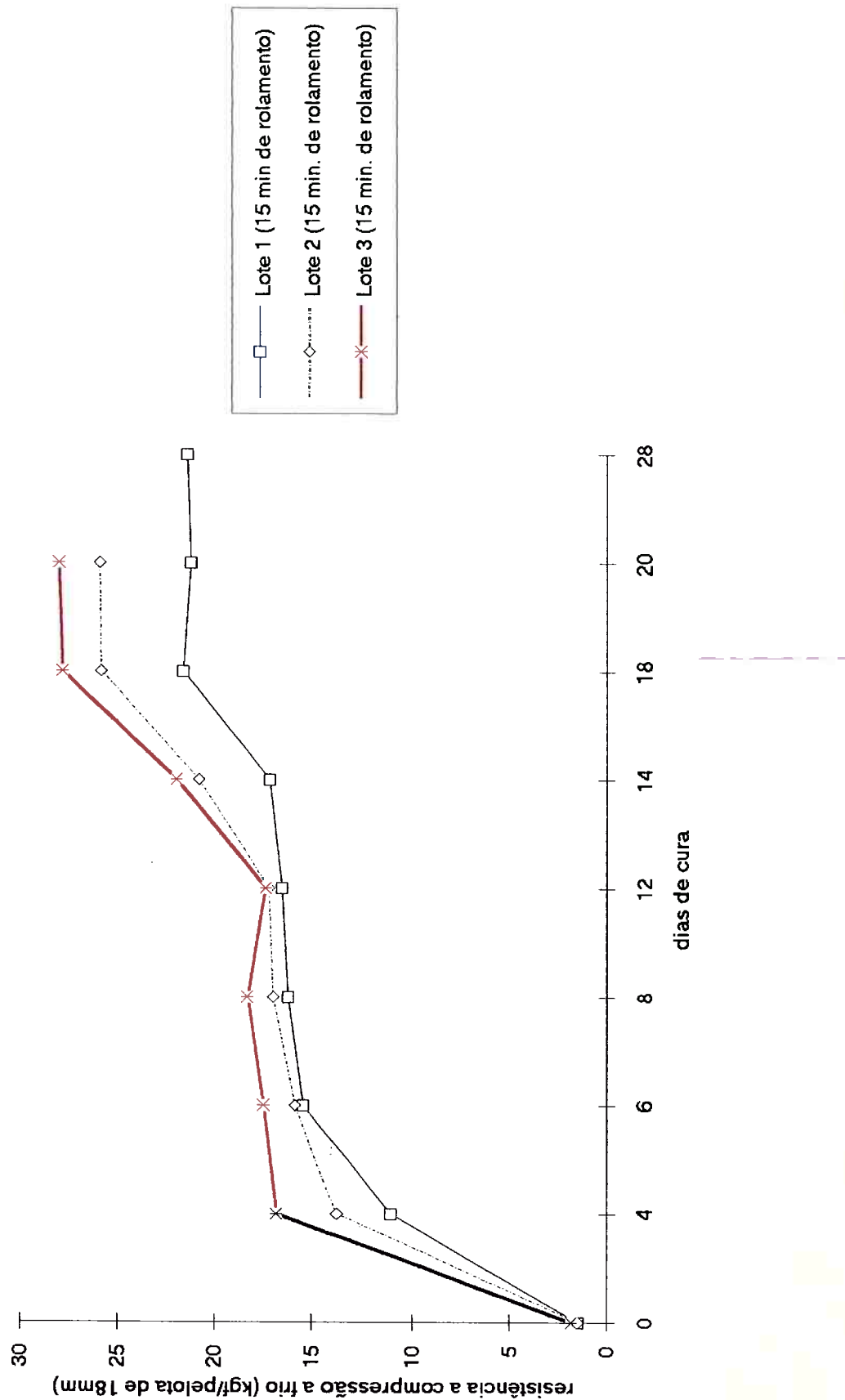


Gráfico 6 : resistência a compressão a frio em função do tempo de cura e da granulometria para 30 min. de rolamento

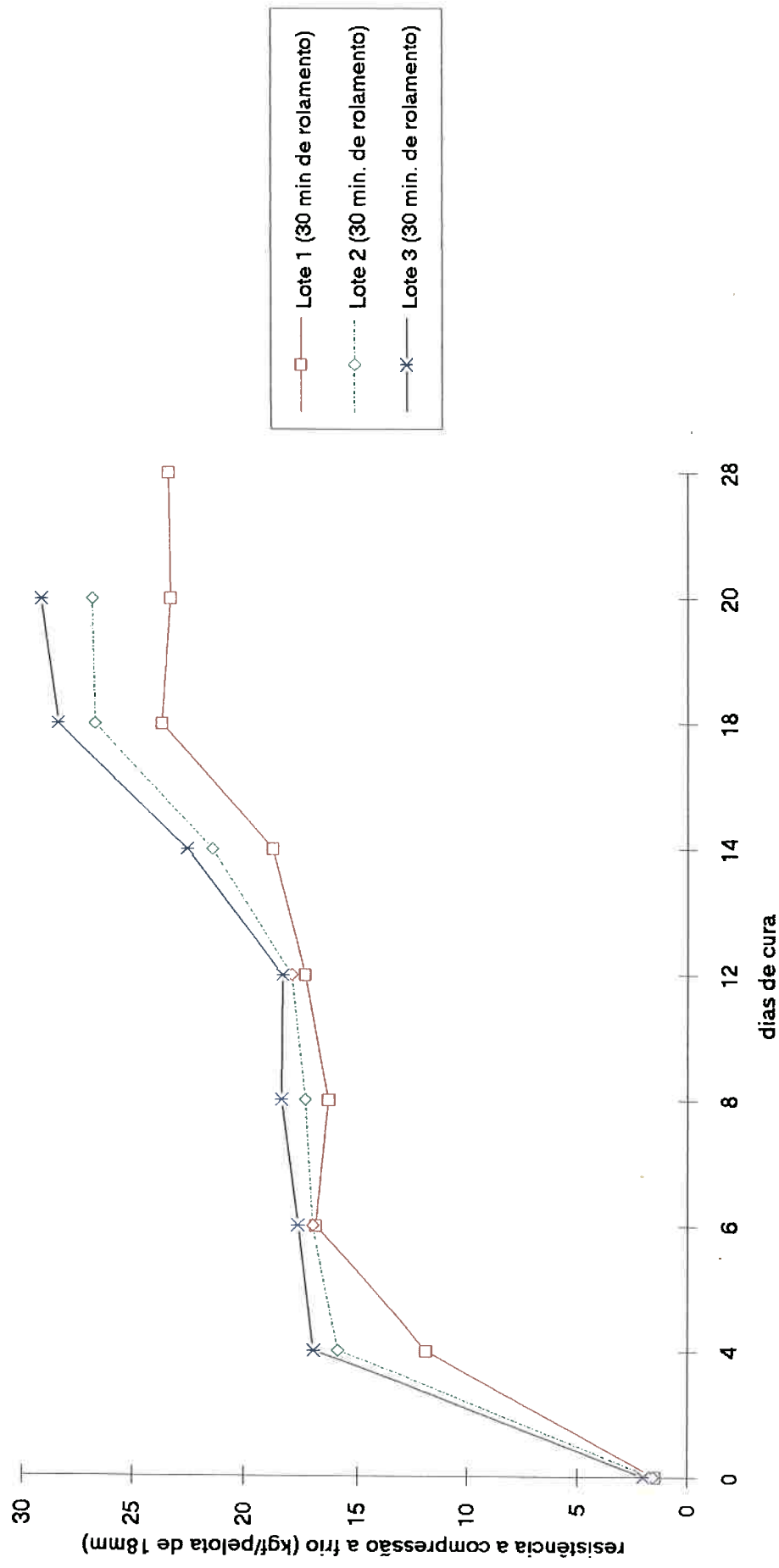
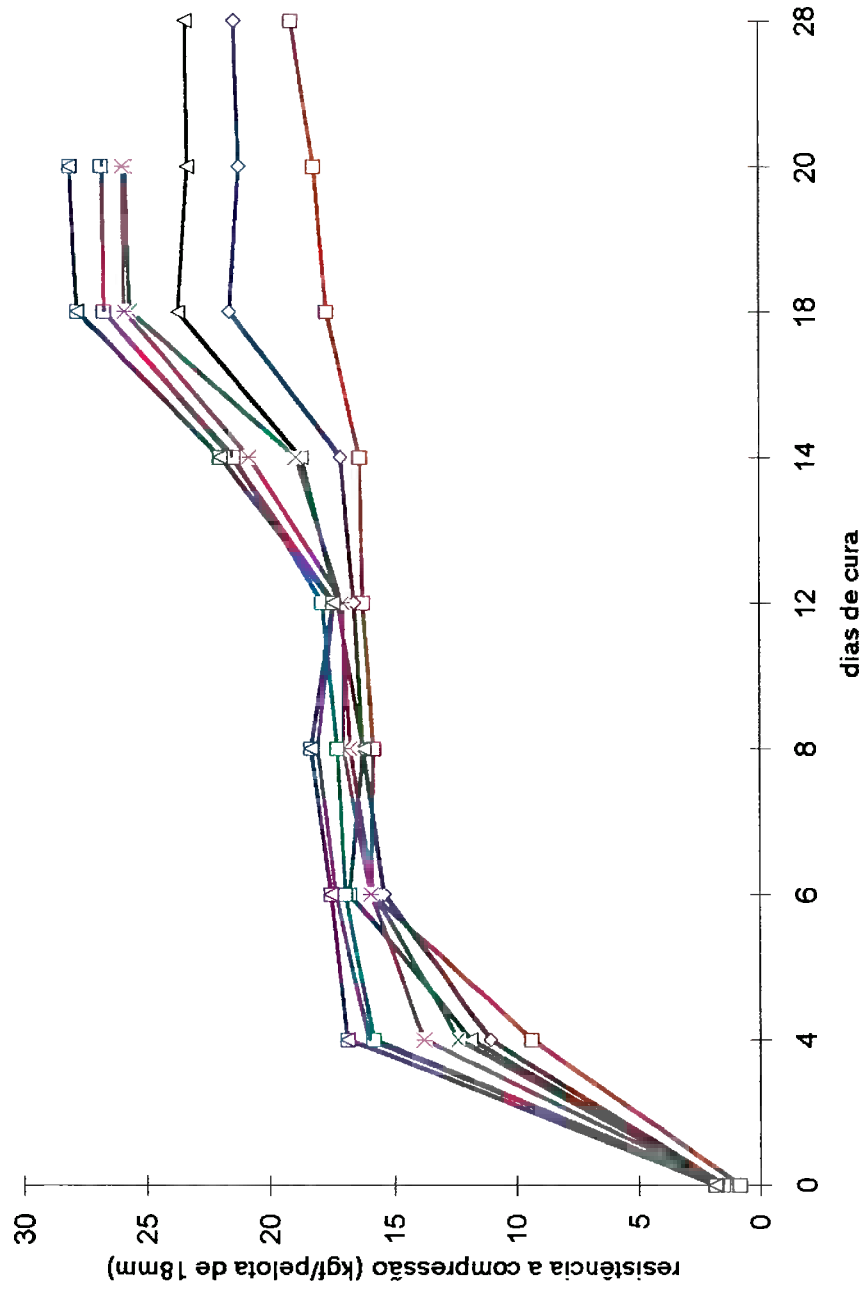


Gráfico 7 : Resistência a compressão em função do tempo de cura



Discussão dos resultados :

Tempo de rolamento :

Analisando-se os *Gráficos 1, 2 e 3* pode-se observar que o tempo de rolamento maior, no caso, 30 minutos apresenta uma resistência a compressão um pouco maior. O Lote 1 apresentou aumento anômalo após o 14º dia se estendendo até o 28º dia com um aumento significativo com o tempo de rolamento. Este comportamento deve ser confirmado com outras experiências.

De uma maneira geral, a variável tempo de rolamento após a pelota pronta, para as condições experimentais adotadas, mostrou ser pouco sensível.

Efeito da superfície específica :

Observando-se os *Gráficos 4, 5 e 6* pode-se constatar o efeito da granulometria desde os primeiros dias de cura (pelota verde), variando em até 3kgf sua resistência a compressão, amenizando no intervalo do 6º ao 12º dia, voltando a se diferenciar até o 28º dia.

Dos gráficos em geral, pode se dizer que o cimento Portland, contribui de maneira decisiva na resistência a compressão. Observa-se que a sua reação de hidratação ocorre em maior intensidade até o 4º dia aproximadamente. Do 5º ao 12º dia, visualiza-se um leve patamar, onde a hidratação torna-se praticamente inativa. Tal fato se deve a uma diminuição na sua velocidade (de hidratação) à medida que as superfícies tornam-se revestidas com uma camada gelatinosa dos produtos de reação, formando-se então uma espécie de “barreira”. Essa camada gelatinosa cresce a medida que a partícula se dissolve e a massa de água transferida para o interior da membrana é maior do que a dos produtos de reação que se difundem para fora, produzindo pressão osmótica, rompendo essa membrana. Sendo assim renova-se uma frente de reação, acarretando em novo aumento de sua velocidade (à partir do 13º dia).

Diante dos resultados obtidos, pode-se ter como objetivo para estudos futuros, uma maior diferenciação na granulometria e, se possível um maior aumento de resistência a compressão a frio, podendo também se estender à análise das propriedades físicas e químicas após a redução.

5. Conclusões

Considerando-se que as reações de hidratação do cimento, principalmente de silicatos e aluminatos de cálcio, são responsáveis pelo aumento de resistência a compressão a frio, pode-se observar que sua ação mais efetiva ocorre até o 4.^o dia, passando então a se processar em menor intensidade.

Quanto a influência da superfície específica, nas condições de realização deste experimento, observa-se que seu aumento contribui para uma maior resistência a compressão a frio, embora de maneira sensível mas não tão intensa (vide *tabela 11*)

Outro fator também analisado neste experimento foi o efeito do tempo de rolamento após pronto no disco pelletizador, submetendo cada lote a ausência de rolamento, 15 minutos de rolamento e 30 minutos de rolamento. Obteve-se um acréscimo entre 0,05 a 2 kgf de acordo com um maior tempo de rolamento, portanto é uma variável pouco sensível.

6. Referências Bibliográficas

- (1) - JAROSLAV, SRB; RUZICKOVÁ, ZDENKA. **Pelletization of fines**. Prague, Tokyo, Editora Elsevier, 1988, p.14-100.
- (2) - MOURÃO, M.B. **Análise do Processo de Redução de Minério de Ferro por Carbono na Forma de Pelotas Auto-Redutoras**. São Paulo, 1988. p.8-33. Dissertação (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- (3) - MARCHEZE, EDMAR SAUL. **Resistência Mecânica a Frio e Crepitação em Pelotas Auto-Redutoras**. São Paulo, 1994. p.40-60. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- (4) - CHAVES, ARTHUR PINTO. **Cominuição do Carvão**. São Paulo, PMI / EPUSP, 1988. (Monografias. Departamento de Engenharia de Minas, 1-9)
- (5) - MARCHEZE, EDMAR SAUL. **Resistência Mecânica a Frio e Crepitação em Pelotas Auto-Redutoras**. São Paulo, 1994. p.40-60. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

- (6) - LUDWIG, U. **The influence of Various Sulfates on the Setting and Hardenig of Cements**. Cement and Concrete Association. p.1-3, Mar. 1971
- (7) - KITTE, P.A. Estado Atual do Mecanismo de Hidratação do Cimento. **Revista Brasileira de Tecnologia**, v.8, 1977.
- (8) - AZEVEDO, A.T; CARDOSO, M.B. Crepitação de Minério de Ferro. Aplicação da Mecânica da Fratura. **Metalurgia ABM**, v.38, n.293, p.203-208, 1982.
- (9) - COSTA, P.H.C; MACIERO, I; CREMA, N. Mecanismo de Cura de Pelotas Auto-Redutoras. Documento Interno da Tecnored, p.1-47, 1986
- (10) - NICHOLLS, R. **Inorganic Cements in Composite Construction Material Handbook**. Prentice Hall, Inc, New Jersey, USA, p.125-180, 1974.