

# Utilização de cinzas volantes por pelotização e sinterização

Maria Luiza Vaz Dias de Souza \*  
Jorge Rubio, PhD \*\*

1. INTRODUÇÃO
2. MATERIAIS E MÉTODOS
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO
4. CONCLUSÕES
5. BIBLIOGRAFIA

\* Aluna de mestrado do Depto. de Minas  
da UFRGS

\*\* Professor Adjunto do Depto. de Minas  
da UFRGS



## Resumo

O presente trabalho resume as informações experimentais obtidas no processo de pelotização e sinterização da cinza volante de Candiota, para produção de agregados leves para usos em concreto estrutural convertendo um rejeito da combustão do carvão num produto útil. A caracterização das pelotas cruas formadas em um pelotizador foi realizada através de medidas de distribuição de tamanho em função do teor de umidade e concentração de agentes ligantes, e através de testes padronizados de resistência à fratura, compressão, abrasão e ao impacto. Os resultados obtidos mostraram que dos ligantes testados, carbonato de cálcio, silicato de sódio, cloreto de cálcio e cal hidratada, esta última mostrou-se a mais efetiva em aumentar a resistência mecânica das pelotas. A pelotização com cal é função do teor de umidade, da temperatura e tempo de cura e da concentração de cal. Assim, com a cal hidratada em uma proporção de 10%, a quantidade ótima de água foi de 25,4%, obtendo-se 85% das pelotas aproximadamente entre 1 e 1,65 cm de diâmetro. Uma rápida

secagem das pelotas a 100°C retirando a água do sistema, impede que as reações de hidratação se completem a conseqüentemente as pelotas obtidas são mais fracas que as secas à temperatura ambiente.

As características de sinterização mostraram que as pelotas obtidas com 10% de cal hidratada sinterizam na faixa de 1210-1260°C sem perder a forma, expandindo-se e dando agregados que flutuam em líquidos de densidade 0,8 g/cc, numa proporção de 75%. Já as pelotas com 20% de cal nesta mesma faixa produzem um agregado variando entre 0,8 - 1,1 g/cc (13% com densidade <0,8 g/cc). As pelotas com 30% de cal não sinterizam a 1200°C e a 1230°C já perderam a forma, produzindo um agregado de densidade mais elevada (>1,5 g/cc).

Conclui-se do presente estudo que a cinza de Candiota é inerte, devendo ser ativada com cal a fim de que manifeste sua natureza pozolância latente. Testes de resistência mecânica com concretos obtidos com os agregados sinterizados com cal encontram-se em fase de preparação.

Este trabalho foi financiado pelo Convênio Fipecc-BB- UFRGS.

## 1. Introdução

As cinzas volantes "fly ash" são constituídas de partículas extremamente finas e leves arrastadas pelos gases de combustão do carvão em fornalhas e gaseificadores. Uma grande parcela deste material é retida em sistemas de captação, estando entre os mais comuns e eficientes os precipitadores eletrostáticos e os filtros de manga.

As grandes unidades produtoras de "fly ash" são as usinas termoelétricas e centrais de vapor que fazem uso de carvão pulverizado. Assim sendo, na maior parte dos casos, as cinzas estão disponíveis próximo aos centros urbanos ou até mesmo dentro das cidades.

A deposição definitiva deste rejeito torna-se problemática, principalmente em função dos fatores de ordem econômica e ambientais envolvidos.

Atualmente, a maior parte das pesquisas e estudos sobre o aproveitamento econômico de cinzas é dirigida para o setor de obras e construção civil. Isto deve-se à conjugação de dois fatores peculiares à indústria de construção: ao mesmo tempo que estabiliza seus produtos em locais e formas definitivas, o mercado de construção é capaz de absorver grandes volumes de produção.

A produção atual de cinzas volantes na região Sul é da ordem de  $2 \times 10^5$  t/ano. As cinzas volantes no Brasil são usadas na atualidade somente para adição em concretos e fabricação de cimento pozolânico. Entretanto, em outros países, esse material é utilizado na forma de agregados leves para fabricação de concreto. (1)

A produção de agregados leves requer uma unidade de pelotização (para obtenção de aglomerados de tamanho apropriado e dotados de uma pequena resistência) seguida por uma etapa de sinterização (onde se dá o

desenvolvimento da resistência e diminuição da densidade).

As pelotas são produzidas em tambores ou discos rotativos a partir de uma mistura de cinzas, água, combustível finamente dividido e outros aditivos (ligantes).

Nesta etapa os controles vitais recaem sobre os insumos (constância nas propriedades químicas e físicas) e homogeneização da carga alimentada ao pelotizador. (2)

As pelotas cruas obtidas devem apresentar composição homogênea e serem fortes o suficiente para poderem sofrer manuseio, transporte e suportarem o choque térmico durante a sinterização.

A sinterização pode ser feita em fornos de grelha móvel, verticais ou rotativos. O controle do processo de sinterização também depende fortemente do produto pelotizado, sendo necessário um leito de pelotas permeável e constante durante toda a queima. Um meio de se obter um leito mais permeável é produzir pelotas dentro de uma faixa granulométrica relativamente estreita, uma vez que pelotas de diversos tamanhos tendem a formar um leito mais compacto. (2)

O produto final, bem como o concreto com ele obtido, deve obedecer a uma série de requisitos. Conforme as características que o agregado atribuir ao concreto, este poderá ser usado em elementos de alvenaria, concreto isolante ou concreto estrutural.

No Brasil, as especificações P-EB-228, P-EB-229 e P-EB-230 da ABNT estabelecem os requisitos exigidos para cada tipo de agregado. (3) (4) (5)

O objetivo deste estudo é a obtenção de informação experimental sobre a viabilidade de aglomeração de partículas de cinza volante por pelotização e sinterização para serem utilizadas eventualmente como agregado leve em concreto.

## 2. Materiais e métodos

### 2.1. Aditivos

Cloreto de cálcio anidro ( $\text{CaCl}_2$ ), óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) e silicato de sódio: usaram-se reagentes P.A.

A cal utilizada foi uma cal hidratada dolomítica ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .  $\text{MgO}$ ) comercializada sob o nome de Cal-Crem pela Turmalina S/A. As propriedades físicas e químicas do material são apresentadas na Tabela II. Também, utilizou-se carbonato de cálcio oriundo de conchas calcárias lavadas e moídas até passarem na peneira de 200  $\mu$ . A análise química do material revelou um teor de 99% de cálcio.

### 2.2. Cinzas volantes

Usou-se a cinza volante proveniente do silo de armazenagem da Central Termoelétrica Presidente Médici, localizada junto à mina de Candiota no município de Bagé - RS.

A amostra representativa, pesando 120 kg, foi obtida segundo norma própria da CEEE. As propriedades físicas e químicas desta cinza são mostradas na Tabela I.

### 2.3. Pelotização

A mistura de 400 g de cinza com a quantidade desejada de aditivo foi feita manualmente, a seco. Depois da mistura atingir completa homogeneização, foi passada na peneira de 48  $\mu$ , adicionando-se água destilada. Esta pasta foi trabalhada durante 5 minutos. As proporções de ligante foram relacionadas com o peso da cinza seca.

Procedeu-se à obtenção das pelotas cruas por bateladas, em tambor rotativo fechado (23 cm de diâmetro por 15 cm de comprimento, com superfície interna revestida de aço inox e dotado de um mecanismo apropriado para raspagem do material aderido às paredes). Este pelotizador, empregado em estudos similares já foi descrito na literatura por Sastry et alii (6). Depois de colocada a mistura no tambor, este é posto a girar a uma velocidade fixa de 42 rpm, sendo a operação encerrada quando a carga atinge a granulometria desejada (80% das pelotas maior do que 1,0 cm).

### 2.4. Secagem

As pelotas obtidas nos experimentos em bateladas foram divididas em duas frações. A primeira foi seca em estufa a 110°C por 24 horas e após, colocada à temperatura ambiente. A outra fração foi seca apenas à temperatura ambiente (18-22°C) por 7 ou 28 dias.

### 2.5. Sinterização

Testes preliminares de sinterização foram realizados com o objetivo de selecionar o ligante mais adequado para obter-se o agregado leve a ser ensaiado em concreto.

Para a cinza volante pura foi feito ensaio de fusibilidade em microscópio de aquecimento, sob atmosfera oxidante. O ponto de semi-esfera (fusão) foi obtido a 1460°C.

Para as pelotas obtidas com os diversos ligantes, os testes de sinterização foram realizados em um forno de resistência de carbeto de silício, sob atmosfera oxidante, numa faixa de temperatura de 1200 a 1350°C.

As pelotas secas foram medidas e colocadas em forma refratária, sendo o tempo de ensaio fixado em 15 minutos.

### 2.6. Caracterização das pelotas cruas

As pelotas cruas e secas foram avaliadas em termos da resistência ao impacto, à abrasão e à compressão. (7) (8)

Todos os ensaios foram realizados após 7 dias de cura e também aos 28 dias para a resistência à compressão das pelotas com cal hidratada.

## 2.7. Resistência ao impacto

O teste dá uma medida da resistência da pelota ao impacto numa escala de zero a dez. O índice de resistência é determinado pela relação:

$$R_I = \frac{\sum_{i=0}^{10} n_i \cdot i}{L}$$

onde:

$R_I$  : resistência ao impacto

$i$  : número de quedas que a pelota sofre sem fraturar

$n_i$  : número de pelotas que sofreram " $i$ " quedas

$L$  : número de pelotas a ser ensaiado.

## 2.8. Resistência à abrasão

Colocam-se 100 g de pelotas no tambor de pelotização a uma velocidade de 40 rpm durante 5 minutos. Ao final a percentagem em peso maior do que 35 % é registrada como o índice de abrasão  $R_A$ .

## 2.9. Resistência à compressão

A resistência à compressão foi determinada usando-se uma máquina universal de ensaios para materiais leves. Os dados foram correlacionados segundo a equação:

$$L_f = k_s M^\alpha$$

onde:

$L_f$  : carga de fratura em Kgf

$M$  : massa da pelota em g

$k_s$  e  $\alpha$  : parâmetros da equação.

Note-se que  $k_s$  é a carga de fratura para uma pelota de um grama, sendo em geral indicado como o índice de resistência.

## 2.10. Caracterização das pelotas sinterizadas

Após a sinterização, observa-se a expansão vitrificação, porosidade, resistência ao esmagamento pelos dedos e por alicate e determinava-se a densidade aparente (9). Se a pelota flutuava em água era testada em líquido de densidade 0,8. Caso contrário, era testada numa série de líquidos de cujas densidades variavam de 1,1 a 1,5.

## 3. Resultados e discussão

Influência da umidade nas características de pelotização

A Tabela III mostra valores ótimos de umidade para a formação de pelotas homogêneas em tamanho, utilizando vários

agentes ligantes. Observa-se que independentemente do tipo de agente ligante, a variação da concentração de água requerida no processo de pelotização não é muito significativa. Este fato deve estar relacionado com uma série de fatores entre os quais destacam-se: 1) a natureza hidrofóbica das partículas (medida qualitativamente através de testes de partição líquido-líquido); 2) a alta proporção de partículas esféricas e 3) uma baixa porosidade e homogeneidade superficial de um grande número de partículas. Assim, a pelotização ocorrerá quando a superfície das partículas é molhada pela água conjuntamente com todos os espaços vazios estruturados dentro da massa do "fly ash". Qualquer excesso de água será eliminado do interior das partículas até a superfície das pelotas em fase de formação, alterando a sua cinética e a distribuição de tamanho das pelotas. A Figura 1 mostra este último efeito. Para umidades maiores que a ótima, a distribuição de tamanho (homogeneidade) das pelotas resultantes é menor e o tempo requerido para a sua formação também é menor (Figura 2), vide o efeito do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

O processo de pelotização de "fly ash" também é afetado pelas condições de mistura da carga ao pelotizador. Em condições de mistura utilizando-se peneiramento prévio ao processo de pelotização, obtém-se uma distribuição granulométrica com  $\bar{d} = 1.1 \pm 0.1$  cm. Quando o peneiramento não é realizado, a proporção de agregados miúdos de baixa resistência aumenta consideravelmente, havendo também a formação de agregados muito grandes ( $\bar{d} = 6,5 \pm 1,5$  cm). Este efeito está relacionado provavelmente com a distribuição do ligante e com as características de molhamento homogêneo das partículas primárias.

### 3.1. Efeito dos aditivos na pelotização do "fly ash"

A fim de se obter pelotas cruas dotadas de uma boa resistência mecânica, alguns compostos de cálcio, como  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{CaCO}_3$  e  $\text{CaO}$  foram testados, tendo em vista que o cálcio poderia reagir ou ativar os compostos das cinzas formando ligações relativamente fortes nas pelotas.

O silicato de sódio foi investigado, pois de acordo com a literatura, também pode ser usado como aditivo na granulação de cinzas volantes (10), (11). A cal hidratada foi usada com o intuito de explorar e investigar a ação pozolâmica da cinza no processo de pelotização\*.

A cinza de Candiota mostrou-se sensível a todos os ligantes investigados. Especificamente todos os aditivos aumentam a velocidade de crescimento das pelotas, bem como a resistência dos aglomerados crus. No

\*Pozolana é o material silicoso ou sílico-aluminoso que por si só possui pouco ou nenhum poder aglomerante, mas quando em forma finamente dividida e na presença de umidade, reage com o hidróxido de cálcio a temperaturas ordinárias formando compostos de propriedades aglomerantes.

entanto, a extensão destes efeitos varia significativamente de um ligante para outro.

A Figura 2 mostra a influência dos ligantes na velocidade de crescimento das pelotas enquanto a Tabela IV mostra variação na qualidade do aglomerado cru. Observa-se que apenas a cal hidratada foi capaz de elevar de maneira significativa os três índices de resistência.

O silicato de sódio e o óxido de cálcio foram descartados devido a que com o primeiro as pelotas não sinterizam até 1350°C, além de apresentarem, quando cruas, uma resistência mecânica praticamente nula: o óxido de cálcio impede o controle do processo de pelotização devido a sua reação exotérmica com a água.

As pelotas com CaCO<sub>3</sub>, além de extremamente fracas, racham e não sinterizam até 1240°C.

O cloreto de cálcio é usado na indústria cimenteira para controlar o tempo de pega do cimento Portland comum e para acelerar a velocidade das reações de hidratação. Se as cinzas de Candiota possuísem algum valor aglomerante próprio, mesmo que muito pequeno, este deveria se manifestar quando da adição de CaCl<sub>2</sub>. Mas o cloreto de cálcio, além de não melhorar a qualidade do aglomerado cru, produziu pelotas com rachaduras bem delineadas e que não sinterizam até 1350°C. Na literatura sobre cimento e concreto, há indicações de que sob certas condições o CaCl<sub>2</sub> pode mudar a morfologia dos produtos hidratados resultando na expansão de volume das amostras. (12)

As pelotas obtidas utilizando cal hidratada foram as que apresentavam melhor qualidade e o estudo de pelotização e sinterização centrou-se na utilização deste agente ligante. O teor de cal afeta sensivelmente ambos os processos, especialmente a sinterização. Assim, as pelotas com 30% de cal não sinterizam a 1200°C e a 1230°C já perderam a forma produzindo um agregado de densidade elevada. Em geral a densidade é maior do que 1,5, sendo que em todos os testes realizados não obteve-se nenhum agregado de densidade menor do que 1,1.

As pelotas com 20% de cal sinterizam na faixa de 1210-1260°C, produzindo um agregado cuja densidade varia entre 0,8 e 1,1.

As pelotas com 10% de cal nesta faixa de temperatura, sinterizam sem perder a forma, expandindo e dando um agregado que flutua em líquido de densidade 0,8. Por esta razão este teor de cal foi selecionado para produzir os agregados que serão futuramente testados no concreto.

Influência das condições de cura nas propriedades mecânicas das pelotas formadas com cal como agente ligante.

A fim de estudar-se a influência das condições de cura sobre as características de resistência e conseqüentemente sobre a ação pozolânica das cinzas, para as pelotas com cal hidratada, foram realizadas duas secagens distintas.

Os testes mecânicos realizados mostraram que as pelotas secas à temperatura ambiente são em geral mais resistentes que as pelotas secas em estufa (vide Figuras 3 e 4). Isto pode ser explicado com base nas propriedades pozolânicas das cinzas. O efeito pozolânico depende da formação de compostos aglomerantes pelas reações de hidratação entre cal hidratada e compostos silicosos ou sílico-aluminosos das cinzas. Uma vez que estas reações são bastante lentas e nas quais a presença da água é essencial, é esperado que sua rápida retirada do sistema pelo aumento de temperatura, interrompa as reações de hidratação produzindo pelotas mais fracas.

Note-se que as diferenças mais significativas nos índices de resistência ocorrem para as pelotas de 10% de cal, principalmente nos índices de abrasão e compressão (vide Figura 3 e 4). A Figura 4 mostra uma tendência caracterizada pelo aumento da resistência à compressão com a massa, havendo uma dispersão significativa dada às grandes diferenças em forma e estrutura interna das pelotas. Resultados similares foram reportados por Fuerstenau e Abouzeid (11).

No entanto, pela Figura 5 pode-se observar que os teores de cal de 20% e 30% em pelotas secas à temperatura ambiente não foram totalmente consumidos aos 7 dias. Assim sendo, estas misturas foram excluídas para sinterização, pois estaria-se usando um teor de ligante que além de dificultar a etapa de sinterização não teria reagido e portanto não estaria melhorando as características das pelotas cruas.

Ensaio padronizados de concreto incluindo pelotas que foram sinterizadas em um forno de bancada com 10% de cal encontram-se em fase de andamento.

## 4. Conclusões

Com base nas observações experimentais feitas no decorrer deste estudo, é possível chegar-se as seguintes conclusões:

- . A velocidade de crescimento das pelotas é acelerada pela adição de qualquer um dos ligantes testados.

- . As condições de mistura e teor de umidade são parâmetros que influem significativamente na etapa de sinterização e pelotização. Estes efeitos são explicados por fenômenos físicoquímicos que ocorrem na interfase sólido/líquido na presença de agentes ligantes.

- . Dos ligantes testados, apenas a cal hidratada mostrou-se efetiva em aumentar a resistência mecânica das pelotas, mostrando que a cinza pode ser ativada com cal a fim de que manifeste sua natureza pozolânica. Deste modo pode-se obter pelotas verdes, dotadas de uma resistência mínima, capazes de suportarem posteriormente o processo de sinterização.

- . As condições de cura têm influência nas características mecânicas das pelotas cruas obtidas com a cal como agente ligante-fundente.

. Na sinterização pode-se notar que a cal hidratada atua como um fundente. O teor de 10% de cal parece ser o mais indicado, não se justificando o uso de teores mais elevados visto que a cal não é consumida. Teores menores de cal resultaram em pelotas pouco resistentes.

## Agradecimento

Os autores agradecem ao Fipex e CNPq pelo auxílio financeiro e à Cátia Bueno pela sua colaboração na parte experimental.

## 5. Bibliografia

- (1) KLOTEN, Lightweight aggregate from sintered ash; Coal ash utilization-fly ash, botton ash slag. Pollution Technology Review, 48, 1978.
- (2) MOSS, D.W. Lightweight aggregate production and utilization in the United Kingdom. In: INTERNACIONAL ASH UTILIZATION SYMPOSIUM, 4. St. Louis, Mar 24-26, 1976. Proceedings... s.l., Morgantown Energy Research Center, s.l., p.21-218.
- (3) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados leves para concreto de elementos de alvenaria. Rio de Janeiro, s.d. (P-EB-228).
- (4) Agregados leves para concreto isolante térmico. Rio de Janeiro s.d. (P-EB-229).
- (5) Agregados leves para concreto estrutural. Rio de Janeiro, s.d.
- (6) SASTRY, K.V.S. & FUERSTENAU, D.W. A laboratory method for determining the balling behavior of taconite concentrate. Trans, SME, 250:64-67, 1971.
- (7) MEHHOTRA, V.P. & SASTRY, K.V.S. Influence of binders on the pelletization behavior of coal fines. In: AIME ANNUAL MEETING. Chicago, 1981.
- (8) MEYERS, P.P. & MEYERS, M.A. Ensaio mecânico em pelotas - análise matemática do ensaio convencional. Metalurgia ABM, 37(286):15-20, set. 81.
- (9) SOUZA SANTOS, P. Tecnologia de argilas, São Paulo, Editora Edgard Blücher, 1975. v.2.
- (10) ALBRECHT. Concretos leves. Boletim do ITERS, Porto Alegre, 43, 1968.
- (11) FUERSTENAU, D.W. & ABOUZEID, A.Z.M. Pelletization of fly ash; agglomeration 81. In: INTERNACIONAL SYMPOSIUM ON AGGLOMERATION, 3. Proceedings ... Nuremberg, 1981. p. H2-H17.
- (12) FUERSTENAU, D.W. & MEHROTTRA, V.P. Production of eightweight aggregate by pelletizing lime-fly-ash mixture. s.n.t.

TABELA I - Composição química e propriedades físicas da cinza de Candiota.

Composição Química	%
SiO <sub>2</sub>	69.0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.1
CaO	0.8
MgO	0.5
C	1.4
Perda ao Fogo	0.4
Propriedades Físicas	
Material retido na peneira ≠ 325 :	30%
Superfície específica Blaine:	3300 cm <sup>2</sup> /g
Massa específica real dos grãos:	2.10 g/cm <sup>3</sup>

TABELA II - Composição química e propriedades físicas da cal hidratada.

Composição Química	%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.10
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.11
MgO	32.2
Propriedades Físicas	
Material retido na peneira ≠ 325 :	15%
Superfície específica Blaine:	17000 cm <sup>2</sup> /g
Massa específica real dos grãos:	2.7 g/cm <sup>3</sup>

TABELA III - Condições ótimas com vários agentes ligantes para formação de pelotas homogêneas em tamanho.

Ligante	%H <sub>2</sub> O	Massa Pelotizada (%)	Diâmetro Médio (cm)
CaCl <sub>2</sub> (5%)	26.6	71	1.5
Silicato de sódio (1%)	28.5	75	1.6
Ca(OH) <sub>2</sub>	10%	26.7	68
	20%	25.2	69
	30%	24.5	76
CaCO <sub>3</sub>	10%	25.4	68
	20%	24.4	63
	30%	23.9	66
Cinza Pura	29.4	85	1.4

TABELA IV - Influência dos vários ligantes usados nas características mecânicas das pelotas cruas.

Teste	Sem Ligante	Silicato de sódio (1%)	CaCl <sub>2</sub> (5%)	CaCO <sub>3</sub> (10%)	Ca(OH) <sub>2</sub> (10%)
Resistência à compres. (Kgf/pel.2g)	0	0	0	0	2.6
Resistência à abrasão (%)	0	3.0	10.3	0.7	73.9
Resistência ao Impacto (0-10)	0	0	0	0	0.75

FIGURA 1 - Distribuição granulométrica das pelotas obtidas com distintos teores de água. Demais variáveis mantidas constantes.

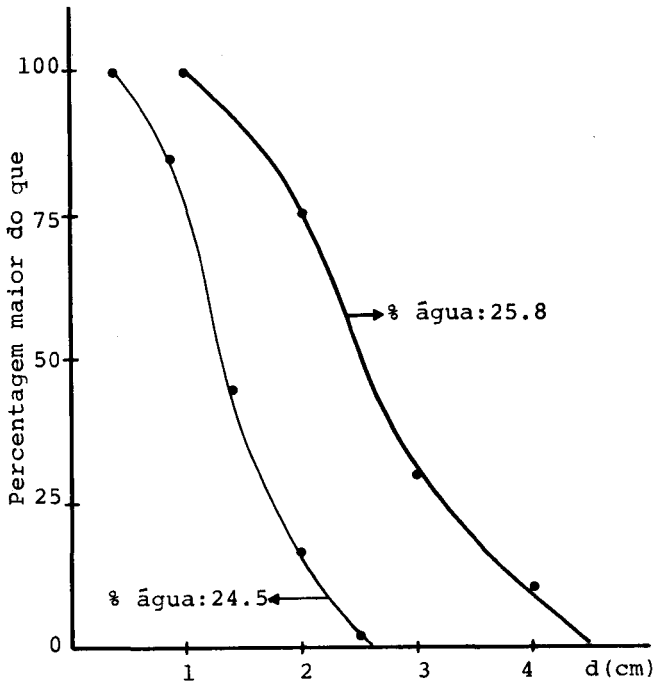


FIGURA 2 - Influência dos agentes ligantes na cinética de pelletização.

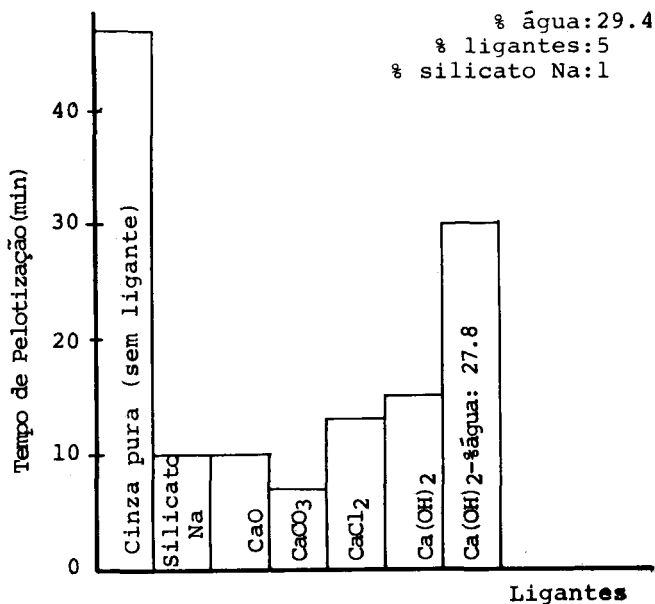


FIGURA 3 - Resistência à abrasão e ao impacto em função do teor de cal.

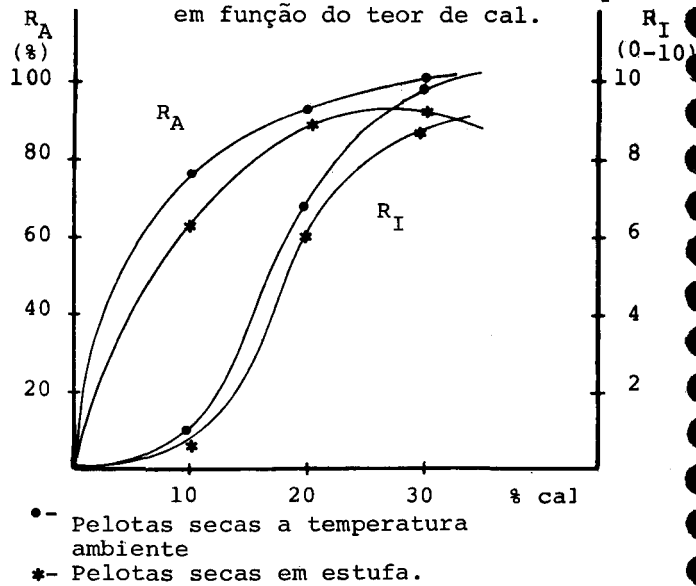


FIGURA 4 - Carga de fratura (Lf) em função da massa (M) para pelotas de cal hidratada. Teor de cal é indicado na reta.

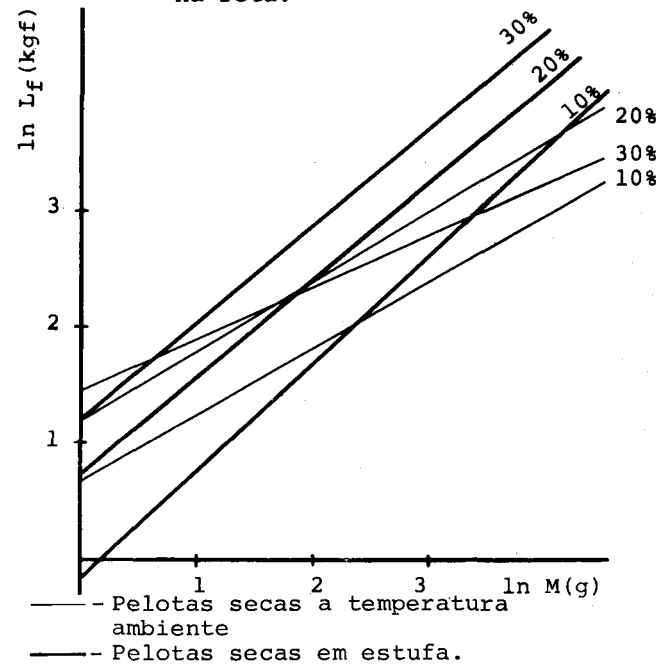


FIGURA 5 - Resistência à compressão em função do teor de cal, para pelotas secas a temperatura ambiente durante 7 e 28 dias.

