

ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM CIMENTOS POZOLÂNICOS

Alex Kenya Abiko\*

Abiko, Alex K. Estabilização de Solos com Cimentos Pozolânicos. São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil da EPUSP, 1987. 16 p. BT PCC 12/87.

A questão central deste trabalho é demonstrar a viabilidade técnica e econômica da estabilização de solos com os cimentos pozolânicos de cinza de casca de arroz e de resíduo cerâmico.

Para alcançar este objetivo o trabalho foi desenvolvido em duas etapas: a primeira referente ao desenvolvimento dos cimentos pozolânicos e a segunda referente à estabilização do solo propriamente dita.

Em ambas as etapas adotou-se o critério da simplicidade e da possibilidade de utilização de equipamentos leves e de absorção de mão-de-obra não especializada.

Os resultados técnicos e econômicos referentes ao cimento pozolânico de cinza de casca de arroz foram animadores; porém o mesmo não ocorreu com o cimento pozolânico de resíduo cerâmico que apresentou um desempenho em um patamar inferior.

Quanto à estabilização de solos, os experimentos e a avaliação econômica efetuada mostram que a eficácia dos cimentos pozolânicos utilizados é limitada sendo difícil a obtenção de resultados comparáveis com o atualmente obtido com o cimento portland.

Abiko, Alex K. Soil Stabilization with Pozzolanic Cements. São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil da EPUSP, 1987. 16 p. BT PCC 12/87.

The main scope of this work is to demonstrate the technical and economical viability of the soil stabilization with pozzolanic cements from rice husk ash and waste bricks and tiles.

In order to reach this objective the work has been developed in two stages: the first refers to the development of the pozzolanic cement and the second one refers to the soil stabilization.

In both these stages the criteria that has been adopted was of the simplicity, of the use of light equipments and of non skilled labour.

The technical and economical results referring to the rice husk ash pozzolanic cement were encouraging; but the same was not the case with the waste bricks and tiles pozzolanic cement that had an inferior performance.

As regards the soil stabilization, the tests and the economical evaluation show that the efficiency of the pozzolanic cement is limited thus the results achieved are not as good as of the portland cement.

\* Doutor em Engenharia, Professor do Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.



Escola Politécnica - EPBC



31200052909



## ÍNDICE

1. Introdução	01
2. Objetivo	02
3. Cimento Pozolânico	02
3.1. Pozolana	02
3.2. Atividade Pozolânica	03
4. Cimento Pozolânico de Resíduo Cerâmico e de Cinza de Casca de Arroz	04
4.1. Metodologia	04
4.2. Resultados Obtidos com Cimento Pozolânico de Resíduos Cerâmicos	04
4.3. Resultados Obtidos com Cimento Pozolânico de Cinza de Casca de Arroz	05
4.4. Discussão dos Resultados	07
5. Estabilização de Solos	08
5.1. Metodologia	08
5.2. Apresentação dos Resultados	09
5.2.1. Solo	09
5.2.2. Solo e Cal	09
5.2.3. Solo e Cimento Pozolânico	10
5.3. Discussão dos Resultados	12
6. Considerações Econômicas	14
6.1. Metodologia	14
6.2. Consumo de Energia	14
6.3. Custo do Cimento Pozolânico	14
7. Comentários e Conclusões	15
8. Referências Bibliográficas	16



## 1. INTRODUÇÃO

Ao longo da elaboração da dissertação de mestrado "Tecnologias apropriadas: Tijolos e paredes monolíticas de solo-cimento" pôde-se amadurecer diversas questões relacionadas com o desenvolvimento dos materiais de construção.

Das dessas questões se mostraram particularmente importantes: uma referida ao conceito de tecnologia apropriada e a outra relacionada ao solo-cimento.

O trabalho desenvolvido demonstrou que a tecnologia apropriada pode contribuir para o barateamento dos materiais de construção. E em especial o solo-cimento se constitui em uma alternativa viável desde que sejam respeitadas algumas condições.

A constatação de que a tecnologia apropriada pode contribuir para o barateamento dos materiais de construção tem sido demonstrada através de trabalhos apresentados em diversos Congressos. Entre eles pode-se citar o último Congresso do CIB, Conseil International du Bâtiment realizado em Washington em 1986 e o Colóquio Internacional de Materiais, Técnicas e Economia da Construção em Países em Desenvolvimento realizado também em 1986 em Paris e organizado pelo CSTB, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment e École Nationale des Ponts et Chaussées.

Entre os diversos materiais de construção apresentados nesses Congressos o solo se constitui de forma relevante em uma das alternativas mais viáveis. Todavia o solo sempre aparece consorciado com outros materiais conhecidos como estabilizadores cujo exemplo mais conhecido é o cimento portland.

Sem dúvida o cimento portland tem se revelado como o mais eficiente estabilizador apresentando porém a desvantagem de se constituir em material nem sempre disponível. Em termos mundiais muitos países não produzem cimento portland e são obrigados a importar este material básico a um preço muitas vezes proibitivo inviabilizando construções de baixo custo.

Este problema apontou para a necessidade de se estudar outros estabilizadores que pudessem apresentar características mecânicas, de disponibilidade e de custo compatíveis com a utilização pretendida, isto é, aumentar a durabilidade e a resistência mecânica do solo enquanto material de construção.

Dentre os diversos materiais possíveis de serem utilizados como estabilizadores: cal, asfalto, fibras vegetais, cinzas de madeira, resinas, escolheu-se o cimento pozolânico.

Não o cimento portland pozolânico mas o cimento pozolânico conhecido desde a antiguidade.

Escolheu-se o cimento pozolânico pois observa-se internacionalmente e inclusive no Brasil uma tendência para o estudo destes materiais por se constituírem em alternativas aos aglomerantes atualmente empregados.

Na antiguidade este cimento pozolânico era constituído de cal e de certos materiais de origem vulcânica conhecidos atualmente como pozolanas.

Estes materiais tem sido redescobertos nos dias de hoje pois apresentam algumas vantagens sobre o cimento portland como menor consumo energético, possibilidade de produção em menor escala e também atenuam a ocorrência de fissuras e podem aumentar a durabilidade e a trabalhabilidade de concretos.

Para o presente estudo foram escolhidas duas pozolanas: a cinza de casca de arroz e o pó de resíduo cerâmico. Procurou-se desta forma o emprego de resíduos agrícolas e resíduos industriais que atualmente ou são sub-utilizados ou são desprezados sem nenhuma utilização. Algumas vezes estes resíduos também apresentam problemas de destinação.

A questão central deste trabalho é demonstrar a viabilidade técnica e econômica da estabilização de solos com os cimentos pozolânicos de cinza de casca de arroz e de resíduo cerâmico.

Para tanto o trabalho foi desenvolvido em duas etapas bem definidas: a primeira referente ao desenvolvimento dos cimentos pozolânicos e a segunda referente à estabilização do solo propriamente dita.

Para o desenvolvimento do cimento pozolânico inicialmente foi estudada a produção das pozolanas adotando-se o critério da simplicidade e da possibilidade de utilização de equipamentos leves e de absorção de mão-de-obra não especializada. Estas pozolanas assim produzidas foram misturadas com a cal em diferentes proporções procurando-se obter o cimento pozolânico de melhor desempenho.

Com esse cimento pozolânico foi desenvolvida a segunda etapa do trabalho, ou seja a de estabilização do solo.

Para isso foi escolhido um solo e avaliou-se diferentes misturas solo/cimento pozolânico através de ensaios de resistência à compressão em equipamento reduzido.

As variáveis contempladas foram a umidade de compactação, energia de compactação e tipo de cura.

Com os aspectos técnicos equacionados procurou-se verificar a viabilidade econômica dos cimentos pozolânicos e da estabilização de solos com estes estabilizadores.

Os resultados referentes especificamente ao cimento pozolânico de cinza de casca de arroz foram animadores, porém o mesmo não se pode falar do cimento pozolânico de resíduo cerâmico que apresentou um desempenho em um patamar inferior.

Quanto à estabilização de solos, os experimentos e a avaliação econômica efetuada mostram que a eficácia dos cimentos pozolânicos utilizados é limitada sendo difícil a obtenção de resultados comparáveis com o atualmente obtido com o cimento portland.

Este resultado é restrito pois somente se estudou um solo e ainda persistem dúvidas a respeito da interação dos materiais solo/cal/pozolana que, se respon-

didadas a contento podem contribuir para a melhoria de desempenho desta estabilização.

Cabe ressaltar que, apesar do resultado parcial e no caso, contrário à expectativa inicial, conseguiu-se implementar uma metodologia própria onde a questão tecnológica emerge em um contexto globalizante que envolve também as questões econômicas e sociais.

## 2. OBJETIVO

O presente trabalho tem por objetivo verificar a viabilidade técnica e econômica da estabilização de solos com cimentos pozolânicos de cinza de casca de arroz e de resíduos cerâmicos.

Adjacente a este objetivo geral este trabalho se preocupa com:

- um entendimento de materiais de construção numa ótica de tecnologia apropriada considerando aspectos históricos, de disponibilidade e econômicos;
- desenvolvimento de cimentos pozolânicos a partir de pozolanas obtidas localmente com equipamentos leves e empregando mão-de-obra não especializada;
- desenvolvimento de equipamento leve para a produção de cinza de casca de arroz;
- metodologia para a avaliação de cimentos pozolânicos;
- metodologia para a estabilização de solos com cimentos pozolânicos;
- metodologia para apreciação econômica de cimentos pozolânicos.

## 3. CIMENTO POZOLÂNICO

### 3.1. Pozolana

Os primeiros aglomerantes empregados pelo homem foram talvez o barro e o betume. Posteriormente foram descobertos o gesso e a cal aérea, utilizados por caldeus, babilônios, assírios, sumerianos, egípcios.

Os aglomerantes eram empregados no rejuntamento de pedras, de adobes, de tijolos, e no preenchimento de estruturas de madeira tal como nas construções em tampa.

O grande problema desses aglomerantes é sua durabilidade, principalmente em presença de umidade.

Os gregos e os romanos conseguiram melhorar a durabilidade de argamassas de cal e areia ao adicionar certos materiais de origem vulcânica.

Os gregos usavam as terras vulcânicas da ilha de Santorim; os romanos utilizavam cinzas vulcânicas, encontradas junto ao Vesúvio, principalmente na localidade de Pozzuoli. Estas últimas eram conhecidas como pozolanas.

Vitruvius, arquiteto e engenheiro romano do primeiro século AC escreveu no segundo livro do seu tratado

"De Architectura Libri Decem", capítulo VI que tem o título de "Da pozolana e como empregá-la" que a pozolana "é uma espécie de pó a qual a natureza deu uma virtude admirável ... ao misturá-la com a cal e agregados torna a alvenaria tão forte podendo ser empregada não só em edifícios comuns como também no fundo do mar enrijecendo e endurecendo maravilhosamente".

Com a expansão do Império Romano a mistura cal-pozolana foi largamente difundida em obras civis e militares apresentando um desempenho compatível com a sua utilização.

Somente no século passado, com a invenção do cimento portland em 1824, declinou a utilização da mistura cal-pozolana.

Realmente o cimento portland apresentou qualidades que revolucionaram a construção civil: durabilidade, rapidez de endurecimento, resistência mecânica.

A retomada da pozolana como material de construção se deu nos anos 70 a partir de dois fatos principais:

- a crise energética;
- a disseminação dos conceitos de tecnologia apropriada da resgatando e adaptando as tecnologias tradicionais.

A NBR 5736 define pozolanas ou materiais pozolânicos como materiais silicosos ou sílico-aluminosos, que por si só possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença de água, reagem com hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades cimentícias.

Conforme Massazza as pozolanas podem ser classificadas como naturais ou como artificiais.

As pozolanas naturais são aquelas formadas por algum processo da natureza necessitando geralmente de apenas uma moagem. Elas podem ser:

- pozolanas de origem vulcânica formadas a partir de erupções vulcânicas que ao se resfriarem bruscamente produzem uma massa vítrea reativa.
- pozolanas de origem sedimentar, representadas pelas argilas, cherts opalinos e diatomitos.

As pozolanas artificiais são aquelas obtidas por meio de um processamento industrial ou como um subproduto industrial. Elas podem ser classificadas em:

- Cinzas volantes que são resíduos finamente divididos obtidos nas usinas termoeletricas as que se utiliza como combustível carvão pulverizado ou granulado.
  - Pela sua utilização na indústria cimenteira a cinza volante é a mais estudada das pozolanas.
  - Argilas e folhelhos calcinados obtidos pela queima das argilas, materiais naturais constituídos por argilominerais, e dos folhelhos, argilos finamente laminados ou estratificados.
- No Brasil apenas 10% dos materiais pozolânicos adicionados ao clínquer portland são constituídos de argila calcinada.
- Este fato justifica-se, apesar da abundância de ar

gias, pelo consumo de energético necessário para calinar esta matéria prima.

- Resíduos industriais e agro-industriais que apresentem em sua forma natural ou após queima, porcentagens variadas de sílica e de outros óxidos. Alguns dos materiais estudados e nem sempre com resultados positivos são os seguintes:

- . resíduos de combustão de xistos
- . cinzas de eucaliptos
- . cinzas de bagaço de cana de açúcar
- . resíduos da indústria cerâmica vermelha
- . cinzas da casca de arroz
- . cinzas de folhas de gramíneas

Atualmente a mistura de pozolanas com cal em proporções adequadas, que em presença de umidade forma compostos estáveis de poder aglomerante é chamada de cimento pozolânico.

Quando se substitui a cal por clínquer portland obtém-se o cimento portland pozolânico definido pela NBR 5736 "é o aglomerante hidráulico obtido pela mistura homogênea de clínquer portland e materiais pozolânicos moídos em conjunto ou em separado, durante a moagem é permitida a adição de uma ou mais formas de sulfato de cálcio; o teor de materiais pozolânicos secos deve estar compreendido entre 15% e 40% da massa total do aglomerante".

Nos últimos anos a produção de cimento portland pozolânico no Brasil tem aumentado percentualmente à produção de cimento portland comum.

Este aumento da produção de cimento portland pozolânico no Brasil segue uma tendência mundial.

Isto se deve a fatores de ordem econômica e técnica.

Do ponto de vista econômico os cimentos portland pozolânicos permitem uma redução de custo devido à redução do consumo de clínquer. Esta redução de clínquer se reflete na redução da quantidade de energético utilizado em seu processo de produção.

No caso de se utilizar alguns subprodutos industriais como as cinzas volantes pode-se obter uma economia ainda maior.

Do ponto de vista técnico o cimento portland pozolânico apresenta algumas vantagens sobre o cimento portland comum:

- despreendem menor quantidade de calor durante a hidratação contribuindo para atenuar a possibilidade de ocorrência de fissura, sobretudo em concreto massado;
- a pozolana torna o concreto mais durável ao reagir com a cal fixando-a impedindo que reaja com sulfato formando a etringita cujos efeitos expansivos podem vir a desagregar o concreto;
- aumento da trabalhabilidade do concreto através do aumento da plasticidade e da diminuição da tendência à desagregação devido a finura da pozolana.

Por outro lado o cimento pozolânico apresenta duas desvantagens importantes:

- o incremento de sua resistência mecânica é mais lento devido a menor velocidade de suas reações de hidratação;
- a sua menor finura exige uma relação água/cimento mais elevada e consequentemente pode-se alcançar uma resistência mecânica menor.

### 3.2. Atividade Pozolânica

Atividade pozolânica é a capacidade que as pozolanas tem de formar, na temperatura ambiente e quando misturadas com a cal e a água compostos estáveis de poder aglomerante.

Mais especificamente é a capacidade de reagir com hidróxido de cálcio formando compostos como silicatos e aluminatos de cálcio.

O mecanismo pelo qual este fenômeno ocorre ainda não é suficientemente conhecido mas os fatores que mais afetam a atividade pozolânica são a porcentagem elevada de sílica e de alumina e a superfície específica das pozolanas.

Como os silicatos são os que mais contribuem para a resistência mecânica, a sílica deve ser o constituinte predominante, além da alumina em menor proporção.

Conforme alguns autores uma pozolana deve ter no mínimo 40% de SiO<sub>2</sub> e até 30% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e teores mínimos de CaO e MgO.

Porém como a natureza precisa dos fatores que influenciam nas reações físico-químicas das pozolanas com a cal e a água ainda não foram estabelecidas, não é suficiente sua análise química para a determinação de sua atividade pozolânica.

A análise química das pozolanas é útil no controle de sua qualidade tanto ao nível da produção quanto ao nível da recepção do material.

O que se constata da literatura técnica é que existem diversas formas de se determinar a atividade pozolânica de um material. Acredita-se que a mais satisfatória seja a avaliação desta atividade pozolânica através da resistência mecânica, apesar de que muitas vezes sejam requeridas outras qualidades das pozolanas.

Apresenta-se no Quadro 1, alguns métodos de ensaio para a avaliação da atividade pozolânica.

Pode-se observar dois pontos importantes nos métodos de ensaio para a avaliação da atividade pozolânica:

- primeiro, que a avaliação é feita em presença de cal ou cimento, isto é a atividade pozolânica está associada a um outro material cuja composição é variável; portanto esta atividade também deve variar conforme a natureza do material que reage com a pozolana e o teor de seus componentes;
- segundo, que a cura dos corpos de prova é feita em temperaturas acima da do ambiente, em torno de 50 graus centígrados, sendo frequente a situação em que se mantem os corpos de prova em recipientes hermeticamente fechados; este procedimento se justifica pois as



reações pozolânicas são lentas na temperatura ambiente e há a necessidade de acelerar estas avaliações em laboratório.

Quadro 1. Métodos de ensaio para determinação de atividade pozolânica

Método	CF (m)	Constituintes	Cura	Parâmetro
NBR 5731- ASTM C311 (com cal)	cilíndrico Ø56x104	MCa(OH) <sub>2</sub> Pozzolana Água normal Água	6(24-28)h no molde em temperatura ambiente Desmoldar e manter 6 dias em água a (20-25)°C 6(4-6,5)h antes do ensaio, resfriar até (20-25)°C e romper	resistência à compressão ≥ 5,5 MPa
NBR 5732- ASTM C311 (c/ clareador)	cilíndrico Ø56x104	MCa(OH) <sub>2</sub> Pozzolana Água normal Água	6(24-28)h no molde em temperatura de (20-25)°C Desmoldar e manter no recipiente hermeticamente fechado por 27 dias a (20-25)°C Resfriar até (20-25)°C, romper	
NBR 5733	-	-	-	gráfico
ASTM C397	cúbico Ø38	MCa(OH) <sub>2</sub> Pozzolana Água	67 dias no molde, no vapor, a (54-59)°C	resistência à compressão ≥ 4,1 MPa
Brinco e Allen	cúbico Ø25	MCa(OH) <sub>2</sub> Pozzolana Água	62 dias em temp. ambiente 64h em água a 50°C 62 dias em água a 20°C	avaliação comparativa
Brinco e Allen	cúbico Ø38	MCa(OH) <sub>2</sub> Pozzolana Água normal Água	64h no molde em câmara úmida Desmoldar e manter no recipiente hermeticamente fechado por 8 dias a 50°C	classificação conforme resistência à compressão

#### 4. CIMENTO POZOLÂNICO DE RESÍDUO CERÂMICO E DE CINZA DE CASCA DE ARROZ

##### 4.1. Metodologia

O cimento pozolânico de resíduo cerâmico é obtido através da mistura em quantidades adequadas de resíduos cerâmicos e cal hidratada.

O cimento pozolânico de cinza de casca de arroz é obtido através da mistura em quantidades adequadas de cinza de casca de arroz e cal hidratada.

Ambos os cimentos pozolânicos são obtidos a partir da mistura de materiais pozolânicos com a cal hidratada.

Inicialmente procura-se obter um material pozolânico que apresente qualidade e custo compatíveis através de processos simples que não requeiram equipamentos complexos ou que consumam energia em abundância. Este requisito é próprio do aproveitamento racional de resíduos.

No caso de resíduo cerâmico procurou-se uma indústria de cerâmica vermelha que tivesse caracterizadas a sua matéria prima e a temperatura de queima de seus produtos. Também era importante que a indústria apresentasse um processo de fabricação uniforme e controlado.

Posteriormente o resíduo cerâmico dessa indústria foi moído adequadamente em 2 finuras. O pó de resíduo cerâmico assim obtido foi caracterizado quimicamente e quanto a sua atividade pozolânica.

#### ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM CIMENTOS POZOLÂNICOS

No caso da cinza de casca de arroz, esta foi obtida queimando-se a casca em equipamento adequado controlando-se a temperatura de queima. Este equipamento foi desenvolvido respeitando-se o critério de simplicidade e de desempenho adequado.

Após a queima a cinza foi caracterizada quimicamente e quanto a sua atividade pozolânica.

O pó de resíduo cerâmico e o pó de cinza de casca de arroz, caracterizados como materiais pozolânicos, foram misturados com dois tipos de cal: dolomítica e cálcica. Essas cals tinham sido anteriormente caracterizadas sob o ponto de vista químico e físico.

A mistura foi elaborada variando-se as proporções de seus componentes procurando-se investigar:

- qual o melhor tipo de cal para o material pozolânico;
- qual a melhor proporção cal/material pozolânico.

Essas avaliações foram feitas em função da resistência à compressão de corpos de prova de argamassa preparados com a mistura. Com a mistura que apresentou os melhores resultados de resistência à compressão foram executados ensaios em pasta: expansibilidade de Chatelier, tempo de início e fim de pega e plasticidade, e em argamassa fresca: ensaio de retenção de água.

Estes ensaios visaram qualificar os cimentos pozolânicos a fim de verificar a sua adequação em diversas utilizações.

Cabe lembrar que nos Gráficos referentes a esta etapa dos estudos optou-se por unir os pontos (x,y) para ilustrar o que ocorre não significando que estas retas reproduzam com exatidão o observado.

##### 4.2. Resultados Obtidos com Cimento Pozolânico de Resíduos Cerâmicos

Para este trabalho foram obtidos resíduos de uma indústria da região de Itu que produz blocos cerâmicos por extrusão a vácuo a partir da queima a 960 graus centígrados de uma mistura de argilas.

Este resíduo cerâmico foi moído em duas finuras:

- amostra C1
- amostra C2

A amostra C1 apresentou uma massa específica de 2,73 g/cm<sup>3</sup> (NBR 6474) e superfície específica Blaine de 7350 cm<sup>2</sup>/g (NBR 7224).

A amostra C2 apresentou uma massa específica de 2,72 g/cm<sup>3</sup> (NBR 6474) e superfície específica Blaine de 1655 cm<sup>2</sup>/g (NBR 7224).

A moagem foi efetuada da seguinte forma: primeiramente o resíduo com dimensões aproximadas de 5 a 10 cm foi submetido a um britador de mandíbulas e posteriormente a um moinho de discos até a obtenção da finura final.



Para verificação da atividade pozolânica do pó de resíduo cerâmico foi utilizado o método NBR 5753.

O pó de resíduo cerâmico C1 apresentou resultados onde a mistura é considerada um cimento pozolânico, indicando que o material é ativo reagindo permanentemente com o cálcio liberado na hidratação do clínquer.

Posteriormente o resíduo cerâmico foi misturado com dois tipos de cal encontrados no mercado: a cal 1, dolomítica e a cal 2, calcária.

Para a mistura resíduo cerâmico/cal adotou-se a nomenclatura a-b-c onde,

a = C1 ou C2, tipo do resíduo cerâmico

b = 60, 70 ou 80%, porcentagem em massa do resíduo cerâmico

c = 1 ou 2 tipo de cal

A avaliação da melhor proporção das misturas foi feita em termos de resistência à compressão em cilindros de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura moldados e rompidos conforme as diretrizes gerais da NBR 7215.

A quantidade de água de amassamento empregada foi aquela necessária para se obter uma consistência na massa de "flow" de  $(165 \pm 5)$  mm.

Os corpos de prova foram ensaiados após 7, 28 e 90 dias.

Para fins de comparação também foram ensaiadas as cal 1 e 2 sem o resíduo cerâmico, conforme o mesmo método de ensaio.

Os resultados de resistência à compressão das misturas encontram-se no Quadro 2.

A mistura que apresentou os melhores resultados foi a C1-70-1, isto é, 70% de resíduo cerâmico C1 e 30% de cal dolomítica, com resistência à compressão de 2,8 MPa aos 28 dias e 4,7 MPa aos 90 dias.

Com a mistura C1-70-1 também foram executados ensaios em pasta: expansibilidade Le Chatelier (NBR 7215), tempo de início e fim de pega (NBR 7215), estabilidade (projeto de norma 18:05.11-002), plasticidade (projeto de norma 18:05.11-003). Em argamassa fresca foi executado ensaio de retenção de água (projeto de norma 18:05.11-004). Os resultados são apresentados no Quadro 3.

Quadro 2: Resistência à compressão de misturas resíduo cerâmico/cal

Amostra	Resistência à compressão (MPa)		
	7 dias	28 dias	90 dias
C1-60-1	0,5	2,4	4,6
	0,5	2,4	4,5
C1-70-1	0,6	2,8	4,7
	0,6	2,6	4,7
C1-80-1	0,7	2,5	2,6
	0,6	2,4	2,4
C2-60-1	0,3	1,9	1,8
	0,3	1,9	1,7
C2-70-1	0,3	1,9	2,6
	0,2	1,8	2,6
C2-80-1	0,3	0,9	0,9
	0,2	0,8	0,8
Cal 1	0,3	1,1	1,9
	0,3	1,2	1,9
C1-60-2	0,2	1,2	2,9
	0,2	1,1	2,8
C1-70-2	0,3	1,4	3,2
	0,3	1,3	3,1
C1-80-2	0,1	0,4	1,4
	0,1	0,4	1,3
C2-60-2	0,1	0,4	1,1
	0,1	0,4	1,0
C2-70-2	0,2	0,8	1,4
	0,1	0,7	1,4
C2-80-2	0,3	1,3	2,8
	0,3	1,2	2,7
Cal 2	0,2	0,8	1,8
	0,2	0,8	0,9

Quadro 3: Ensaios em pasta e em argamassa fresca

	C1-70-1	C1-70-2
água para pasta de consistência normal (C de peso do aglomerante)	43,2	43,0
expansibilidade Le Chatelier (NBR 7215)		
o a frio (7 dias)	0,0mm	0,0mm
o a quente (3 horas)	0,0mm	0,0
determinação de tempo de pega (NBR 7215)		
o início	7510s	2815s
o fim	7850s	7920s
determinação de plasticidade (Proj 18:05.11-003)		
o água para pasta de consistência normal (C de peso do aglomerante)	53,0	43,0
o plasticidade	121	115
água para argamassa de consistência normal (C de peso do aglomerante)	83,2	104,0
retenção de água (Proj 18:05.11-004)	57,9%	45,4%
resistência à compressão (NBR 7215)		
o 7 dias	0,60Pa	2,70Pa
o 28 dias	2,80Pa	3,30Pa

#### 4.3. Resultados Obtidos com Cimento Pozolânico de Cinza de Casca de Arroz

Para esta etapa do trabalho foi obtida casca de arroz de uma beneficiadora da região de Laranjal Paulista.

Esta casca foi queimada em um forno especialmente

construído (Figura 1) conforme recomendações do Pakistan Council for Scientific and Industrial Research.

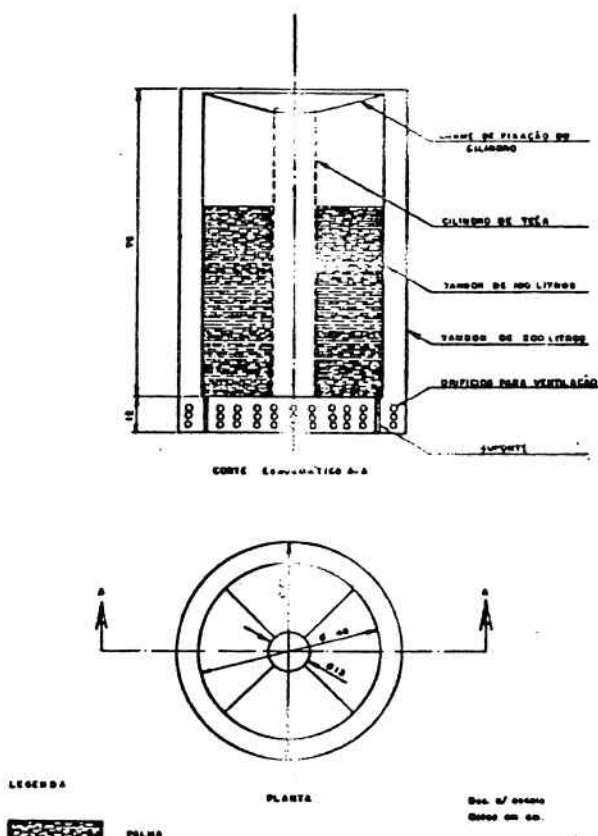
Este forno é construído com dois tambores de 200 l e 100 l que constituem uma câmara na qual a casca de arroz é queimada. Esta casca necessita de ignição para iniciar a combustão. Posteriormente se queima sozinha sem necessitar de combustível.

A temperatura de queima da casca de arroz para produzir uma pozolana deve estar compreendida entre 450 e 750 graus centígrados. A temperatura média registrada com um potenciômetro durante a queima da casca no forno construído foi de 500 graus centígrados.

Esta cinza ao sair do forno é friável e após uma ligeira moagem em moinho de bolas apresentou uma superfície específica Blaine (NBR 7224) de 12210  $\text{cm}^2/\text{g}$  e uma massa específica (NBR 6474) de 2,45  $\text{g}/\text{cm}^3$ .

A este pó de cinza de casca de arroz se deu a denominação de amostra A1.

Figura 1 - Forno para queima de arroz



Para verificação da atividade pozolânica da cinza de casca de arroz foi utilizado o método NBR 5753.

O pó de cinza de casca de arroz A1 apresentou resultados na região onde a mistura é considerada um cimento pozolânico, indicando que o material é ativo reagindo permanentemente com o cálcio liberado na hidratação do clínquer.

Posteriormente a cinza foi misturada com 2 tipos de cal encontrados no mercado, a cal 1, dolomítica e a cal 2, cálcica.

Para a mistura cinza de casca de arroz/cal adotou-se a nomenclatura a-b-c onde,

a = A1, amostra de cinza

b = 60, 70 ou 80%, porcentagem em massa da cinza

c = 1 ou 2, tipo de cal.

A avaliação da melhor proporção das misturas foi feita em termos de resistência à compressão da mesma forma como se avaliou a mistura de resíduo cerâmico/cal.

Os resultados de resistência à compressão das misturas encontram-se no Quadro 4.

A mistura que apresentou os melhores resultados foi a A1-70-2, isto é, 70% de cinza de casca de arroz A1 e 30% de cal cálcica, com resistência à compressão de 5,2 MPa aos 28 dias e 5,6 MPa aos 90 dias.

Quadro 4: Resistência à compressão de misturas cinza de casca de arroz/cal

Amostra	Resistência à compressão (MPa)		
	7 dias	28 dias	90 dias
A1-60-1	2,7	3,4	3,8
A1-70-1	2,4	2,9	3,7
A1-80-1	1,4	1,7	1,8
A1-60-2	2,8	3,5	3,9
A1-70-2	3,7	5,2	5,6
A1-80-2	3,4	4,7	4,8
Cal 1	0,5	1,2	1,9
Cal 2	0,2	1,1	1,8

Com a mistura A1-70-2 foram executados ensaios em pasta: expansibilidade de Chatelier (NBR 7215), tempo de início e fim de pega (NBR 7215), estabilidade (projeto de norma 18:05.11-002), plasticidade

dade (projeto de norma 18:05.11-003); em argamassa fresca foi executado ensaio de retenção de água (projeto de norma 18:05.11-004). Os resultados são apresentados no Quadro 3.

Finalmente foi determinado o poder calorífico superior e inferior da casca de arroz conforme o ensaio da norma ASTM D2015. Os valores encontrados foram de  $(3,18 \pm 0,04)$  Mcal/Kg e de  $(2,95 \pm 0,04)$  Mcal/Kg respectivamente.

#### 4.4. Discussão dos Resultados

Os experimentos efetuados com o cimento pozolânico de resíduo cerâmico e de cinza de casca de arroz apontaram três grupos de questões: um referente à obtenção da pozolana, outro referente à obtenção de cimento pozolânico e o terceiro referente à sua utilização.

No que se refere à obtenção da pozolana de resíduo cerâmico pode-se comentar o seguinte:

- Da mesma forma que ocorre com o surki, talvez a melhor temperatura de queima das argilas utilizadas na indústria de cerâmica vermelha que forneceu o resíduo não seja a de 960 graus centígrados. Isso do ponto de vista da atividade pozolânica. Também a conformação da cerâmica através de uma extrusora a vácuo dificulta a moagem posterior pois torna o material mais compacto. Todavia essas condições estavam estabelecidas a priori pois procura-se neste trabalho utilizar os resíduos existentes.
- A moagem do resíduo em 2 finuras teve por objetivo verificar a sua influência na obtenção do cimento pozolânico. Conforme o critério de finura estabelecido pela NBR 5736 para cimento portland pozolânico, 2500 a 2900  $\text{cm}^2/\text{g}$  dependendo do tipo, a amostra C1 pode ser considerada como pozolana. Por este critério a amostra C2 não pode ser considerada como pozolana. Deve-se lembrar para o fato de que para se obter finuras mais elevadas consome-se maior energia de moagem, elevando-se o custo da cominuição e consequentemente da pozolana.

No que se refere à obtenção da pozolana de cinza de casca de arroz pode-se comentar:

- O forno especialmente construído para a obtenção de cinza de casca de arroz se mostrou adequado para este experimento e também para a produção de pequenas quantidades, isto é, até 300 L de casca/dia. A sua vantagem é que se constitui em equipamento simples, de fácil execução e manutenção podendo ser utilizado por pequenas comunidades urbanas ou rurais. O inconveniente deste equipamento é a sua baixa capacidade de produção e a geração, na combustão da casca, de fumaça que pode ser considerada poluente.
- A finura da cinza obtida após a moagem é bastante elevada, se comparada com o mínimo recomendado pela NBR 5736. Esta finura foi obtida sem grande dificuldade pois a cinza é friável necessitando de pequena energia para a sua cominuição.
- Se comparado o poder calorífico superior da cas-

ca de arroz com outros materiais tais como madeira, papel, álcool, gasolina, carvão mineral conclui-se que o mesmo é inferior a todos eles mas é aproximado ao da madeira. Este fato faz com que a casca de arroz possa ser caracterizada como material energético e desta forma possa ser utilizada como combustível.

No segundo grupo de questões referentes à obtenção do cimento pozolânico observou-se que:

- As cales utilizadas no experimento foram aquelas encontradas no mercado respeitando-se com isto o enfoque deste trabalho, isto é, utilizar-se ao máximo do material disponível localmente. Ambas as cales 1 e 2 atenderam em grande parte a NBR 7175. Adotando-se o critério de classificar as cales conforme o seu teor de óxido de cálcio pode-se classificar a cal 1 como dolomítica e a cal 2 como cálcica.
- O cimento pozolânico de resíduo cerâmico obtido através da mistura com a cal 1, dolomítica, apresentou melhores resultados de resistência à compressão do que o obtido através da mistura com a cal 2. Esta constatação é válida para todas as porcentagens resíduo/cal ensaiadas. Por outro lado o cimento pozolânico de cinza de casca de arroz obtido através da mistura com a cal 2, cálcica apresentou melhores resultados de resistência à compressão do que o obtido através da mistura com a cal 1, constatação válida também para todas as porcentagens cinza/cal ensaiadas. Isto significa que diferentes pozolanas reagem de forma diferente na presença de cales dolomíticas ou cálcicas. No caso a amostra C1 apresentou melhores resultados em presença de menor quantidade de óxido de cálcio. Este fato é contraditório e não se encontrou explicação na bibliografia consultada.
- O processo de cura adotado para a avaliação da resistência à compressão foi o de câmara úmida e temperatura ambiente pois em termos de método de ensaio é o que mais se aproxima das condições usuais. Apesar do pequeno número de corpos de prova o processo de cura acelerado reproduziu aproximadamente os resultados obtidos na cura à temperatura ambiente após os 28 dias.

O último grupo de questões é referente à utilização dos cimentos pozolânicos:

- Os resultados apresentados no Quadro 3 caracterizam uma utilização potencial dos cimentos pozolânicos. Estes resultados podem ser comparados com os valores do Quadro 5: Parâmetros de cimentos de alvenaria que apresenta os principais parâmetros de diversas normas técnicas internacionais. Os números constantes do Quadro 5 devem ser entendidos como ordens de grandeza pois os métodos de ensaio para obtê-los nem sempre são os mesmos entre si. Os cimentos de alvenaria são materiais de construção utilizados há mais de 30 anos em outros países e no Brasil sua produção se iniciou em 1981. Este cimento pode ser utilizado no assentamento de alvenaria, seja de vedação ou portanto, no revestimento de paredes, contrapisos, cimentados, assentamento de ladrilhos cerâmicos ou azulejos. Em termos de resistência mecânica pode ser considerado como um pro-

duto intermediário entre a cal e o cimento portland.

- Nesta comparação com o Quadro 5, o cimento pozolânico de resíduo cerâmico não pode ser considerado como um cimento de alvenaria pois não atende aos requisitos de tempo de final de pega e de resistência à compressão. O cimento pozolânico de cinza de casca de arroz também não pode ser considerado como um cimento de alvenaria pois não atende aos requisitos de tempo de final de pega e retenção de água.
- Apesar dos resultados alcançados, duas observações são importantes para o prosseguimento dos estudos. Primeiramente ainda não se conhece no país, com a devida profundidade, as características das argamassas tradicionais, mistas ou de cal, que são utilizadas quer no assentamento das alvenarias que no seu revestimento. Isto posto é necessário que prossigam os estudos atualmente em curso de avaliação de argamassas com materiais nacionais através de suas propriedades de trabalhabilidade, retenção de água, capacidade de absorver deformações, a extensão e a resistência de aderência e a durabilidade, além da resistência mecânica. Em função destes estudos deverão ser preparadas argamassas com o cimento pozolânico em diversas proporções estabelecendo-se com o devido rigor a sua utilização enquanto cimento de alvenaria. A segunda observação pode ser feita analisando-se a NBR 7200 na qual são estabelecidos traços de argamassas exclusivamente de cal para determinadas funções. Constatou-se que os cimentos pozolânicos apresentam resistência mecânica mais elevada que as cals 1 e 2, e que as amostras C1 e A1 apresentam valores de plasticidade mais elevados que as cals 1 e 2, possuindo consequentemente melhor trabalhabilidade. O ponto mais deficiente é a retenção de água. Com estas características o cimento pozolânico poderia substituir a cal.

Quadro 5: Parâmetros para cimentos de alvenaria

País	Norma	Tipo	Tempo de pega inicial (min)	Tempo de pega final (h)	Expansão	Ar incorporado (%)	Retenção de água (%)	Resistência à compressão (MPa) 7 dias	Resistência à compressão (MPa) 28 dias
Argentina	IRAM 1485	-	>90	<24	-	12 a 22	>70	>3,3	>3,3
USA	ASTM C71	A	>120	<24	(+), 0,1	12 a 22	>70	>3,45	>4,21
		B	>90	<24	(+), 0,1	12 a 20	>70	>4,75	>14,49
		C	>90	<24	(+), 0,1	12 a 20	>70	>12,42	>28,91
França	NF P 15-267	Ch 140	>30	-	<2mm	-	-	>10	>14
		Ch 250	>30	-	<2mm	-	-	>14	>25
Inglaterra	BS 524	-	>45	<10	<10mm	10 a 25	70 a 95	>4	>4
Brasil	CE-18:01.11	-	>90	<24	<10mm	10 a 20	>60	>3	5 a 15

- Com estas observações conclui-se que não se deve descartar a utilização dos cimentos estudados em argamassa de assentamento e de revestimento. Alguns estudos também podem ser feitos no sentido de introduzir aditivos ao cimento pozolânico a fim de melhorar as propriedades de retenção de água e de tempo de início e fim de pega.

- Uma outra utilização possível, esta apenas para o cimento pozolânico de resíduo cerâmico, é em pinturas, onde a pozolana devido a sua cor originada do material cerâmico se constitui em pigmento inorgânico.

## 5. ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

### 5.1. Metodologia

Para consecução dos objetivos desta etapa do trabalho, ou seja avaliar as misturas solo/cimento pozolânico foi adotada uma metodologia baseada em ensaios de resistência à compressão em equipamentos reduzidos, já utilizado em diversos laboratórios.

Os corpos de prova moldados neste equipamento tem 5 cm de diâmetro e 5 cm de altura sendo obtidos após a aplicação de 5 golpes de soquete em cada lado.

A densidade do corpo de prova assim obtido é próxima da densidade máxima do ensaio normal de compactação, também conhecido como Proctor normal.

Pode-se observar no entanto que a resistência à compressão de corpos de prova com relação altura/diâmetro igual a um não podem ser considerados como resistência à compressão simples. Todavia o valor da resistência obtido avalia o grau de estabilização do solo assim como é indicativo do comportamento relativo das misturas ensaiadas.

A moldagem dos corpos de prova por este equipamento tem a vantagem de necessitar dez vezes menos material do que quando se emprega o cilindro de Proctor, além de economizar tempo no desenvolvimento dos estudos.

Inicialmente foi recolhida uma amostra de solo de significativa ocorrência no Estado de São Paulo.

Este solo foi devidamente caracterizado determinando-se a massa específica dos grãos, os limites de Atterberg e a curva de distribuição granulométrica.

Com intuito de avaliar as condições de trabalhabilidade deste solo na compactação foram preparados corpos de prova com solo e cimento pozolânico com objetivo de avaliar a variação dos parâmetros de compactação, isto é, umidade e massa específica aparente seca das misturas.

Com base nos resultados obtidos dos ensaios de compactação foram moldados corpos de prova de misturas de solo e cimento pozolânico para serem submetidos a ensaios de compressão simples, após 2, 7, 28 dias de cura.

Procurou-se avaliar o comportamento das misturas em termos de resistência à compressão simples, em face da variação do teor de cimento pozolânico, do desvio de umidade em relação à ótima, da energia de compactação e do tipo de cura.

Após o período de cura estabelecido, os corpos de prova foram imersos em água por 24 horas à tempe-



ratura ambiente, sendo a seguir rompido em prensa de carga controlada, com velocidade de carregamento de aproximadamente 0,15 MPa/minuto.

Além da análise dos resultados obtidos nestes ensaios, foram executados os ensaios de resistência à compressão em cimento portland comum CP-320 com o objetivo de parametrizá-los.

A avaliação da durabilidade, normalmente efetuada em estudos de estabilização de solos, com o ensaio de perda de massa por molhagem e secagem, não foi verificada pois neste estudo pretende-se observar o comportamento do solo/cimento pozolânico face a uma possível utilização em componentes de edificações. Sabe-se que nestes casos a resistência à compressão representa não só a característica que estabelece a situação mais restritiva para os tipos de estabilizadores empregados como também é a variável que mais facilmente pode ser avaliada em laboratório.

Cabe também lembrar, que nos Gráficos referentes a esta etapa dos estudos optou-se por unir os pontos (x,y) para ilustrar o que ocorre não significando que estas retas reproduzem com exatidão o observado.

## 5.2. Apresentação dos Resultados

### 5.2.1. Solo

A amostra de solo foi coletada de um corte situado no Km 29 + 500 m da Rodovia Castelo Branco, pista Interior - Capital, na direção do pórtico de sinalização.

Trata-se de um saprolito de granito/gnaiss de significativa ocorrência no Estado de São Paulo.

Sobre a amostra deste solo foram executados os ensaios para a determinação de massa específica, NBR 6508, dos limites de Atterberg, NBR 6459 e NBR 7180 e da análise granulométrica, NBR 7181.

Os resultados de caracterização deste solo são apresentados no Gráfico 1.

### 5.2.2. Solo e cal

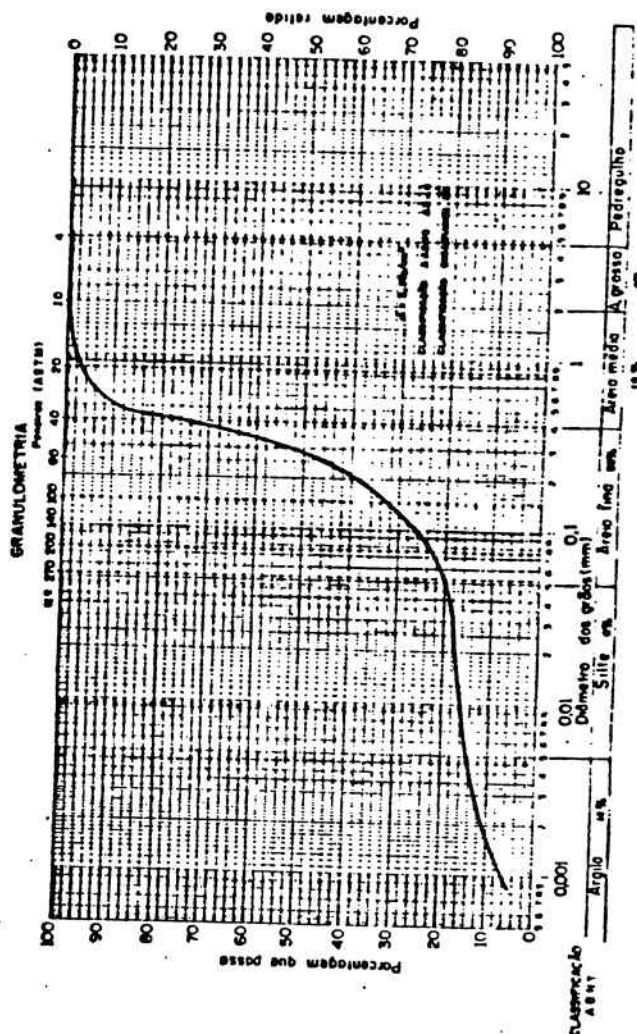
Com este solo foram executados preliminarmente ensaios de compactação no equipamento reduzido. O objetivo deste ensaio era de testá-lo e avaliar as condições de trabalhabilidade deste solo.

Foram ensaiadas três misturas: a primeira somente o solo sem a cal e as outras duas com 3,4% e 8% de cal respectivamente.

Os ensaios foram realizados aplicando-se cinco golpes de soquete em cada lado do corpo de prova; a energia desta compactação corresponde à energia normal de compactação no cilindro de Proctor.

Os resultados destes ensaios encontram-se no Quadro 6.

Gráfico 1 : Análise granulométrica do solo.



Quadro 6 - Resultados obtidos dos ensaios de compactação

Material	Massa específica aparente seca máxima (g/cm³)	Umidade ótima (%)
Solo	1,726	17,4
Solo + 3,4% de cal	1,628	15,3
Solo + 8,0% de cal	1,609	15,8
Solo + 3,0% de AI-70-2	1,333	20,5
Solo + 8,0% de AI-70-2	1,307	21,0
Solo + 11,0% de AI-70-2	1,471	22,2
Solo + 14,0% de AI-70-2	1,436	22,1
Solo + 17,0% de AI-70-2	1,432	24,0
Solo + 3,0% de CI-70-1	1,656	17,7
Solo + 8,0% de CI-70-1	1,629	18,7
Solo + 11,0% de CI-70-1	1,641	18,2
Solo + 14,0% de CI-70-1	1,609	19,4
Solo + 17,0% de CI-70-1	1,392	19,6

## 5.2.3. Solo e cimento pozolânico

Os cimentos C1-70-1 e A1-70-2 foram misturados ao solo em teores de 5%, 8%, 11%, 14% e 17% (peso do cimento pozolânico em relação ao peso do solo seco) procurando abranger uma faixa ampla para se avaliar a variação dos parâmetros de compactação das misturas, isto é, umidade e massa específica aparente seca.

A energia de compactação foi a normal, isto é, cinco golpes de soquete em cada lado do corpo de prova.

No Quadro 6 apresentam-se a massa específica aparente seca máxima e a umidade ótima determinada em cada ensaio.

Pode-se observar pelo Quadro 6 que, à medida que aumenta o teor de cimento pozolânico, diminui a massa específica aparente.

Todos os ensaios foram executados sem secagem prévia e sem reuso do material.

A partir dos resultados obtidos nos ensaios de compactação foram moldados corpos de prova de misturas solo e cimentos pozolânicos que foram ensaiados conforme quatro programações denominadas A, B, C, D.

A programação E é semelhante a programação A, utilizando-se o cimento portland CP-320 como estabilizador.

## - Programação A

Esta programação teve por objetivo avaliar o ganho de resistência da mistura com o incremento do teor de cimento pozolânico. Para tanto foram fixados:

- umidade em torno das ótimas, obtidas por correspondentes ensaios de compactação;
- número de golpes do soquete por face do corpo de prova igual a 5;
- cura em câmara úmida e isolada do ar.

Foram selecionados os teores de 5%, 11% e 17% em peso, para cada um dos cimentos C1-70-1 e A1-70-2 tendo sido moldados 9 corpos de prova para cada teor de cimento pozolânico e rompidos 3 para cada tempo de cura. A cura foi processada em câmara úmida, com os corpos de prova condicionados em recipientes dotados de tampa e vedados com fita adesiva, de modo a evitar perdas de umidade e a recarbonatação da cal.

No Quadro 7 apresentam-se os resultados dos ensaios de compressão simples bem como as condições de moldagem obtidas dos corpos de prova.

Nos Gráficos 15 a 18 apresentam-se a variação da resistência à compressão das misturas, em função do teor de cimento pozolânico e tempo de cura.

## - Programação B

Esta programação teve por objetivo avaliar a variação da resistência à compressão em função dos desvios de umidade em relação às ótimas, obtidas dos correspondentes ensaios de compactação. Para tanto foram fixados:

- teor de cimento pozolânico igual a 11% em peso;
- número de golpes do soquete por face do corpo de prova igual a 5;
- cura em câmara úmida e isolada do ar.

Foram preparadas misturas com desvios de umidade variando de - 3,0% a + 3,0% em relação à ótima, para cada um dos cimentos pozolânicos C1-70-1 e A1-70-2, tendo-se moldados 9 corpos de prova para cada condição de umidade e rompidos 3 para cada tempo de cura.

A cura foi processada em câmara úmida, com os corpos de prova condicionados em recipientes dotados de tampa e vedados com fita adesiva, de modo a evitar a perda de umidade e a recarbonatação da cal.

No Quadro 8 apresentam-se os resultados dos ensaios de compressão simples em função do desvio de umidade e do tempo de cura, estando apresentados também os resultados obtidos na Programação A, para o teor de 11%.

Quadro 7: Resultados de ensaios referentes a Programação A

Cimento pozolânico	Teor de cimento pozolânico (%) em peso	Desvio de umidade em relação à ótima (%)	Gran de compactação (%)	Tempo de cura (dias)	Resistência à compressão simples (MPa)
A1-70-2	5	1.1	97.3	2	0.37
			97.8	7	0.54
			98.8	28	0.57
A1-70-2	11	1.4	97.2	2	0.42
			98.4	7	1.21
			98.2	28	1.40
A1-70-2	17	2.8	98.8	2	0.39
			97.7	7	1.38
			97.8	28	2.28
C1-70-1	5	1.8	96.1	2	0
			97.8	7	0
			96.9	28	0
C1-70-1	11	1.3	98.7	2	0.42
			98.4	7	0.35
			98.4	28	0.52
C1-70-1	17	1.3	98.4	2	0.52
			98.1	7	0.96
			97.9	28	0.95

Notas: a) Nos 28 dias de maturação durante a imersão em água.  
b) Os 28 dias de maturação utilizaram-se 5 golpes/face.  
c) Os 28 dias foram curados em câmara úmida e isolados do ar.  
d) A gran de compactação e a resistência à compressão simples apresentadas.

## - Programação C

Esta programação teve por objetivo avaliar a variação da resistência à compressão em função da energia de compactação. Para tanto foram fixados:

- teor do cimento pozolânico igual a 11% em peso;
- umidade em torno das ótimas, obtidas dos correspon-

dentes ensaios de compactação realizados com 5 golpes de soquete por face do corpo de prova;

cura em câmara úmida e isolada do ar.

Para cada um dos cimentos pozolânicos C1-70-1 e A1-70-2 foram moldadas duas séries de 9 corpos de prova, aplicando-se 4 ou 10 golpes do soquete por corpo de prova, tendo-se rompido 3 corpos de prova, de cada série, para cada tempo de cura.

A cura foi processada em câmara úmida, com os corpos de prova acondicionados em recipientes dotados de tampa e vedados com fita adesiva, de modo a evitar perdas de umidade e a recarbonatação da cal.

No Quadro 9 apresentam-se os resultados dos ensaios de compressão simples, bem como as condições de moldagem obtidas dos corpos de prova.

- teor de estabilizador igual a 11% em peso;
- número de golpes do soquete por face do corpo de prova igual a 5;
- umidade em torno das ótimas obtidas dos correspondentes ensaios de compactação.

Foram preparadas misturas para cada um dos cimentos pozolânicos C1-70-1 e A1-70-2 tendo-se moldados 9 corpos de prova para cada cimento e rompido 3, para cada tempo de cura.

A cura foi processada ao ambiente, sem proteção especial, porém em local não exposto aos raios solares.

No Quadro 10 apresentam-se os resultados dos ensaios de compressão simples, bem como as condições de moldagem obtidas dos corpos de prova.

Quadro 9: Resultados de ensaios referentes a Programação C

Cimento pozolânico	Teor de cimento pozolânico (%) em peso	N.º golpes de soquete por face do cp	Desvio de umidade em relação à ótima (%)	Grau de compactação (%)		Tempo de cura (dias)	Resistência a compressão simples (MPa)
				Antes da imersão	Depois da imersão		
A1-70-2	11	4	0,1	98,2	96,2	2	0,21
				98,0	96,9	7	0,77
				98,1	96,9	28	1,26
A1-70-2	11	5	0,4	97,2	97,6	2	0,42
				97,8	98,2	7	1,21
				98,6	98,3	28	1,69
A1-70-2	11	10	0,1	102,5	102,1	2	0,42
				102,4	102,2	7	1,26
				102,3	102,7	28	2,07
C1-70-1	11	4	-0,2	98,3	-	2	0
				98,2	96,8	7	0,52
				98,8	97,2	28	0,56
C1-70-1	11	5	1,3	98,7	97,5	2	0,42
				98,6	97,1	7	0,55
				98,4	97,9	28	0,52
C1-70-1	11	10	-0,2	102,6	100,5	2	0,31
				102,1	101,9	7	0,77
				102,9	101,9	28	0,85

Notas: - 0 no cp se esborouhou durante a imersão em água  
 - os estes resultados são os obtidos na Programação A  
 - os cp foram curados em câmara úmida e isolados do ar  
 - os graus de compactação e a resistência a compressão simples apresentados constituem uma média de 3 determinações  
 - os graus de compactação e os desvios de umidade foram calculados tomando-se como base os dados específicos aparentes secos máximos e os valores ótimos obtidos dos ensaios de compactação realizados com 5 golpes de soquete por face do cp

#### - Programação E

Esta programação teve por objetivo servir como parâmetro de comparação. Para tanto utilizou-se como estabilizador o cimento portland comum CP-320.

A curva de compactação foi obtida para o teor de 7% de cimento conforme o método da ABCP.

Para se avaliar o ganho da resistência da mistura com o incremento do teor de cimento portland comum foram fixados:

- umidade em torno da ótima, obtidas por correspondentes ensaios de compactação;

Quadro 10: Resultados de ensaios referentes a Programação B

Cimento pozolânico	Teor de cimento pozolânico (%) em peso	Desvio de umidade em relação à ótima (%)	Grau de compactação (%)	Tempo de cura (dias)	Resistência a compressão simples (MPa)
A1-70-2	11	-2,5	100,9	2	0
			100,8	7	0,99
			100,8	28	1,42
A1-70-2	11	-1,9	100,8	2	0,41
			97,6	7	1,19
			100,8	28	1,44
A1-70-2	11	-1,5	100,1	2	0,38
			97,9	7	1,06
			100,2	28	1,38
A1-70-2	11	0,2	100,4	2	0,38
A1-70-2	11	0,5	100,1	2	1,13
			100,7	7	1,54
A1-70-2	11	1,4	97,2	2	0,42
			98,4	7	1,21
			98,2	28	1,69
A1-70-2	11	2,0	100,1	2	0,57
			100,1	7	0,99
			100,1	28	1,54
A1-70-2	11	3,2	100,8	2	0,29
			101,1	7	0,99
			101,0	28	1,75
A1-70-2	11	-2,8	97,2	2	0
			97,2	7	0,64
			97,6	28	0,75
A1-70-2	11	-1,5	97,7	2	0,43
			97,4	7	0,59
			97,9	28	0,56
A1-70-2	11	-1,0	98,3	2	0,64
			98,5	7	0,59
			98,3	28	0,66
A1-70-2	11	0,5	98,2	2	0,41
			98,3	7	0,62
			98,7	28	0,62
A1-70-2	11	1,2	97,7	2	0,42
			98,6	7	0,55
			98,4	28	0,52
A1-70-2	11	1,6	98,4	2	0,64
			98,4	7	0,56
			98,8	28	0,61
A1-70-2	11	2,9	97,3	2	0,38
			98,9	7	0,55
			97,1	28	0,59

15: - os cp se esborouhou durante a imersão em água  
 - os estes resultados são os obtidos na Programação A  
 - os cp foram curados em câmara úmida e isolados do ar  
 - os cp foram curados em câmara úmida e isolados do ar  
 - o grau de compactação e a resistência a compressão simples apresentados constituem uma média de 3 determinações

#### - Programação D

Esta programação teve por objetivo avaliar a variação da resistência à compressão quando se procede a cura dos corpos de prova ao ambiente. Para tanto foram fixados:



- número de golpes do soquete por face do corpo de prova igual a 5;
- cura em câmara úmida e isolada do ar.

Foram selecionados os teores de 4%, 7% e 10% em peso, tendo sido moldados 9 corpos de prova para cada teor de cimento e rompidos 3 para cada tempo de cura. A cura foi processada em câmara úmida, com os corpos de prova condicionados em recipientes dotados de tampa e vedados com fita adesiva, de modo a evitar perdas de umidade e a recarbonatação da cal.

No Quadro 11 apresentam-se os resultados dos ensaios de compressão simples bem como as condições de moldagem obtidas dos corpos de prova.

Quadro 10: Resultados de ensaios referentes a Programação B

Exemplo pozolânico	Teor de cimento pozolânico (C1 em peso)	Desvio de umidade em relação a ótima (%)	Gravidade de compactação (%)	Tempo de cura (dias)	Resistência à compressão simples (MPa)
A1-70-2	11	1,9	99,9	2	0
			99,2	7	0,62
			96,9	28	0,77
C1-70-1	11	-1,1	96,1	2	0
			94,7	7	0
			95,9	28	0

Notas: - o C1 ou C2 se esboçaram durante a imersão em água  
 - os C3 foram moldados aplicando-se 5 golpes do soquete por face do C1  
 - os C4 foram curados ao ar  
 - o grau de compactação e a resistência à compressão simples apresentados consistem numa média de 3 determinações

Quadro 11: Resultados de ensaios referentes a Programação E

Teor de C1-70-2 (C1 em peso)	Desvio de umidade em relação a ótima (%)	Gravidade de compactação (%)	Tempo de cura (dias)	Resistência à compressão (MPa)
4	1,0	96,4	2	0,39
		96,7	7	0,68
		96,4	28	0,80
7	0,4	96,6	2	0,81
		97,7	7	1,40
		97,8	28	2,00
10	1,0	96,6	2	0,81
		97,9	7	2,10
		96,8	28	3,05

### 5.3. Discussão dos Resultados

Para o conjunto de ensaios executados, a análise dos resultados será agrupada conforme a questão estudada:

#### a) Compactação

- Observa-se que a adição da cal e dos cimentos C1-70-1 e A1-70-2 ao solo reduz a sua massa específica aparente seca máxima, conforme Quadro 6; esta tendência está relacionada com o aumento do teor de estabilizadores e ocorre mais acentuadamente com o A1-70-2;
- Por outro lado, a adição da cal reduz a umidade ótima, verificando-se porém uma tendência inversa para os outros dois estabilizadores e mais acentuadamente para o A1-70-2;
- Em todas as misturas nota-se um achatamento das curvas de compactação quando comparadas com a do solo, inferindo-se que desvios de umidade, em relação à ótima, relativamente amplos introduzem pequenas variações do grau de compactação, para a energia considerada.

#### b) Programação A

- Observa-se que não há variação da resistência à compressão, para os corpos de prova com 2 dias de cura, qualquer que seja o teor do cimento A1-70-2. Para este estabilizador, após 7 dias nota-se uma estabilização da resistência a partir de um teor da ordem de 11% em peso, ao passo que para 28 dias, a resistência é continuamente ascendente com o incremento do estabilizador adicionado. Tal fato é indicativo de que para maiores teores de estabilizador as reações para serem completadas requerem maior tempo de cura;
- Nota-se que o teor de 5% de C1-70-1 é insuficiente para estabilizar o solo, visto que os corpos de prova sofreram esboamento quando imersos em água para o tempo de cura investigados;
- Observando-se as curvas de resistência para 7 e 28 dias de cura nota-se que aparentemente as reações se processam mais rapidamente quando se emprega o cimento C1-70-1 que o cimento A1-70-2, para os teores investigados;
- Na faixa investigada o cimento A1-70-2 apresentou melhor desempenho em termos de resistência representando 220% a mais para teores de 11% e 130% a mais para os teores de 17%, para os 28 dias de cura. É possível que elevando-se os teores de C1-70-1 possa-se atingir valores mais elevados de resistência à compressão;
- Observa-se que a estabilização com cimento portland comum apresenta os melhores resultados ao se comparar com os estabilizadores A1-70-2 e C1-70-1. Para se conseguir atingir uma resistência à compressão de 2,08 MPa aos 28 dias, obtida com 7% de cimento portland é necessário aproximadamente o dobro de cimento A1-70-2;

#### c) Programação B

- Observa-se que para o cimento A1-70-2, à excessão dos corpos de prova que sofreram esboamento (cura de 2 dias e desvio de umidade em torno de - 3%), os desvios de umidade no intervalo investigado exercem pouca influência na resistência, para cada tempo de cura;

- Verifica-se ainda uma excelente concordância com as relações obtidas na Programação A, para teor de 11%, no tocante às relações de resistência para os diferentes tempos de cura;
- Observa-se que para o cimento C1-70-1, a excessão dos corpos de prova que sofreram esboroamento (cura de 2 dias e desvio de umidade em torno de - 3%), os desvios de umidade no intervalo investigado exercem pouca influência na resistência, para cada tempo de cura;
- Para o teor de 11% em peso e para o intervalo de desvio de umidade, de - 3% a + 3%, a resistência à compressão simples praticamente independe do teor de umidades, para ambos os cimentos C1-70-1 e A1-70-2;
- Confirmam-se as conclusões da Programação A no sentido de que as reações do cimento C1-70-1 aparentemente se processam de forma mais acelerada, e que o cimento A1-70-2 tem melhor desempenho em termos de resistência, para iguais teores.

## d) Programação C

- A rigor os corpos de prova deveriam ter sido moldados nas condições de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima obtidas das curvas correspondentes à cada energia de compactação (4,5 e 10 golpes por face do corpo de prova). Tendo em vista porém que as curvas de compactação resultaram relativamente achatadas e que os desvios de umidade, em uma faixa bastante ampla, praticamente não introduziram variações nos valores de resistência, como visto na Programação B, é de se esperar que o procedimento adotado não conduziu a conclusões diferentes daquelas que seriam obtidas adotando-se o procedimento alternativo. Da mesma forma os graus de compactação e os desvios de umidade de veriam ser referidos, respectivamente, às massas específicas aparentes secas máximas e umidades ótimas correspondentes à cada energia de compactação, não se tendo procedido desta forma visando facilitar a comparação;
- Observa-se que para o cimento A1-70-2 não há ganho de resistência com o aumento de energia de compactação acima de 5 golpes de soquete por face do corpo de prova, para 2 e 7 dias de cura. Por outro lado verifica-se aos 28 dias de cura um aumento de resistência com o incremento da energia de compactação, confirmando-se assim que as reações se processam com certa intensidade mesmo após 7 dias de cura. Os ganhos de resistência com o aumento de energia de compactação tomando-se por exemplo o tempo de cura de 28 dias são da ordem de 24% e de 22% para as relações 5 golpes/4 golpes e 10 golpes/5 golpes, respectivamente. Em outras palavras, acima de 5 golpes por face do corpo de prova, o ganho de resistência com o incremento da energia de compactação é relativamente baixo, quando comparados com energias inferiores;
- Contudo, a análise dos graus de compactação obtidos após a moldagem para 4 e 5 golpes, conforme apresentado no Quadro 14 conduz a um aparente paradoxo, visto que a graus de compactação praticamente iguais correspondem resistências sensivelmente diferentes. Tal fato expli-

ca-se porém pela variação de volume dos corpos de prova durante a imersão em água, e consequente variação no volume de vazios. No tocante à expansão ou seja à variação de volume dos corpos de prova nota-se uma tendência decrescente da mesma, ou de estabilização volumétrica, com o aumento do tempo de cura. Observa-se que para o estabilizador C1-70-1, a excessão dos ensaios efetuados após 2 dias de cura, o incremento de energia confere um relativo ganho de resistência, da ordem de 40% e 63%, para 7 e 28 dias de cura, respectivamente, quando se passa de 5 para 10 golpes do soquete por face do corpo de prova. Tal tendência não foi constatada para 4 e 5 golpes em virtude de os graus de compactação, após imersão serem praticamente iguais. Nota-se ainda uma tendência de estabilização volumétrica dos corpos de prova com o aumento do tempo de cura.

- A energia de compactação exerce uma relativa influência sobre a resistência. Acima de 5 golpes de soquete por face do corpo de prova, os ganhos relativos de resistência são mais acentuados para o cimento C1-70-1, tendência que se inverte abaixo da mencionada energia.
- O grau de compactação determinado após a imersão constitui-se em um parâmetro que deve ser considerado, quando se analisam os parâmetros de resistência, em decorrência do índice de vazios provocado pela expansão dos corpos de prova, a qual por sua vez, apresenta uma tendência decrescente com o aumento do tempo de cura.
- Confirmam-se as conclusões da Programação A, no sentido de que as reações do cimento C1-70-1, aparentemente se processam de forma mais acelerada e que o cimento A1-70-2 tem melhor desempenho, em termos de resistência, para iguais teores.

## e) Programação D

- Observa-se que para o cimento A1-70-2 a resistência à compressão simples tende a se estabilizar de forma mais acelerada do que na Programação A, fato indicativo de que as reações, aliadas possivelmente a fatores inibidores como a recarbonatação e a diminuição da água de hidratação, estabilizam-se mais rapidamente ao ambiente do que em condições de cura em câmara úmida e isolada do ar. Destaque-se que os corpos de prova com cura de 2 dias sofreram esboroamento quando imersos em água, o que não aconteceu nas Programações anteriores para condições semelhantes de moldagem. Por outro lado a cura ao ambiente provocou uma queda da resistência da ordem de 50% quando, comparada com a cura em câmara úmida;
- Para o cimento C1-70-1 o esboroamento dos corpos de prova quando imersos em água, para os tempos investigados, mostra que a cura em câmara úmida, com corpos de prova isolados do ar, é de relevante importância sob o ponto de vista da estabilização do solo.

As conclusões resultantes da estabilização de solos com cimento pozolânico podem ser resumidas como se segue:

- Para os teores de cimento pozolânico investigados, o A1-70-2 apresentou desempenho sensível-

mente superior, em termos de resistência;

- Para o cimento C1-70-1 as reações aparentemente se processaram de forma mais acelerada, nos tempos de cura investigados;
- Os desvios de umidade, em relação à ótima, na faixa investigada, tiveram pouca influência na resistência à compressão simples;
- A cura em câmara úmida, com os corpos de prova isolados do ar, exerceu decisiva influência no comportamento do solo estabilizado;
- A estabilização com o cimento portland comum CP-320 apresentou os melhores resultados de resistência à compressão se comparados com o teor de cimento A1-70-2 e C1-70-1 analisados.

Para a continuidade das investigações pode-se sugerir:

- Aumentar os teores de cimento A1-70-2 e C1-70-1 nas misturas;
- Desenvolver estudo semelhante com outros solos de significativa ocorrência no Estado de São Paulo;
- Utilizar as misturas na produção de tijolos e avaliar o seu desempenho.

## 6. CONSIDERAÇÕES ECONÔMICAS

### 6.1. Metodologia

A produção de cimento pozolânico de cinza de casca de arroz e de resíduo cerâmico, além de envolver aspectos técnicos, envolve também aspectos econômicos e sociais.

Do ponto de vista social constitui-se em uma atividade geradora de empregos, na maioria de mão-de-obra não especializada, necessários tanto para a produção da cal, como para a produção da pozolana.

Este trabalho não irá quantificar o número de empregos gerados pela produção de cimento pozolânico mas pode-se supor que é várias vezes superior à mão-de-obra utilizada pela indústria do cimento portland.

Do ponto de vista econômico um aspecto já tratado anteriormente e que irá ser novamente mencionado é o relativo ao consumo de energia para a produção destes cimentos pozolânicos.

Para uma avaliação do custo do cimento pozolânico A1-70-2 e C1-70-1 inicialmente foi efetuado um levantamento das quantidades disponíveis de casca de arroz e resíduo cerâmico no Brasil e no Estado de São Paulo.

Esse levantamento teve por objetivo verificar a distribuição da ocorrência destes resíduos e a potencialidade de sua utilização.

A partir destes dados foram elaborados dois estudos de caso para cada cimento pozolânico, sendo um

no Estado de São Paulo, e outro fora do Estado, cada um deles referido à localização mais factível do empreendimento. Uma vez definida a localização, procedeu-se à estruturação do custo padrão para uma planta mínima. O custo dos insumos foi aquele praticado em março de 1986.

Para isso adotou-se um diagrama de produção com as suas operações unitárias e procedeu-se aos cálculos de custo levando-se em consideração os itens usualmente utilizados para esta análise:

- insumos básicos como resíduo e cal;
- insumos secundários como energia e transporte;
- mão-de-obra;
- capital de inversão e de giro.

### 6.2. Consumo de Energia

O consumo de energia tem sido uma das grandes preocupações no estudo dos insumos industriais devido ao seu custo e à sua escassez.

No caso dos cimentos pozolânicos A1-70-2 e C1-70-1, o parâmetro (apesar da resistência mecânica superior) é o consumo de energia na produção de cimento portland comum que varia em torno de 1200 Kcal/Kg conforme a Tabela 3.

Para estes cimentos que se utilizam de resíduos, a principal contribuição em termos de consumo de energia é devida à utilizada na produção de cal.

Apesar da grande variação de tipos de fornos para a calcinação do calcário e consequentemente na grande variação respectiva de consumo de energia, pode-se adotar um valor médio de 2000 Kcal/kg de cal produzida.

Como a participação da cal é de 30% nos cimentos A1-70-2 e C1-70-1, o consumo de energia referente à cal decresce para 600 Kcal/kg de cimento pozolânico.

O consumo de energia referente à produção de pó de resíduo cerâmico é relativamente pequeno e representa aproximadamente 50 Kcal/kg consumido basicamente na cominuição dos resíduos. Como a participação da pozolana é de 70%, em cada kg de cimento pozolânico ter-se-á consumido 35 Kcal.

Portanto o total de energia será de 635 Kcal/kg de cimento pozolânico C1-70-1 que é pouco mais da metade do consumo de cimento portland comum.

No caso do cimento pozolânico A1-70-2 este número é menor tendendo a 600 Kcal/kg pois na queima da casca de arroz não se consome energia e a cinza obtida é friável necessitando de pouca energia para ser cominuída.

### 6.3. Custo do Cimento Pozolânico

Para um estudo de caso do cimento pozolânico de cinza de casca de arroz foi escolhida uma unidade de produção de 10t/mes no Município de Ribeirão Preto

que é sede do DIRA com maior produção de arroz no Estado de São Paulo.

- resumo para uma produção de 10 ton/mês

. palha .....	Cz\$ 2.400,00
. cal .....	Cz\$ 1.600,00
. queima da casca .....	Cz\$ 1.500,00
. moagem da cinza .....	Cz\$ 3.000,00
. aluguel .....	Cz\$ 7.000,00
. despesas financeiras com capital ...	Cz\$ 330,00
. despesas financeiras com capital de giro .	Cz\$ 150,00
. subtotal .....	Cz\$ 15.980,00
. eventuais + taxas diversas (5%) ....	Cz\$ 800,00
. taxa de administração .....	Cz\$ 3.196,00
. total .....	Cz\$ 19.976,00

- custo por 50 Kg = Cz\$ 100,00

Para um estudo de caso do cimento pozolânico de resíduo cerâmico foi escolhida uma unidade de produção de 10 ton/mês no Município de Itu que representa uma grande concentração de indústrias cerâmicas.

- resumo

. resíduo cerâmico .....	Cz\$ 5.600,00
. cal .....	Cz\$ 160,00
. moagem do resíduo .....	Cz\$ 4.500,00
. aluguel .....	Cz\$ 7.000,00
. despesas financeiras com capital ...	Cz\$ 238,00
. despesas financeiras com capital de giro .	Cz\$ 182,00
. subtotal .....	Cz\$ 19.120,00
. eventuais + taxas diversas (5%) ....	Cz\$ 956,00
. taxa de administração (20%) .....	Cz\$ 3.824,00
. total .....	Cz\$ 23.900,00

- custo por 50 Kg = Cz\$ 119,50

## 7. COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

Ao longo deste estudo foram apresentadas diversas constatações principalmente nos itens referentes à discussão dos resultados.

Ao final do trabalho é oportuno reapresentá-las contextualizando as constatações de tal forma a situá-las numa problemática mais geral.

Desta forma lista-se a seguir as principais constatações:

a) Os cimentos pozolânicos de cinza de casca de arroz e de resíduo cerâmico podem ser obtidos com relativa facilidade a partir de uma mistura de cal hidratada de boa qualidade e de cinza de casca de arroz ou de pó de resíduo cerâmico. Para a sua obtenção são necessários equipamentos disponíveis no mercado ou que possam ser fabricados com material de baixo custo. A mão-de-obra empregada não necessita de especialização sendo porém recomendado um treinamento específico.

b) A obtenção dos cimentos pozolânicos estudados consome praticamente a metade do consumo de energia empregado na produção do cimento portland comum. Este fato é importante na medida em que se procura racionalizar a utilização de energéticos nas sociedades industrializadas.

c) Observa-se porém sérios inconvenientes na queima da casca de arroz: primeiro, a baixa capacidade de produção do equipamento estudado e em segundo, a geração, na combustão, de fumaça que pode ser considerada como poluente.

d) Apesar disso, se comparado o poder calorífico da casca de arroz com outros materiais tais como o alcool, carvão, madeira ou gasolina, conclui-se que o mesmo é inferior a todos eles mas é aproximado ao da madeira. Este fato faz com que a casca de arroz possa ser caracterizada como material energético e desta forma possa ser utilizada como combustível.

e) Em termos de disponibilidade no Estado de São Paulo, a cinza representa praticamente 2,5% do exatente de resíduo cerâmico. Para o Brasil este número se eleva para 20% o que é um indicativo da importância relativa destes resíduos. Se por hipótese 50% da casca de arroz do Brasil fosse transformada em cinza, este resíduo seria suficiente para produzir 15% do total de cimento portland produzido em 1985, no Brasil. E este número se eleva para 80% quando se raciocina com o resíduo cerâmico. Somando-se a cinza com o resíduo cerâmico poder-se-ia produzir a mesma quantidade de cimento portland pozolânico produzido em 1985. Com estes números pode-se afirmar simplificada e que a disponibilidade dos resíduos estudados é grande e tem uma importância significativa.

f) O custo dos cimentos pozolânicos estudados é praticamente o dobro do preço do cimento portland comum, na data de março de 1986, que era de Cz\$ 51,00. O custo do cimento pozolânico pode chegar ao preço do cimento portland comum se não forem computados custos de mão-de-obra, de aluguel do edifício e de taxa de administração, o que pode ocorrer eventualmente em uma produção informal. Estes dados demonstram que o custo dos cimentos estudados é maior que o do cimento portland comum, considerando-se o Brasil que produz cimento portland em quantidade compatível com as suas necessidades.

g) O cimento pozolânico de casca de arroz que apresenta os melhores resultados é aquele obtido através da mistura com a cal cálcica e em contrapartida o cimento pozolânico de resíduo cerâmico que apresenta os melhores resultados é aquele obtido com a cal dolomítica; em ambos os casos a melhor proporção da mistura é de 30% de cal para 70% de pozolana, ou seja, aproximadamente 1/3 de cal para 2/3 de pozolana;

h) O cimento pozolânico de casca de arroz apresentou melhores características de resistência mecânica que o cimento pozolânico de resíduo cerâmico;

i) Apesar dos cimentos pozolânicos não atenderem a normalização existente para cimentos portland pozolânicos e para cimentos de alvenaria, não se pode descartar a sua utilização em argamassas de assentamento e de revestimento;

j) O cimento pozolânico de casca de arroz e de resíduo cerâmico na estabilização do solo estudado apresenta desempenho inferior que o cimento portland comum CP-320);

k) Ao se considerar os aspectos econômicos, confirma-se que os cimentos pozolânicos de cinza de casca de arroz e de resíduo cerâmico desenvolvidos para este trabalho apresentam desempenho inferior ao



cimento portland comum na estabilização do solo estudado;

l) A resistência mecânica do solo estabilizado foi acompanhada durante um período de no máximo 28 dias tendo em vista o horizonte aceitável de aplicação e utilização deste material. Entende-se porém que outros estudos devam ser feitos para períodos de observação mais dilatados tendo em vista a velocidade das reações pozolânicas que ocorrem nos materiais consorciados na estabilização com cimento pozolânico.

m) Para os teores de cimento pozolânico investigados, o de cinza de casca de arroz, A1-70-2 apresentou desempenho sensivelmente superior, ao de resíduo cerâmico C1-70-1, em termos de resistência mecânica, para a estabilização do solo estudado;

n) Para ambos os cimentos pozolânicos os desvios de umidade, em relação à ótima, na compactação tiveram pouca influência na resistência à compressão; este fato se traduz em uma facilidade da definição do teor de água na estabilização do solo em termos de obra;

o) A cura em câmara úmida com os corpos de prova isolados ao ar, exerceu decisiva influência na resistência à compressão simples sendo que a cura ao ambiente provocou uma queda de resistência da ordem de 50% quando comparada com a cura em câmara úmida; esta constatação aponta para a necessidade de se diminuir o contacto com o ar das misturas solo/cimento pozolânico, o que evidentemente dificulta a execução da estabilização do solo;

p) A energia de compactação exerce uma relativa influência sobre a resistência mecânica. Acima de 5 golpes de soquete por face do corpo de prova, os ganhos relativos de resistência, para o tempo de cura observado, são mais acentuados para o cimento C1-70-1, tendência que se inverte abaixo da mencionada energia.

q) Finalmente deve-se alertar para o fato que este estudo aponta algumas direções que só serão efetivamente entendidas como alternativas tecnológicas na medida em que outros estudos de aplicação dos cimentos pozolânicos de cinza de casca de arroz e de resíduo cerâmico e de estabilização de solos com estes cimentos forem sendo efetuados. Pode-se apontar para os estudos de argamassa e de componentes para alvenaria, além de outros elementos das edificações.

## 8. BIBLIOGRAFIA

- ABIKO, Alex Kenya - Tecnologias Apropriadas: Tijolos e paredes monolíticas de solo-cimento. Dissertação de mestrado. São paulo, EPUSP, 1980.
- VITRUVIUS - Les dix livres d'architecture (avec les notes de Perrault). Paris, Editores E. Tardieu, A. Coussin, 1837.
- BRASIL. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS Cimento Portland Pozolânico. Rio de Janeiro, ABNT, 1985. (NBR 5736/EB-758).
- MASSAZZA, F. - Chimica delle agiunte pozzolaniche e dei cementi di miscela. II cemento, 73 (1), 3, 1976.

- KIHARA, Y. & SHUKUZAWA, J. - Contribuição ao estudo de pozolanas no Brasil. Revista Cerâmica. São Paulo, 28 (145), 1982.
- MASSAZZA, F. & COSTA, U. - Aspetti dell'attività pozzolanica e proprietà dei cementi pozzolanici. II cemento. (1), 3, 1979.
- DAVIS, R. E. - A review of pozzolanic materials and their use in concrete. Symposium on pozzolanic materials in mortars and concretes, ASTM Special Technical Publication. Philadelphia, nº 99.
- SPENCE, R. J. S. - Alternative cements in India. London, Intermediate Technology Development Group, 1976.
- REHSI, S. S. - Pozzolana Based Binders. Appropriate Technology. London, vol. 5, nº 4, fev. 1979.
- MEHTA, P. K. - Properties of cements made from rice husk ash. (draft copy).
- COOK, D. J. - Using rice husk for making cement-like materials. Appropriate technology. vol. 6, nº 4, feb. 1980.
- MEHTA, P. K. - Standard specification for mineral admixtures, an overview. Proceedings of the second conference of fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete. Detroit, ACI, 1986.
- MASSAZZA, F. - General report of theme IV, Structure of pozzolana and fly-ash and the hidratation of pozzolanic and fly ash cements. Proceedings of the 7th International Congress of the Chemistry of Cement. Paris, 1980.
- CINCOTTO, M. A. & MARQUES, J. C. & HELENE, P. R. L. Propriedade das argamassas cimento: cal: areia. IBRACON. São Paulo, 1985.
- DAVIDSON, D. I. & HANDY, R. L. - Lime and lime-pozzolan stabilization. Highway Engineering Handbook. McGraw Hill Book Company Inc., 1960.
- INGLES, O. G. & METCALF, J. B. - Soil Stabilization Butterworths - Melbourne, 1972.
- PUTILIN, E. I. - Estabilização de solos com cimento pozolânico. Avtomobil'nye Dorogi. nº 8, 1975.
- PINTO, C. S. - Equipamento reduzido para moldagem de corpos de prova de solo-aditivo. IV Reunião anual de pavimentação. Rio de Janeiro, 1965.



---

BOLETIM TÉCNICO - textos publicados  
Technical Bulletin - Issued Papers

---

- |  |  |
|--|--|
| BT 01/86 - Ação do incêndio sobre as estruturas de concreto armado<br><i>The effect of fire on reinforced concrete structures</i>  | FRANCISCO R. LANDI                           |
| BT 02/86 - Argamassas de assentamento para paredes de alvenaria resistente<br><i>Masonry mortar for structural brickwork</i>   | FERNANDO H. SABBATINI                        |
| BT 03/86 - Controle de Qualidade do Concreto<br><i>Quality control of the concrete</i>   | PAULO R.L. HELENE                            |
| BT 04/86 - Fibras vegetais para construção civil-fibra de coco<br><i>Vegetable fibres for building - coir fibres</i>   | HOLMER SAVASTANO JR.                         |
| BT 05/86 - As Obras públicas de engenharia e a sua função na estruturação da cidade de São Paulo<br><i>The public works of civil engineering and its function on structuring the city of São Paulo</i> | WITOLD ZMITROWICZ                            |
| BT 06/86 - Patologia das construções. Procedimentos para diagnóstico e recuperação<br><i>Building pathology. Diagnosis and recovering procedures</i>   | NORBERTO B. LICHTENSTEIN                     |
| BT 07/87 - Medidas preventivas de controle da temperatura que induz fissuração no concreto massa<br><i>Preventive measurements to control the temperature wich produces cracking in mass concrete</i>  | GEORGE INOUE                                 |
| BT 08/87 - O computador e o projeto do edifício<br><i>The computer and the building design</i>   | FRANCISCO F. CARDOSO                         |
| BT 09/87 - Porosidade do Concreto<br><i>Concrete Porosity</i>  | VICENTE C. CAMPITELI                         |
| BT 10/87 - Concretos Celulares Espumosos<br><i>Lightweight Concrete: Foam Concrete</i>   | OSWALDO A. ROCHA FERREIRA                    |
| BT 11/87 - Sistemas Prediais de Distribuição de Água Fria<br>Determinação das Vazões de Projeto<br><i>Building Cold Water Supply Systems - Design Flowrates Determination</i>                          | MOACYR E.A. DA GRAMA<br>ORESTES M. GONÇALVES |
| BT 12/87 - Estabilização de Solos com Cimentos Pozolânicos<br><i>Soil Stabilization with Pozzolanic Cements</i>  | ALEX KENYA ABIKO                             |

---

BOLETIM ESPECIAL - Textos publicados  
Special Bulletin - Issued Papers

---

BE 01/87 - Carta de Brasília

J.C. FIGUEIREDO FERREAZ





