

**3 CIMENTO PRODUZIDO A PARTIR DA CINZA DA CASCA DE  
ARROZ**

**Autor: PROF. DR. WESLEY JORGE FREIRE**

## I - INTRODUÇÃO

Uma das práticas agrícolas mais comuns para a disposição final de resíduos agrícolas vegetais é a sua queima a céu aberto. Muito embora haja algumas vantagens associadas ao processo, como o baixo custo operacional, a redução de grandes volumes de matéria vegetal a volumes insignificantes de cinza que mais facilmente pode ser incorporada ao solo, o efeito sanitário acarretado pela destruição de insetos e ervas daninhas, etc, a queima de resíduos vegetais a céu aberto provoca graves danos ambientais.

Além do mais, a energia dissipada na queima a céu aberto não pode ser recuperada, somado ao fato de que a combustão a céu aberto da maioria dos resíduos agrícolas produz cinza de baixa qualidade, não indicada para fins de adubação mineral.

Tanto a palha como a casca do arroz são resíduos vegetais impróprios para fins de alimentação animal dado o seu baixo teor de proteína digerível. Além do mais, seus elevados teores de cinza e de lignina não as recomendam como matéria prima nas indústrias celulósicas.

Ambas, palha e casca de arroz, têm composição química semelhante, contendo de 40-45% de celulose, de 25-30% de lignina, de 15-20% de cinza e de 8-15% de umidade.

O volume de palha de arroz produzido varia em função da produtividade, práticas de manejo, variedade empregada, etc, tendo MEHTA e PITT (1976) relatado que a quantidade de palha deixada no campo representa várias vezes a quantidade de arroz colhido.

Seu aproveitamento resvala em dificuldades relacionadas com a coleta, transporte e armazenamento do material volumoso.

A casca de arroz, por sua vez, representa 20% em peso do arroz bruto colhido, apresentando uma massa específica aparente de 95 a 150 kg/m<sup>3</sup> e um poder calorífico de 3.800 Kcal/kg, sendo que, após a combustão completa, resulta um resíduo inorgânico altamente silicoso, como são apresentados no Quadros 3.1 e 3.2.

Suas características de abrasão, baixo valor nutritivo, peso específico reduzido e teor elevado de cinza, limitam sua utilização em grande escala. Mesmo assim, a casca de arroz tem sido empregada como cama de galinheiro, condicionador de solo mediante incorporação direta, veículo de pesticidas, produtos refratários (obtidos pela sinterização de uma mistura contendo 95% de cinza de casca de arroz e 5% de cal virgem), etc.

QUADRO 3.1 - Análise final da casca de arroz, % em peso (CIMENTO: Produção doméstica - 1987).

|            |           |
|------------|-----------|
| Carbono    | 38-42     |
| Hidrogênio | 4,9-5,3   |
| Oxigênio   | 30-32     |
| Nitrogênio | 0,3-2,2   |
| Enxofre    | 0,07-0,12 |
| Água       | 10,0      |
| Cinza      | 16-25     |

Para fins de cálculos aproximados, a análise da casca de arroz pode ser tomada como:

|                  |             |
|------------------|-------------|
| Água             | 10% em peso |
| Material volátil | 50% em peso |
| Carbono          | 20% em peso |
| Cinza            | 20% em peso |

As proporções em peso são:

|                            |
|----------------------------|
| Arroz bruto: 100           |
| Casca de arroz: 20         |
| Cinza de casca de arroz: 4 |

QUADRO 3.2 - Composição química da cinza de casca de arroz, % em peso, base seca (CIMENTO: Produção doméstica - 1987).

| Constituinte                   | Porcentagem |
|--------------------------------|-------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 91-97       |
| K <sub>2</sub> O               | 0,6-2,5     |
| Na <sub>2</sub> O              | 1,75        |
| CaO                            | 0,2-1,5     |
| MgO                            | 0,1-2,0     |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,5         |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,2-2,85    |
| SO <sub>3</sub>                | 0,1-1,15    |
| Cl                             | 0,4         |

A grande demanda por habitações e, em alguns casos, a escassez de materiais tradicionais de construção têm levado os países em desenvolvimento a buscarem novas alternativas, especialmente aquelas voltadas para o aproveitamento dos recursos naturais locais, vantajosos não apenas por causa do aumento da atividade industrial mas, principalmente, por causa da redução do volume de matérias-primas importadas.

O Brasil, nono produtor mundial de arroz, registrou, em 1993, conforme estimativas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (1995), uma produção de aproximadamente 10,1 milhões de toneladas de arroz em casca, contra uma produção mundial de 518,8 milhões de toneladas. Isto quer dizer que há uma hipotética disponibilidade de 2,02 milhões de toneladas de casca de arroz que pode resultar em 404 mil toneladas de cinzas passíveis de aproveitamento para a produção de cimento hidráulico. Esta enorme quantidade de cinzas é descartada e lançada em aterros, ao longo de estradas vicinais ou mesmo, clandestinamente, nos rios.

Ao se utilizar a cinza de casca de arroz como material pozolânico, contribui-se para a despoluição do meio ambiente, acarretando, além disso, benefícios técnicos, econômicos, energéticos e ecológicos.

Pozolanas ou materiais pozolânicos são materiais silicosos ou sílico-aluminosos que, por si só, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante; porém, quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades cimentíceas. A importância da pozolana, segundo PETRUCCI (1980), está relacionada com a sua capacidade de fixar a cal, parte solúvel e perigosa dos cimentos, sob uma forma insolúvel, para impedi-la de reagir ou dissolver-se.

As pozolanas podem ser naturais (pozolanas de origem vulcânica e pozolanas de origem sedimentar) ou artificiais (cinzas volantes, argilas e folhelhos calcinados, resíduos industriais e agroindustriais).

ABIKO (1987) afirmou que as pozolanas apresentam algumas vantagens sobre o cimento Portland comum, enumerando entre elas o menor consumo energético, a possibilidade de produção em menor escala, a atenuação da ocorrência de fissuras, além do possível aumento da durabilidade e trabalhabilidade de concretos.

As pozolanas são ativadas geralmente com cal em proporções adequadas, dando origem ao cimento pozolânico, ou com clínquer Portland, resultando no cimento Portland pozolânico.

O cimento pozolânico é conhecido desde a antiguidade, quando gregos e romanos passaram a adicionar terras e cinzas vulcânicas às já empregadas argamassas de cal e areia com o objetivo de melhorar sua durabilidade.

Os cimentos Portland pozolânicos são de origem mais recente, uma vez que o cimento Portland somente foi inventado em 1824. ABIKO (1987) relacionou algumas vantagens que o cimento Portland pozolânico apresenta sobre o cimento Portland comum, a saber: desprende menor quantidade de calor durante a hidratação, reduzindo a ocorrência de fissuras, principalmente em concreto massa; aumenta a durabilidade do concreto pois, ao fixar a cal, a pozolana a impede de reagir com sulfatos e assim formar a etringita cujos efeitos expansivos podem desagregar o concreto; aumenta a trabalhabilidade do concreto através do aumento da plasticidade e diminuição da tendência à desagregação. Como desvantagens, o autor cita a menor velocidade de suas reações de hidratação que fazem com que o incremento de sua resistência mecânica seja mais lento, e a menor relação água/cimento que pode levar a menores valores de resistência mecânica.

A capacidade que as pozolanas têm de reagir com hidróxido de sódio, à temperatura ambiente e em mistura com cal e água, formando compostos estáveis dotados de poder aglomerante (como silicatos e aluminatos de cálcio), é chamada de atividade pozolânica, atividade esta que depende da porcentagem de sílica e de alumina e da superfície específica das pozolanas.

Os silicatos conferem resistência mecânica às pozolanas, sendo desejável que elas tenham no mínimo 40% de  $\text{SiO}_2$  e até 30% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e teores mínimos de  $\text{CaO}$  e  $\text{MgO}$ .

A atividade pozolânica de um material pode ser determinada de várias maneiras, sendo que a mais satisfatória talvez seja a avaliação através da resistência mecânica, até

mesmo porque a análise química não é suficiente para tal fim, embora seja útil no controle qualitativo das pozolanas.

MALQUORI, citado por COOK *et al.* (1977), relatou que a atividade pozolânica de qualquer material contendo sílica reativa pode ser determinada adicionando-se óxido de cálcio à pozolana com água isenta de dióxido de carbono e medindo-se a alcalinidade total e o teor de óxido de cálcio após um determinado tempo de reação. Determinada desta forma, a cinza de casca de arroz pode ser classificada como material de características pozolânicas, observando o autor que pozolanas contendo alta proporção de sílica, em combinação com a cal produzem materiais de baixa resistência mecânica, problema este que pode ser contornado pela adição de alumina reativa.

A determinação da atividade pozolânica de um material está normatizada pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), em sua norma NBR-05751/92 (Materiais pozolânicos: determinação de atividade pozolânica é índice de atividade pozolânica com cal); neste teste de pozolanicidade, a atividade pozolânica é relacionada com a resistência à compressão de corpos de prova moldados com a pozolana em questão, hidróxido de cálcio e areia normal.

ISAIA (1996) relatou trabalho por ele desenvolvido no qual avaliou o desempenho de misturas de cinza volante com cinza de casca de arroz e microssílica, expressando-o através de fatores de desempenho dimensional, fatores de desempenho à porosidade, fatores de desempenho à corrosão e um fator de desempenho global (média aritmética dos anteriores).

Outras cinzas resultantes de atividades industriais e agro-industriais vêm sendo estudadas por apresentarem variadas porcentagens de sílica e de outros óxidos, tais como as cinzas de eucalipto, de bagaço de cana-de-açúcar, de folhas de gramíneas, etc, porém, a cinza de casca de arroz é aquela que tem se destacado por apresentar excelentes propriedades pozolânicas quando obtida através de processos controlados de temperatura e tempo de queima, sendo por esse motivo considerada por alguns pesquisadores como “super-pozolana”.

## **II - CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DA CINZA DE CASCA DE ARROZ**

Sub-produto das indústrias beneficiadoras de arroz, a cinza da casca de arroz proveniente da queima da casca de arroz apresenta formato angular e estrutura celular, possui superfície específica variável de 50 a 100 m<sup>2</sup>/g e diâmetro médio de 45 µm, caracterizando-se, ainda, por sua alta porosidade e conteúdo de sílica variável entre 90 e 95%.

A queima da casca de arroz pode ser feita em fornalhas, a céu aberto ou em fornos especiais à temperatura controlada, observando-se que, independentemente do tipo de queima ao qual foi submetido a casca, não há grande diferença entre os resultados analíticos obtidos em cinzas de diferentes procedências.

Segundo a literatura, as diferenças aparecem ao se analisar a forma da sílica encontrada nas cinzas obtidas em diferentes temperaturas de queima, uma vez que sua estrutura é afetada pela temperatura e tempo de queima da casca de arroz.

A queima da casca de arroz sob temperaturas elevadas (acima de 850° C) resulta no aparecimento de formas cristalinas de sílica, tais como a tridimita e a cristobalita

(PRUDÊNCIO e SANTOS, 1996), menos reativas e consideradas prejudiciais à saúde humana. À temperaturas menores (400 a 850° C), a sílica contida na cinza apresenta-se no estado amorfo, sendo dotada de alta porosidade interna e grande atividade pozolânica, não apresentando risco algum à saúde.

A presença de sílica no estado amorfo ou cristalino é detectada por difração de raios-X, sendo que, no difratograma, a intensa quantidade de picos reflete a presença de partículas cristalinas de sílica, principalmente quartzo e cristobalita.

Embora o controle da temperatura de queima permita controlar, também, o teor de sílica amorfa e, conseqüentemente, a atividade pozolânica da cinza de casca de arroz, o tempo de queima é um fator relevante, devendo ser estabelecido para cada caso no momento de seu desenvolvimento (PRUDÊNCIO e SANTOS, 1996).

MEHTA e PITT (1976) afirmaram que pós de formas amorfas de sílica de grande superfície específica são mais reativos que materiais contendo formas cristalinas de sílica. A sílica contida na cinza da casca de arroz obtida pela queima a céu aberto, sem controle de temperatura, encontra-se geralmente numa forma cristalina relativamente inativa. Isto não acontece quando a queima ocorre sob condições de temperatura controlada; neste caso, a sílica, presente na cinza, encontra-se livre de sua forma cristalina (tal como o quartzo), o que lhe garante excepcional reatividade.

Todavia, a queima a temperaturas inferiores a 300° C pode levar à obtenção de cinzas contendo quantidades apreciáveis de carbono, de efeito comprovadamente adverso sobre suas características pozolânicas.

A este respeito, AL-KHALAF e YOUSIFT (1984) afirmaram que a queima da casca de arroz a temperaturas de 850° C e superiores promove o desenvolvimento de fases cristalinas de sílica, pouco reativas. Portanto, recomendam os autores que, para a permanência da sílica na forma amorfa, altamente reativa, é necessário que a queima se processe a temperaturas entre 450 a 700° C, durante 3 a 4 horas.

Queimada em condições controladas, a casca de arroz produz uma cinza escura altamente reativa que, misturada com cal, resulta num cimento escuro estruturalmente tão bom quanto o cimento Portland. Por outro lado, em mistura com o cimento Portland, a cinza de casca de arroz resulta num material cimentante que, por sua vez, permite a obtenção de argamassas e concretos de elevada resistência.

Pesquisas mais recentes têm mostrado que a cinza queimada a céu aberto apresenta pozolanidade semelhante à daquela queimada com temperatura controlada. Concretos elaborados com cimento pozolânico à base de cinza de casca de arroz obtida sem controle de temperatura mostraram bons resultados quando submetidos a ensaios de qualidade (ISAIA, 1996). Todavia, o Comitê 73-SBC do RILEM estabeleceu duas categorias distintas para a cinza de casca de arroz: (1) cinza obtida com controle de temperatura, altamente pozolânica; (2) cinza obtida pela queima a céu aberto, sem controle de temperatura, com pequena quantidade de componente não cristalino.

Vários aspectos têm sido evidenciados nas pesquisas com cinzas de casca de arroz, tais como a forma de obtenção da cinza (temperatura e tempo de queima da casca de arroz), seu beneficiamento (grau de moagem), suas características físico-químicas, seu desempenho quando misturada com outros materiais pozolânicos (cinzas volantes), a resistência e durabilidade de argamassas e concretos confeccionados com tal cinza, o tipo de queimador mais adequado, etc.

A composição química típica da cinza de casca de arroz e algumas de suas propriedades físicas estão apresentadas no Quadro 3.3.

QUADRO 3.3 - Composição química e propriedades físicas da cinza de casca de arroz (COOK *et al.*, 1977).

| Constituinte                   | Porcentagem               |
|--------------------------------|---------------------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 92,995                    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,592                     |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,152                     |
| CaO                            | 0,432                     |
| MgO                            | 0,415                     |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,037                     |
| K <sub>2</sub> O               | 2,190                     |
| Perda ao fogo                  | 2,932                     |
| Finura Blaine                  | 12.500 cm <sup>2</sup> /g |
| Massa específica               | 2,36 g/cm <sup>3</sup>    |

### III - CIMENTO POZOLÂNICO PRODUZIDO A PARTIR DE MISTURAS DE CINZA DE CASCA DE ARROZ E CAL

Bons cimentos hidráulicos podem ser obtidos pela simples mistura em quantidades adequadas de cinza de casca de arroz, previamente moída, e cal hidratada, ou pela moagem conjunta da cinza com o material calcário, quer seja cal dolomítica, quer seja cal cálcica.

Trabalhando com cinzas de casca de arroz coletadas nas fornalhas de usinas de beneficiamento de arroz em Santa Catarina, sem qualquer controle de temperatura de queima, GUEDERT *et al.* (1989) trituraram amostras de cinzas, em moinho de bolas, durante 2 e 8 horas, submetendo-as, posteriormente, a ensaios de permeabilidade ao ar e pozolanicidade. Corpos-de-prova foram então moldados com teores gravimétricos de 40, 50, 60 e 70% de cinza, em relação ao peso da cal, adotando-se uma relação água/aglomerante igual a 0,55 e traço 1:3 para a argamassa de cal/cinza:areia. Após a aplicação de ensaios de compressão simples, concluíram os autores que cimentos pozolânicos de cal/cinza desenvolvem resistências atribuídas a propriedades pozolânicas predominantemente após os 7 dias de idade. Cinzas com maior superfície específica conferem maiores resistências às argamassas de cal/cinza:areia, aos 28 e 60 dias. A melhor proporção cal/cinza, ou seja, a que levou a maior resistência à compressão simples aos 28 dias, foi aquela que compreendeu 60% de cinza e 40% de cal, independentemente do tempo de moagem pesquisado.

Buscando a obtenção de um cimento pozolânico de boa qualidade, ABIKO (1987) utilizou cales dolomítica e cálcica em mistura com cinza de casca de arroz à razão de 60, 70 ou 80% em massa da cinza, e com essa mistura moldou corpos-de-prova que, após cura em câmara úmida e temperatura ambiente, foram rompidos à compressão simples. Segundo o autor, a mistura que apresentou melhores resultados foi aquela que continha 70% de cinza de casca de arroz e 30% de cal cálcica, apresentando valores de resistência

à compressão da ordem de 5,2 MPa aos 28 dias e 5,6 MPa aos 90 dias. A cinza utilizada foi obtida pela queima da casca de arroz em forno experimental, à temperatura de 500° C, ligeiramente moída em moinho de bolas e caracterizando-se por apresentar massa específica igual a 2,45 g/cm<sup>3</sup> e superfície específica Blaine de 12.210 cm<sup>2</sup>/g. Os resultados de resistência à compressão obtidos com cimento pozolânico de cinza de

casca de arroz e cal cálcica são sempre melhores do que aqueles referentes ao cimento pozolânico obtido através da mistura com cal dolomítica, para todas as proporções cinza/cal ensaiadas.

A relação água/cimento necessária para a confecção de argamassas de consistência normal decresce com o acréscimo no grau de finura do cimento pozolânico de cinza de casca de arroz. Para AL-KHALAF e YOUSIFT (1984), isto se deve à maior ação lubrificante das pastas de cimento de cinza de casca de arroz nas argamassas, bem como ao acréscimo na coesão das misturas à medida que a finura do cimento pozolânico aumenta.

Suas características de resistência estão expressas no Quadro 3.4. Se comparados com os cimentos obtidos pela mistura de cinza de casca de arroz com cimento Portland, os cimentos pozolânicos de cinza de casca de arroz e cal são menos resistentes, uma das causas sendo o elevado valor da relação água/cimento; em geral, são cimentos de pega rápida.

QUADRO 3.4 - Resistência à compressão de argamassas de cimento de cinza de casca de arroz e cal (MEHTA, 1977).

| Composição              | do cimento             | Método de processamento | Resistência à compressão (MPa) |        |        |         |
|-------------------------|------------------------|-------------------------|--------------------------------|--------|--------|---------|
|                         |                        |                         | a/c (*)                        | 3 dias | 7 dias | 28 dias |
| CaO/Ca(OH) <sub>2</sub> | Cinza:cal<br>(em peso) | Mistura-Moagem conjunta |                                |        |        |         |
| CaO                     | 80:20                  | Moagem conjunta         | 0,50                           | 10,6   | 24,7   | 36,1    |
| CaO                     | 70:30                  | Moagem conjunta         | 0,65                           | 4,9    | 14,4   | 25,2    |
| CaO                     | 70:30                  | Mistura                 | 0,70                           | 2,5    | 8,5    | 15,3    |
| Ca (OH) <sub>2</sub>    | 75:25                  | Moagem conjunta         | 0,50                           | 7,7    | 20,0   | 29,3    |
| Ca (OH) <sub>2</sub>    | 70:30                  | Moagem conjunta         | 0,57                           | 4,6    | 16,9   | 25,0    |
| Ca (OH) <sub>2</sub>    | 70:30                  | Mistura                 | 0,77                           | 3,6    | 13,0   | 20,4    |

(\*) a/c = relação água/cimento

Mesmo assim, MEHTA (1977) concluiu que tais cimentos são adequados para trabalhos gerais em alvenaria, uma vez que a norma ASTM C 91 exige a resistência mínima de 3,5 MPa, ao 7º dia, e 6,3 MPa ao 28º dia. Para fins estruturais, a norma ASTM C 150 exige resistência mínima de 12,6 MPa ao 3º dia e 19,6 MPa ao 7º dia. Dentro dessas exigências, pode-se constatar facilmente que os cimentos pozolânicos de cinza de casca de arroz e cal, em moagem conjunta ou em mistura de cinza com CaO ou cinza com Ca (OH)<sub>2</sub>, apresentam características de resistência muito próximas daquelas dos cimentos Portland comuns.

#### IV - CIMENTO POZOLÂNICO PRODUZIDO A PARTIR DE MISTURAS DE CINZA DE CASCA DE ARROZ E CIMENTO PORTLAND

No processo de fabricação do cimento Portland, tanto o silicato tricálcico como o silicato dicálcico, responsáveis pela aquisição de resistência mecânica ou endurecimento do cimento, começam a se formar somente após a degradação estrutural dos materiais que contêm sílica, ou seja, somente após a sílica tornar-se altamente reativa, o que ocorre mediante tratamento térmico a temperaturas elevadas (1400 a 1600° C). Desde que a

sílica da cinza de casca de arroz já se encontra naturalmente numa forma muito reativa, MEHTA e PITT (1976) concluíram que é possível, então, a obtenção de um cimento hidráulico de boa qualidade simplesmente misturando-se ou moendo conjuntamente cinza de casca de arroz com cal virgem ou cimento Portland, tal como pode ser observado no Quadro 3.5.

QUADRO 3.5 - Resistência de cimentos hidráulicos produzidos a partir de cinza de casca de arroz (MEHTA e PITT, 1976).

| Cimento<br>nº | Proporção dos constituintes<br>(% em peso) |                     |               | Resistência à compressão<br>(MPa) |        |         |
|---------------|--|---------------------|---------------|-----------------------------------|--------|---------|
|               | Cinza de casca<br>de arroz                 | Cimento<br>Portland | Cal<br>Virgem | 3 dias                            | 7 dias | 28 dias |
| 1             | 80   | 0                   | 20            | 10,5                              | 24,5   | 35,9    |
| 2             | 70   | 30                  | 0             | 24,7                              | 36,5   | 44,0    |
| 3             | 50   | 50                  | 0             | 26,9                              | 40,2   | 59,2    |
| 4             | 30   | 70                  | 0             | 32,8                              | 46,8   | 60,4    |
| 5             | 20   | 80                  | 0             | 28,7                              | 46,8   | 61,3    |
| 6             | 0  | 100                 | 0             | 23,0                              | 33,5   | 43,6    |

Os cimentos pozolânicos de cinza de casca de arroz possuem características próprias como, por exemplo, a cor escura, adequada para fins arquitetônicos e para a obtenção de um concreto escuro, dispensando-se o uso de quaisquer pigmentos; a permanência da cor, todavia, não é duradoura, por causa da ação descorante do  $\text{Ca(OH)}_2$ . Por outro lado, quando o cimento de cinza de casca de arroz for utilizado como agente de pigmentação do cimento Portland, argamassas e concretos obtidos com tal mistura de cimentos apresentam cor escura permanente.

MEHTA e PITT (1976) observaram que a cinza de casca de arroz é um material silicoso excepcionalmente reativo que não pode ser tratado como uma pozolana comum, e fundamentam sua observação no fato de que misturas de cimento Portland com quantidades variáveis de 20 a 40% de uma determinada pozolana comum, em relação ao peso do cimento, refletem seus efeitos benéficos sobre a resistência do concreto apenas tardiamente, sendo que as resistências verificadas aos 3 e 7 dias são invariavelmente menores do que aquelas obtidas com corpos de prova de cimento Portland apenas. Não é isso o que acontece com os cimentos pozolânicos de cinza de casca de arroz em mistura com cimento Portland, quando resistências à compressão de concretos e argamassas feitos com tais cimentos são notavelmente mais elevadas aos 3, 7 e 28 dias, em comparação com a testemunha.

Todavia, autores como AL-KHALAF e YOUSIFT (1984) classificaram o cimento de cinza de casca de arroz como pozolana artificial de material silicoso, concluindo, ainda, que a atividade pozolânica aumenta proporcionalmente com a superfície específica do cimento. A mínima atividade pozolânica do cimento de cinza de casca de arroz, exigida pelas normas da ASTM (American Society for Testing Materials), é obtida quando a superfície específica do cimento alternativo for igual a aproximadamente  $11.500 \text{ cm}^2/\text{g}$ ; superfícies específicas ao redor de  $21.000 \text{ cm}^2/\text{g}$  conferem ao cimento alternativo alta atividade.

A viabilidade da cinza de casca de arroz como adição mineral foi pesquisada por SILVEIRA *et al.* (1996) que constataram um decréscimo da superfície específica das cinzas de casca de arroz com o aumento da temperatura de queima da casca, de  $700$  para  $1100^\circ \text{ C}$ . Para a mesma temperatura de queima, a superfície específica cresceu com o aumento do tempo de moagem, de 1,5 para 3,0 h. Observaram também as autoras que, queimada a  $700^\circ \text{ C}$ , a sílica presente na cinza de casca de arroz apresentava estrutura basicamente amorfa; queimada a  $1100^\circ \text{ C}$ , a estrutura da sílica passava a ser cristalina. O índice de atividade pozolânica do cimento Portland pozolânico com cinza de casca de arroz foi também determinado por SILVEIRA *et al.* (1996) concluindo as autoras que houve um aumento no índice de atividade pozolânica com a diminuição da temperatura de queima da casca de arroz e o aumento do tempo de moagem das cinzas.

O Instituto Asiático de Tecnologia já há algum tempo vem pesquisando as propriedades pozolânicas da cinza de casca de arroz obtida através da queima controlada a temperaturas variáveis de  $450\text{-}500^\circ \text{ C}$ . O cimento pozolânico confeccionado com tal cinza, para as condições tailandesas, chegou a ser produzido a um custo equivalente a 32% do custo de produção do cimento Portland comum.

A resistência à compressão simples de misturas de cimento de cinza de casca de arroz parcialmente substituindo o cimento Portland em argamassas de cimento e areia está apresentada nos Quadros 3.6 e 3.7.

Do exame dos dados relacionados nos Quadros 3.6 e 3.7 depreende-se que, quanto maior for o teor de cinza de casca de arroz na mistura, tanto menor será a resistência à compressão. Nestas condições, AL-KHALAF e YOUSIFT (1984) concluíram que os teores ótimos de cinza de casca de arroz que podem substituir, em peso, o cimento Portland comum sem que a resistência oferecida pelas argamassas seja inferior à da testemunha (argamassa de cimento Portland e areia, somente), no período considerado de 60 dias, são de 30% (para argamassas de traço 1:2) e de 40% (para argamassas de traço 1:3).

Na busca de obtenção de um aglomerante alternativo, GUEDERT *et al.* (1989) confeccionaram corpos-de-prova de argamassa de cimento/cinza:areia, de traço 1:3, fator água/aglomerante igual a 0,48. Os cimentos utilizados foram o cimento Portland comum e o cimento Portland de alta resistência inicial, substituídos gradualmente por 10, 15, 20, 25, 30 e 35% de cinzas de casca de arroz, em peso, previamente moídas durante 2 e 8 horas. Depois de curados em água, os corpos-de-prova foram rompidos aos 7, 28 e 60 dias, concluindo os autores que a substituição parcial do cimento por causa de casca de arroz pode aumentar a resistência à compressão das argamassas, a partir do 28º dia, com ganhos de resistência de até 14%. Para uma mesma resistência, o teor de cinza de casca de arroz admissível no aglomerante tipo cimento/cinza está diretamente relacionado com a superfície específica da cinza.

SHIMIZU e JORILLO Jr. (1990) adicionaram diferentes porcentagens (13,6-21,1-29,5-38,7%, em peso) de cinza de casca de arroz ao cimento Portland e, com a mistura, moldaram corpos-de-prova de concreto com resistências nominais, ao 28º dia, de 37, 35, 28 e 19,6 MPa, com o objetivo de determinar o teor ótimo de cinza na mistura. A consistência de cada mistura foi mantida em 10cm (slump) e os corpos-de-prova foram curados ao ar durante  $24 \pm 4$ h e, em seguida, em um tanque com solução alcalina saturada. Ensaios de compressão simples, tração na compressão diametral e flexão, além da determinação da curva da tensão/deformação, foram aplicados aos corpos-de-prova, tendo os resultados indicados que o acréscimo na quantidade de água, para se manter constante a consistência do concreto com adição de cinza de casca de arroz, levou a um decréscimo na sua resistência. Além do mais, quanto maior o grau de finura da cinza, tanto melhor a resistência do concreto, dentro das condições do trabalho. Constataram, também, os autores, que o aumento do teor de cinza na mistura com cimento Portland retarda os tempos inicial e final de pega do concreto. A resistência à tração do concreto com cinza de casca de arroz situou-se em patamares de 10 a 15% de sua resistência à compressão. De modo geral, a eficiência

QUADRO 3.6 - Resistência à compressão simples (MPa) de argamassas de cimento e areia de traço 1:2, de mesma consistência (AL-KHALAF e YOUSIFT, 1984).

| Cimento Portland:<br>cinza | Relação<br>água:cimento | Idade em dias |      |      |      |      |
|----------------------------|-------------------------|---------------|------|------|------|------|
|                            |                         | 1             | 3    | 7    | 28   | 60   |
| 1,0:0,0                    | 0,52                    | 14,1          | 20,9 | 26,7 | 37,9 | 43,2 |

|         |      |      |      |      |      |      |
|---------|------|------|------|------|------|------|
| 0,9:0,1 | 0,56 | 12,8 | 19,7 | 25,4 | 37,2 | 45,4 |
| 0,8:0,2 | 0,63 | 11,9 | 18,6 | 23,7 | 35,2 | 43,6 |
| 0,7:0,3 | 0,71 | 10,9 | 17,4 | 21,9 | 33,7 | 42,4 |
| 0,6:0,4 | 0,80 | 7,6  | 12,2 | 16,3 | 27,3 | 33,7 |
| 0,5:0,5 | 0,91 | 5,5  | 8,4  | 11,5 | 15,9 | 20,7 |

do concreto, ou seja, a relação de resistência entre um concreto com cinza de casca de arroz e um equivalente concreto simples, com o mesmo teor de aglomerante, idade e processo de cura, diminui à medida que o teor de cinza aumenta, o que levou os autores a concluírem que adições de cinza de casca de arroz são mais eficientes quando se tratar de concreto com baixo teor de cinza incorporada ou materiais de baixa resistência à compressão simples (inferior a 14 MPa, ao 28º dia, ou dosados à razão de 250 kg de cimento por m<sup>3</sup> de concreto).

QUADRO 3.7 - Resistência à compressão simples (MPa) de argamassas de cimento e areia de traço 1:3, de mesma consistência (AL-KHALAF e YOUSIFT, 1984).

| Cimento Portland:<br>cinza | Relação<br>água:cimento | Idade em dias |     |      |      |      |
|----------------------------|-------------------------|---------------|-----|------|------|------|
|                            |                         | 1             | 3   | 7    | 28   | 60   |
| 1,0:0,0                    | 0,71                    | 6,6           | 8,9 | 14,2 | 23,3 | 26,5 |
| 0,9:0,1                    | 0,77                    | 6,4           | 8,8 | 14,6 | 25,4 | 31,7 |
| 0,8:0,2                    | 0,81                    | 5,9           | 8,1 | 13,6 | 24,1 | 28,6 |
| 0,7:0,3                    | 0,87                    | 5,5           | 7,7 | 13,6 | 22,8 | 26,9 |
| 0,6:0,4                    | 0,94                    | 3,9           | 5,8 | 11,4 | 20,0 | 25,7 |
| 0,5:0,5                    | 1,03                    | 2,9           | 4,1 | 7,4  | 12,3 | 17,6 |

Uma outra característica do cimento de cinza de casca de arroz é sua excelente resistência a condições ácidas. No caso do cimento Portland, que contém de 60 a 65% de CaO, após as reações de hidratação ocorre a liberação de quantidades apreciáveis de cal

na forma de  $\text{Ca(OH)}_2$  livre, responsável pelo mal desempenho dos concretos de cimento Portland em meio ácido. Por sua vez, os cimentos pozolânicos de cinza de casca de arroz, no dizer de MEHTA e PITT (1976), por conterem apenas 20% de CaO, não permitem a formação de  $\text{Ca(OH)}_2$  livre, sob hidratação, e sim silicatos de cálcio hidratados e sílica gel, que lhes conferem maior resistência ao ataque ácido. Mesmo quando em mistura com cal ou cimento Portland, os cimentos pozolânicos de cinza de casca de arroz que, segundo MEHTA (1977), apresentam de 20 a 40% de CaO, praticamente nada contêm de  $\text{Ca(OH)}_2$  nos seus produtos de hidratação.

MEHTA (1975) preparou corpos-de-prova cilíndricos de concreto moldados com ambos os cimentos, e os manteve imersos numa solução de ácido láctico a 2% por um período de sete dias, ao final dos quais os corpos-de-prova de concreto de cimento Portland deram mostras de enfraquecimento e desintegração, ao passo que os corpos-de-prova de concreto de cimento e cinza de casca de arroz permaneceram íntegros até o final do teste, aos quatro meses. Ensaio de imersão de corpos-de-prova, por um período de oito meses em soluções a 1% de ácido hidrocloreto, ácido acético e ácido láctico, vieram comprovar a superioridade do cimento Portland pozolânico de cinza de casca de arroz.

Em outra ocasião, MEHTA (1977) relatou os resultados de ensaios de durabilidade de corpos-de-prova de concreto e de argamassa em meio ácido. Assim, corpos-de-prova de concreto moldados com uma relação água/cimento igual a 0,4 foram imersos por um período de 1500 horas numa solução de HCl ou  $\text{H}_2\text{SO}_4$  a 5%. Na solução de HCl a 5%, enquanto o concreto de cimento Portland registrava 35% de perda de peso ao final do período considerado, o concreto confeccionado com cimento pozolânico de cinza de casca de arroz em mistura com cimento Portland não perdia mais do que 8% do seu peso. Semelhantemente, as perdas de peso na solução de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  a 5% eram de 27% para o concreto de cimento Portland e de 13% para o outro.

Corpos-de-prova de argamassa de cimento de cinza de casca de arroz e cal conservadas em uma solução de ácido acético a 1%, permaneceram em excelentes condições após quatro anos, ao passo que argamassas de cimento Portland se enfraqueceram e apresentaram apreciável perda de peso decorrido apenas um ano.

SILVEIRA e DAL MOLIN (1995) moldaram corpos-de-prova prismáticos, de concreto e de argamassa, utilizando cimento Portland CP V-ARI (alta resistência inicial), agregado graúdo de origem basáltica (diâmetro máximo: 19 mm), areia (módulo de finura: 2,17), cinza de casca de arroz (queimada a  $560^\circ\text{C}$ , teor de carbono 12%), microssílica e aditivo superplastificante (base naftaleno sulfonado). Fazendo variar a relação água/aglomerante (0,42; 0,51 e 0,60), a porcentagem de adição (0; 5 e 10%) e o tipo de adição (cinza de casca de arroz e microssílica), as autoras compararam a resistência à tração na flexão oferecida pelos corpos-de-prova a agentes agressivos externos do tipo íons sulfato (120 dias de imersão em solução de sulfato de sódio, a 5%, pH mantido entre 6 e 8) e concluíram que corpos-de-prova de concreto aditivados com 10% de cinza de casca de arroz apresentaram maiores resistências para todos os fatores água/aglomerante estudados; a adição de 5% não resultou em aumento da resistência média para todas as combinações. No caso dos corpos-de-prova de argamassa, as adições de cinza de casca de arroz e de microssílica não se mostraram significativas em termos de resistência à flexão após submissão dos corpos-de-prova ao meio agressivo estudado.

## V - CIMENTO “ASHMOH” PRODUZIDO A PARTIR DA CINZA DE CASCA DE ARROZ

O cimento “ashmoh”, cujo processo de fabricação foi desenvolvido pelo Prof. P.C. Kapur, do Instituto Tecnológico de Kanpur, Índia, é uma mistura mecânica finamente moída de cinza de casca de arroz (com predominância de sílica), cal hidratada (com predominância de hidróxido de cálcio) e um aditivo, ingredientes que são moídos em conjunto em um moinho de bolas.

Em relação ao CPC (Cimento Portland Comum), o cimento “ashmoh” possui menor teor de cal, como esta expresso no Quadro 3.8, além de exigir instalações modestas e equipamentos simples e baratos, viabilizando-se economicamente com uma capacidade de produção de 300 t/ano, como pode ser observado na Quadro 3.9.

No artigo intitulado “CIMENTO: Produção doméstica” (1987), o articulista esclarece que, para a fabricação do cimento “ashmoh”, a cinza de casca de arroz deve apresentar as seguintes características: cor branca, cinza ou negra; razoavelmente seca; isenta de alcatrão de madeira; porcentagem de carbono inferior a 8%. A sílica contida na cinza de casca de arroz deve ser, por sua vez, altamente porosa, possuir elevada superfície específica e ser excepcionalmente reativa; por este motivo, a cinza que a contém é tida como uma excelente pozolana cuja atividade é grandemente estimulada pela combustão completa ou quase completa da casca de arroz que, em seguida, deve ser transformada em pó fino mediante moagem.

A cor da cinza da casca de arroz é tanto mais negra quanto mais incompleta e insuficiente for a combustão.

A cal hidratada, segunda matéria-prima para a fabricação do cimento “ashmoh”, é usada contendo no mínimo 85% de óxido de cálcio, na forma de pó seco.

Como aditivo do cimento “ashmoh”, pode-se usar o próprio cimento Portland comum, com a finalidade de regular o tempo de pega e melhorar as características de resistência inicial do “ashmoh”.

O único equipamento grande necessário para uma fábrica de cimento “ashmoh” é o moinho de bolas; em um período de 24 h pode-se fazer três moagens da mistura de matérias-primas composta de 64% de cinza de casca de arroz, 27% de cal hidratada e 9% de aditivo. Essa proporção pode variar de uma relação 1,55:1,00 até 3,10:1,00 de cinza de casca de arroz:cal hidratada, e de 7,5 a 10,0% de aditivo na mistura.

O cimento “ashmoh” deve ser armazenado em embalagens lacradas e herméticas por causa da cal hidratada que o torna mais degradável que o cimento Portland comum, quando exposto ao ar livre.

O cimento “ashmoh” é de origem recente e, portanto, ainda não completamente estudado. Todavia, seu desempenho é muito bom quando usado na execução de fundações, pisos, revestimento de canais, silos de cereais, anéis de poços, tanques de água ou na fabricação de tijolos, blocos, azulejos, ou ainda como argamassa para assentamento de tijolos e revestimento de paredes.

QUADRO 3.8 - Composição química do cimento Portland comum e cimento “ashmoh”, % em peso (“CIMENTO: Produção doméstica” - 1987).

| Componente         | Fórmula química                     | CPC     | “Ashmoh” (*) |
|--------------------|-------------------------------------|---------|--------------|
| Sílica             | SiO <sub>2</sub>                    | 19-25   | 60-62        |
| Cal                | CaO                                 | 62-66   | 24-26        |
| Alumina            | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>      | 4-8     | 2            |
| Óxido de ferro     | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>      | 2-5     | 1            |
| Magnésia           | MgO                                 | 0,5-4,0 | 2            |
| Óxidos alcalinos   | Na <sub>2</sub> O, K <sub>2</sub> O | 0,5-1,3 | 1,5          |
| Anidrido sulfúrico | SO <sub>3</sub>                     | 1-3     | ---          |
| Carbono            | C                                   | ---     | 4            |
| Água               | H <sub>2</sub> O                    | ---     | 6-7          |

(\*) Calculado na base de 92% de sílica em cinza de casca de arroz (CCA) e 90% de óxido de cálcio em cal viva.

QUADRO 3.9 - Características das fábricas de cimento Portland e de cimento “ashmoh” (“CIMENTO: Produção doméstica” - 1987).

|  | CPC  | “Ashmoh”  |
|--|--|---|
| Dimensões de uma unidade economicamente viável | Grandes  | Muito pequenas  |
| Custo de capital por capacidade (t/ano)        | Alto   | Baixo   |
| Período de amortização                         | Longo  | Muito curto   |
| Nível tecnológico                              | Complexo, porém bem estabelecido   | Muito simples/adequado  |
| Potencial de empregos                          | Baixo  | Alto  |
| Localização                                    | Perto de depósitos de matéria-prima que devem ser extensos para sustentar a fábrica                    | Perto da fonte de CCA. Depósitos pequenos e espalhados de calcário podem ser usados                               |
| Incidência no transporte                       | Geralmente alta no transporte de matéria-prima, combustível e/ou cimento pronto aos centros de consumo | Muito leve. Mini-fábricas descentralizadas de “ashmoh” para a produção local de cimento para consumo também local |

As características tecnológicas do cimento “ashmoh” estão apresentadas nos Quadros 3.10 e 3.11.

QUADRO 3.10 - Massa específica do cimento “ashmoh” e do cimento Portland comum (CPC), em kg/m<sup>3</sup> (“CIMENTO: Produção doméstica” - 1987).

|                                | <b>“Ashmoh”</b> | <b>CPC</b> |
|--------------------------------|-----------------|------------|
| Massa específica real          | 2080-2170       | 3000-3200  |
| Massa específica aparente      |                 |            |
| • Material solto               | 570-690         | 950-1300   |
| • Material adensado com golpes | 850-950         | 1600-1800  |
| • Material levemente agitado   | 710-770         | 1280-1440  |

QUADRO 3.11 - Características de resistência de argamassas de “ashmoh”/areia (“CIMENTO: Produção doméstica” - 1987).

| <b>RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA COMPRESSÃO DIAMETRAL DE ARGAMASSAS DE “ASHMOH”/AREIA</b> |                                    |                            |
|---|------------------------------------|----------------------------|
| a) Dosagem  | 1:3 “ashmoh”/areia                 |                            |
| Fator água/cimento  | 0,475-0,5                          |                            |
| Tempo de cura   | 28 dias                            |                            |
| Resistência à tração  | 2,5-3,3 MPa                        |                            |
| b) Dosagem  | “Ashmoh”/areia de relação variável |                            |
| Tempo de cura   | 28 dias                            |                            |
| Relação “ashmoh”/areia  | Resistência à tração (MPa)         | Relação água/cimento ótima |
| 1:3   | 2,9                                | 0,475                      |
| 1:4   | 1,6                                | 0,5                        |
| 1:5   | 1,0                                | 0,55                       |
| 1:6   | 0,7                                | 0,575                      |
| <b>RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DE ARGAMASSAS DE “ASHMOH” / AREIA</b>           |                                    |                            |
| Dosagem   | 1:3 “ashmoh”/areia                 |                            |
| Relação água/cimento  | 0,475-0,5                          |                            |
| Dias de cura  | Resistência à compressão (MPa)     |                            |
| 3   | 11,0-15,0                          |                            |
| 7   | 14,0-18,0                          |                            |
| 28  | 20,0-28,0                          |                            |

## VI - MODELOS DE QUEIMADORES PARA CASCA DE ARROZ

O Instituto Tecnológico de Kanpur, Índia, projetou uma fomalha para a queima de 10 a 15 kg de casca de arroz num período de 60 a 90 minutos de chama contínua, a uma temperatura de 800 a 900° C, que possibilita, também, o aproveitamento da energia térmica gerada (25 a 40 Mcal/h).

Consistindo basicamente de uma estrutura metálica, de uma cesta cilíndrica feita de malha de arame (lado interno) e chapa estirada (lado externo), de um tubo queimador e de uma válvula de descarga de ar (opcional), o projeto de tal fomalha está descrito no artigo “Onde queimar a casca de arroz”, publicado na Revista Dirigente Construtor, de agosto de 1987, e mostrado na Figura 3.1.

A casca de arroz é depositada no espaço existente entre o tubo queimador e a cesta cilíndrica, acendendo-se o fogo pela parte inferior da fomalha, de tal modo que a chama projeta-se no tubo queimador, aquecendo-o e fazendo com que ele aja como fonte de sucção de ar que, penetrando por todos os lados da cesta através do leito de casca, é aspirado e inflamado.

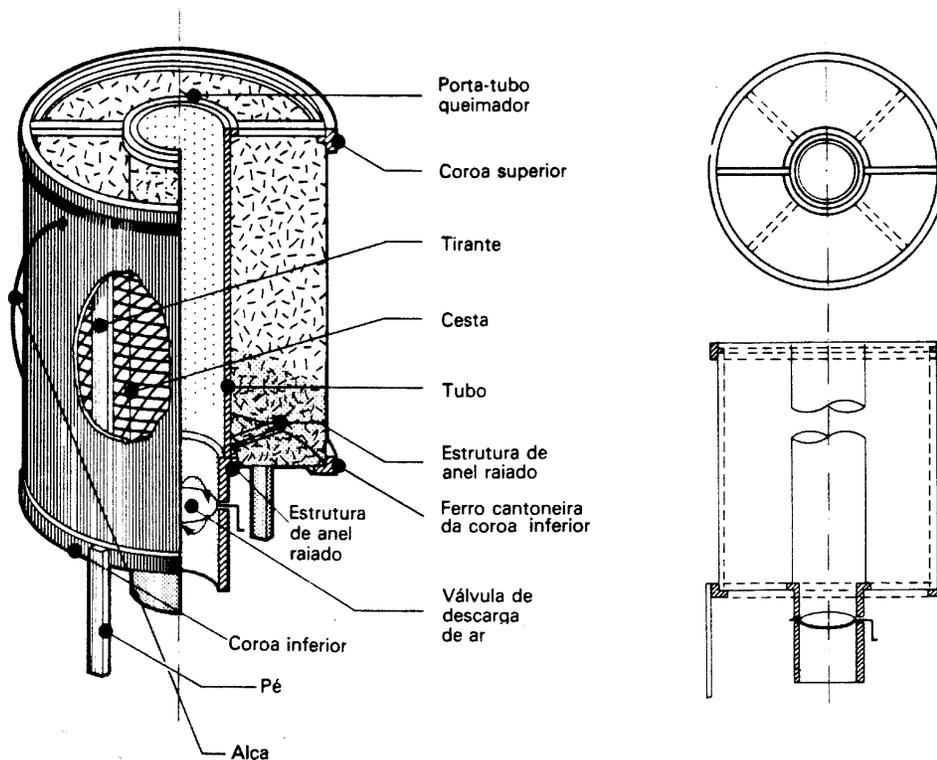


FIGURA 3.1 - Modelo de fomalha desenvolvido pelo Instituto Tecnológico de Kanpur, Índia, para a queima controlada de casca de arroz

Ao final do processo de queima, a cinza resultante deverá apresentar um tom acinzentado claro, indicando que toda a matéria orgânica foi consumida, sendo retirada através de articulações na base da cesta ou simplesmente inclinando-se o queimador.

Ressalta-se que este forno é um módulo de fonte de calor móvel e compacto, podendo assumir várias configurações, de acordo com as necessidades, como mostra a Figura 3.2.

Seguindo recomendações do Pakistan Council for Scientific and Industrial Research, ABIKO (1987) construiu um forno para a queima de casca de arroz, forno este compreendendo dois tambores, um de 200 l e outro de 100 l, que constituem uma câmara na qual a casca de arroz é queimada à temperatura média de 500° C, mostrado na Figura 3.3.

Fornalhas em escala piloto ou industrial foram projetadas para produzir cinza a partir da queima à temperatura controlada da casca de arroz.

No processo desenvolvido por MEHTA e PITT (1976) para utilização de casca de arroz, além de cinza produz-se energia de forma simples, eficiente e não poluente. Na Califórnia, USA, foi construída uma planta piloto projetada para queimar 225 kg/h de casca de arroz, liberando grande quantidade de energia que pode ser utilizada na secagem de produtos agrícolas, no processamento de alimentos, na geração de energia elétrica para o acionamento de bombas de irrigação e equipamentos de beneficiamento de arroz, e na geração de vapor de baixa pressão e baixa temperatura. Em Arkansas, USA, próximo a uma grande usina de beneficiamento de arroz, foi construída uma outra unidade com capacidade para queimar 7,5 t/h de casca de arroz e gerar 21,8 t/h de vapor a baixa temperatura.

Na Figura 3.4 está apresentado o diagrama de fluxo de uma fornalha para queima controlada de casca de arroz.

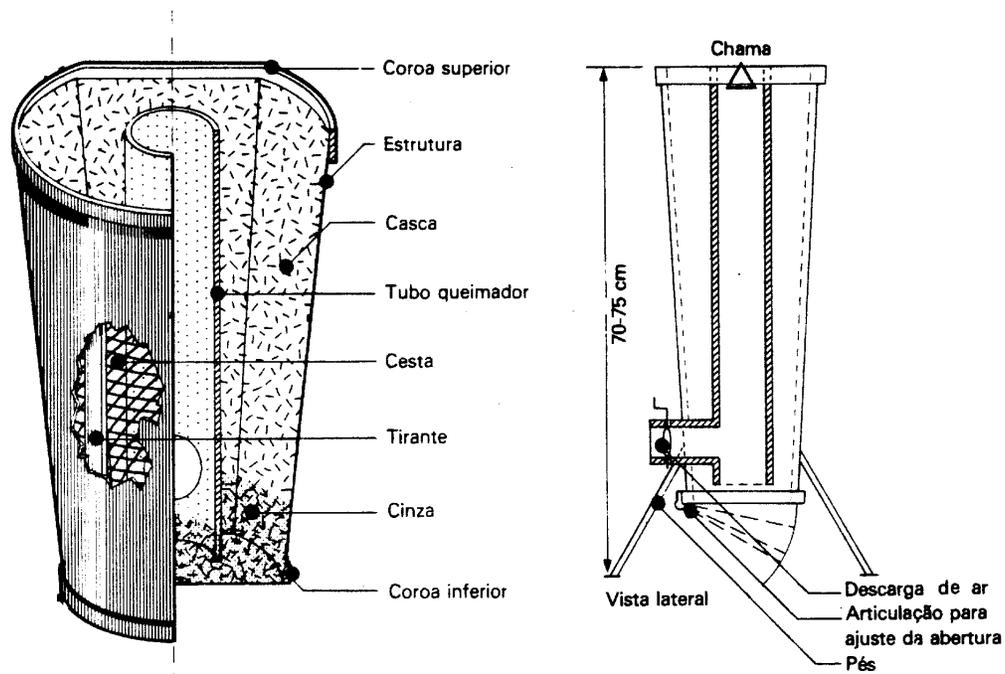
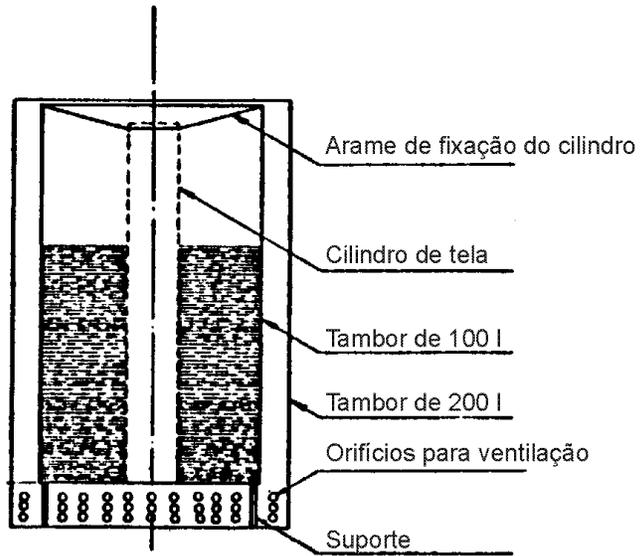


FIGURA 3.2 - Outra configuração do modelo de fornalha para a queima controlada de casca de arroz



Corte Esquemático

FIGURA 3.3 - Forno para queima controlada de casca de arroz (ABIKO, 1987).

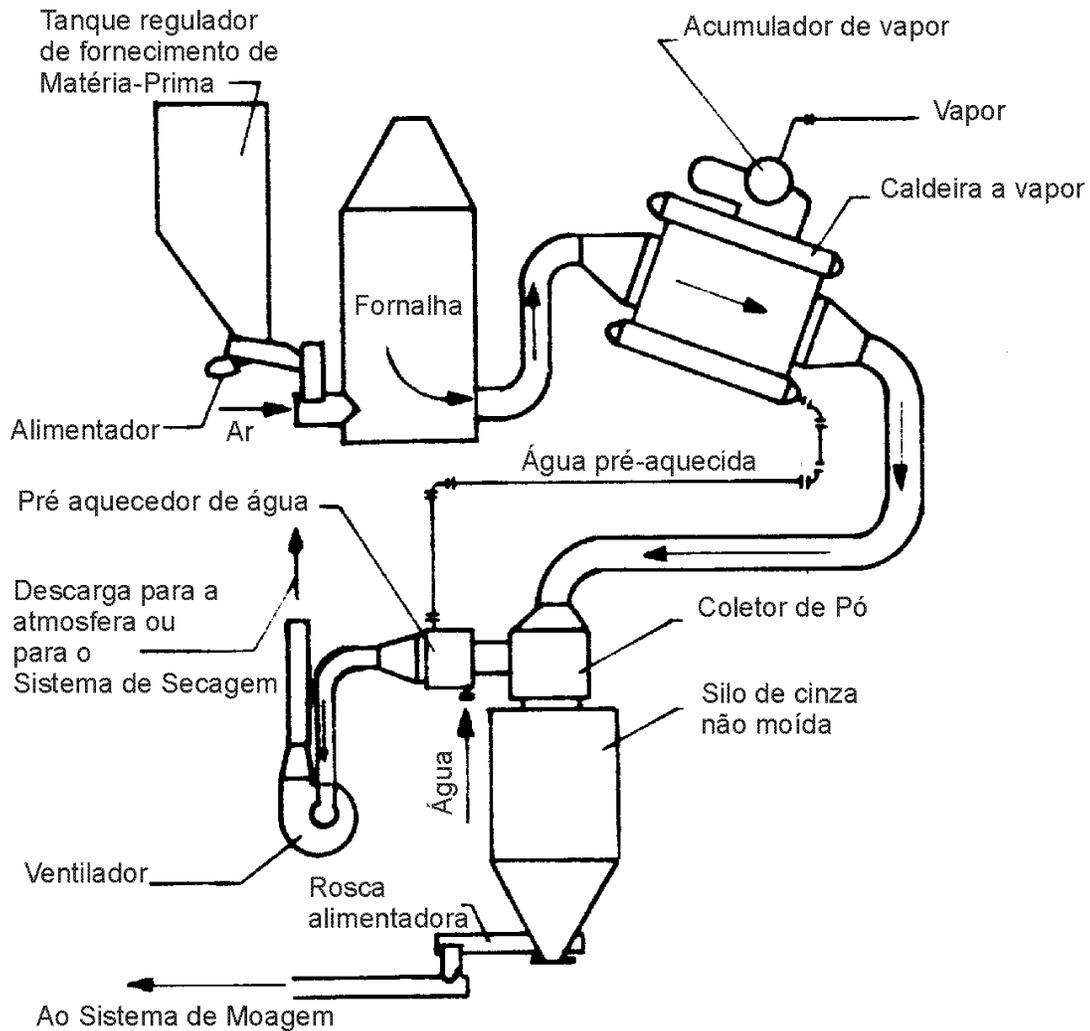


FIGURA 3.4 - Diagrama de fluxo de uma fornalha destinada à produção de cinza de casca de arroz e vapor (MEHTA e PITT, 1976)

CINCOTTO *et al.* (1990), estudando uma forma de otimizar a produção de cinza de casca de arroz, usaram um reator de leito fluidizado para queimar 45 kg/h de casca de arroz sob temperatura e tempo de residência controlados, resultando na produção de 3,6 kg/h de cinza.

A cinza obtida se caracterizou por apresentar estrutura bastante porosa, teor de carbono inferior a 2% e finura Blaine de 419 m<sup>2</sup>/kg, massa específica de 2.110 kg/m<sup>3</sup>, e boa atividade pozolânica. Testando à compressão simples corpos-de-prova moldados com argamassa de cimento pozolânico e areia de traço 1:2,5, os autores concluíram que as misturas de até 50% de cinzas não moídas, obtidas pela queima da casca de arroz em reator de leito fluidizado, apresentaram maiores resistências à compressão e à flexão do que aquelas misturas de 30% de cinzas produzidas pela queima em fornalhas comuns, podendo as primeiras ser consideradas cimento de alvenaria.

## VII - CONCLUSÃO

Como se sabe, a casca de arroz não queima facilmente, de tal sorte que alguns cuidados especiais devem ser tomados para se alcançar a combustão completa ou quase completa de toda a matéria orgânica. Se a casca de arroz for acumulada em pilhas para ser queimada, a massa incandescente de casca de arroz ou de cinza de casca de arroz não deve ser extinta por água, mas deixada a queimar por tempo suficiente até que todo o alcatrão de madeira seja consumido e até que o teor de carbono não exceda a 8%.

Discorrendo sobre o potencial de uso de cimentos de cinza de casca de arroz, MEHTA (1977) ressaltou o caráter ecologicamente correto das operações de queima em fornalhas industriais, em comparação com a prática de queima a céu aberto. Todavia, a disponibilidade sazonal da casca de arroz e sua natureza volumosa podem resultar em custos excessivamente elevados de transporte e armazenamento.

Várias outras pesquisas vêm sendo desenvolvidas com o objetivo de avaliar o desempenho de misturas de cimento Portland, cal, cinza de casca de arroz, cinza volante, microssílica, etc, e sua utilização em argamassas e concretos.

O desempenho de misturas de cinza volante com microssílica e cinza de casca de arroz, esta composta com 50% de cinza obtida pela queima de casca de arroz em laboratório, à temperatura de até 650° C, e 50% queimada em forno de olaria sem controle de temperatura, foi estudado por ISAIA (1996). Os resultados mostraram que a quantidade de adição (teores variáveis entre 10 e 50%) exerceu fator multiplicador sobre a durabilidade, principalmente quando associada à cinza volante; os resultados, porém, não podem ser generalizados, uma vez que há outros aspectos envolvidos com relação ao desempenho do concreto confeccionado com tais materiais, tais como a sinergia entre os tipos e as quantidades de adições.

Depois de pesquisar, individualmente, as proporções cimento/cinza e cal/cinza, GUEDERT *et al.* (1989) estudaram as características de resistência da mistura cinza/cimento/cal como aglomerante hidráulico, adotando-se uma relação água/aglomerante de 0,55. Corpos-de-prova, moldados com diferentes proporções de mistura, foram rompidos à compressão aos 3, 7 e 28 dias; valores de resistência à compressão simples de 17,0 e 21,3 MPa foram alcançados, aos 28 dias, para misturas de 45%-20%-35% e 40%-20%-40% de cimento-cal-cinza, respectivamente.

A influência do grau de moagem na pozolanicidade da cinza da casca de arroz foi estudada por PRUDÊNCIO e SANTOS (1996), sendo a finura da cinza uma de suas principais características físicas, pois, juntamente com a densidade e forma da partícula, influencia diretamente a relação água/aglomerante e a retenção de água pelo concreto. Os autores concluíram que o índice de atividade pozolânica da cinza de casca de arroz aumenta com o tempo de moagem, que leva ao aumento da superfície específica do material, até o limite de quatro horas.

Trabalhando com misturas de cimento Portland, cal e cinza de casca de arroz, FARIAS e RECENA (1990) afirmaram que é viável utilizar cinzas de casca de arroz queimadas em fornalhas rudimentares, visando a fabricação de cimento Portland pozolânico, desde que o teor de carbono nas cinzas seja baixo. Concluíram, também, que o aumento do grau de finura da cinza de casca de arroz melhora a trabalhabilidade, a retenção de água e a incorporação de areia na argamassa, e que a melhor proporção de

cimento Portland, cal e cinza de casca de arroz, adequada para uso em alvenaria, é 2:21,78:76,22.

COOK *et al.* (1977) concluíram que até 60% de cinza de casca de arroz, em peso, pode ser incorporado a argamassas mistas de cinza de casca de arroz em combinação com cimento Portland ou cal, de traço aglomerante: areia igual a 1:2,75, com a finalidade de produzir blocos para uso em alvenaria não portante. A inclusão de aluminato de sódio, segundo os autores, acarreta benefícios para os tempos inicial e final de pega e resistência à compressão, particularmente no caso de misturas contendo cal.

KALITA *et al.* (1987) recomendam, ainda, a utilização de cimento pozolânico de cinza de casca de arroz na produção de tijolos adequados para a construção de casas populares, bem como seu emprego como aglomerante em obras de alvenaria. Os tijolos assim fabricados possuem resistência à compressão simples de 2,0 a 4,0 MPa e 4,0 a 8,0 MPa aos 7 e 28 dias respectivamente, com tempos de pega inicial e final de 90 a 150 minutos e 180 a 600 minutos, respectivamente.

Pode-se afirmar, finalmente, que, para as condições brasileiras, a cinza de casca de arroz tem se despontado como a mais promissora dentre as demais pozolanas para mistura com cimento Portland comum ou cal e assim obter um cimento pozolânico alternativo de boas características físico-mecânicas e uso imediato em obras de construção civil e engenharia rural.

#### VIII - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIKO, A.K. - Estabilização de solos com cimentos pozolânicos. São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, EPUSP, 1987. 16 p. BT PCC 12/87.

AL-KHALAF, M.N. e YOUSIFT, H.A. - Use of rice husk ash in concrete. The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, 6 (4):241-248. 1984.

CIMENTO: produção doméstica. Dirigente Construtor, 23 (3):26-34. 1987.

CINCOTTO, M.A.; AGOPYAN, V. e JOHN, V.M. - Optimization of rice husk ash production. In: SOBRAL, H.S. (ed.) - Vegetable Plants and their Fibres as Building Materials. RILEM Proceedings, Chapman and Hall, 1990. p. 334-342.

COOK, D.J.; PAMA, R.P. e PAUL, B.K. - Rice husk ash-lime-cement mixes for use in masonry units. Building and Environment, 12:281-288. 1977.

FARIAS, J.S.A. e RECENA, F.A.P. - Study for Brazilian rice husk ash cement. In: SOBRAL, H.S. (ed.) - Vegetable Plants and their Fibres as Building Materials. RILEM Proceedings, Chapman and Hall, 1990. p. 360-369.

GUEDERT, L.O.; DAMO, N.B. e PRUDÊNCIO Jr., L.R. - Utilização da cinza da casca de arroz como material pozolânico para a obtenção de aglomerantes alternativos. In:

Simpósio de Desempenho de Materiais e Componentes de Construção Civil, II, Florianópolis, SC, 1989. Anais. p. 152-170. 1989.

ISAIA, G.C. - Entraves e perspectivas para uso de elevados teores de cinza volante e cinza de casca de arroz em concreto estrutural. In: Workshop Reciclagem e Re-utilização de Resíduos como Materiais de Construção Civil. São Paulo, ANTAC - Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 1996. Anais para Discussão, p. 46-52. 1996.

KALITA, U.C.; NAMBIAR, M.K.C. e BORTHAKUR, B.C. - Materials of low cost housing for developing countries. In: International RILEM Congress, I, London, 1987. Proceedings, v. 2, 1987. p. 595-598.

MEHTA, P.K. - Rice hull ash cement...High-quality, acid-resisting. ACI Journal, 72 (5):235-236. 1975.

MEHTA, P.K. - Properties of blended cements made from rice husk ash. ACI Journal, 74 (9):440-442. 1977.

MEHTA, P.K. e PITT, N. - Energy and industrial materials from crop residues. Resource Recovery and Conservation 2:23-38. 1976.

ONDE queimar a casca de arroz. Dirigente Construtor, 23 (8):30-32. 1987.

PETRUCCI, E.G.R. - Materiais de Construção. 5ª ed. Porto Alegre, RS, Editora Globo, 1980. 435 p.

PRUDÊNCIO Jr., L.R. e SANTOS, S. - Influência do grau de moagem na pozolanicidade da cinza de casca de arroz. In: Workshop Reciclagem e Re-utilização de Resíduos como Materiais de Construção Civil. São Paulo, ANTAC - Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 1996. Anais para Discussão, p. 53-62. 1996.

SHIMIZU, G. e JORILLO Jr., P. - Study on the use of rough and unground ash from an open heaped-up burned rice husk as a partial cement substitute. In: SOBRAL, H.S. (ed.) - Vegetable Plants and their Fibres as Building Materials. RILEM Proceedings, Chapman and Hall, 1990. p. 321-333.

SILVEIRA, A.A. e DAL MOLIN, D.C.C. - Resistência a sulfatos de concretos e argamassas com adições de microssílica e cinza de casca de arroz. In: Jornadas Sudamericanas de Ingenieria Estructural, XXVII, Tucumán, Argentina, 1995. Anais, p. 383-394. 1995.

SILVEIRA, A.A.; FERREIRA, A.A. e DAL MOLIN, D.C.C. - A cinza da casca de arroz como adição mineral. In: Workshop Reciclagem e Re-utilização de Resíduos como

Materiais de Construção Civil. São Paulo, ANTAC - Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 1996. Anais para Discussão, p. 39-45. 1996.