



**ENTAC2006**

**A CONSTRUÇÃO DO FUTURO** XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído | 23 a 25 de agosto | Florianópolis/SC

## **TRANSFERÊNCIA DE UMIDADE EM ARGAMASSAS: ESTUDO DE CASO COM AS CINZAS PESADAS**

**Flora I. G. Santos (1); Malik Cheriaf (2); Janaíde C. Rocha (3)**

(1) Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil –  
e-mail: flora\_engcivil@yahoo.com.br

(2) Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil –  
e-mail: malik@infohab.org.br

(3) Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil –  
e-mail: ecv1jcr@ecv.ufsc.br

### **RESUMO**

A estrutura é a alma de um material, responsável pela ligação entre o seu processamento e as propriedades físicas macroscópicas resultantes. Na hierarquia de estruturas que existem em materiais a microestrutura é a que oferece a mais rica variedade de arranjos estruturais, influenciando todos os aspectos do comportamento dos materiais. O presente artigo trata de um estudo compreensivo de como a microestrutura de argamassas desenvolvidos com resíduos influencia as propriedades físicas macroscópicas como por exemplo as propriedades hídricas e térmicas. Neste contexto o estudo da transferência de umidade reveste-se da maior importância para a caracterização do comportamento das argamassas. Notoriamente no que se refere à durabilidade, à estanqueidade, à degradação de aspecto e ao desempenho térmico. Dessa forma, a presente pesquisa avalia as propriedades relacionadas com os mecanismos de transferência de umidade não somente de argamassas convencionais, mas também de argamassas confeccionadas com teores de 50 e 100%, em volume, de cinzas pesadas em substituição ao agregado natural. A escolha da cinza pesada advém da grande disponibilidade deste resíduo na região sul do Brasil e da sua característica peculiar de apresentar conteúdo de umidade de equilíbrio bastante superior ao da areia em função da sua natureza porosa. O uso de bancada experimental permitiu a identificação das propriedades: massa específica, porosidade, cinética de absorção, cinética de secagem, adsorção e ângulo de molhamento aparente. Os resultados destas propriedades mostram que o teor de cinza pesada é um parâmetro que influi significativamente na transferência de umidade em argamassas proporcionando a redução da sorptividade e o aumento da quantidade de água adsorvida para teores elevados de umidade relativa. Os resultados mostram ainda a importância das técnicas analíticas desenvolvidas para identificação das propriedades hídricas das argamassas produzidas com e sem as cinzas pesadas.

Palavras-chave: transferência de umidade, cinza pesada e argamassa.

### **ABSTRACT**

The structure is the soul of material, responsible for the linking between its processing and the macroscopic physical properties resultants. In the hierarchy of structures that exist in materials the microstructure is the one that the richest variety of structural arrangements offers, influencing all the aspects of the behavior of the materials. The present article deals with a comprehensive study of as the microstructure of mortars made with wastes influences the macroscopic physical properties as for example moisture and thermal properties. In this context the study of the moisture transference it is armed with the biggest importance for the characterization of the behavior of mortars. Especially in that if it relates to the durability, the degradation and the thermal performance. Of this form, the present research evaluates the properties related with the moisture transference mechanisms of mortars not only conventional, but also of mortars confectioned with 50 and 100%, in volume, of bottom ashes

replaced the natural aggregate. Bottom ash has great availability in the south region of Brazil and its peculiar characteristic to present content of moisture bigger than sand in function of its porous nature. The experimental group of benches use allowed the identification of the properties: specific gravity, porosity, kinetic of absorption, kinetic of drying, water vapor sorption isotherms and apparent wetting angle. The results of these properties show that the bottom ash is a parameter that influences significantly in the moisture transference in mortars providing to the reduction of the sorptivity and the increase of the amount of water vapor sorption for high relative humidity. The results still show the importance of the developed analytical techniques for identification of produced the moisture properties of mortars with and without bottom ash.

Keywords: moisture transfer, bottom ash and mortar.

## 1 INTRODUÇÃO

As transferências de umidade ocorrem durante a vida inteira dos materiais. Notoriamente para aqueles materiais à base de cimento Portland, onde a água está presente desde os primeiros momentos da produção. Em seguida, durante a hidratação, uma parte desta água desaparece para formar o gel, enquanto que a água em excesso se evapora deixando uma rede de poros chamados poros capilares. Esta rede de poros é o local privilegiado de um transporte de água sob forma de vapor ou líquida.

Posteriormente, durante a vida útil dos materiais cimentícios, o transporte e fixação de umidade ocorre, por exemplo, com o processo de secagem do material, quando é submetido a um ambiente cuja umidade relativa é mais baixa do que sua umidade interna, sendo que este fenômeno afeta a zona de superfície de muitas estruturas de engenharia. Além disso, estes processos são combinados freqüentemente com outros processos maciços de transporte ou com as reações químicas que ocorrem em condições não saturadas, tais como a carbonatação e a penetração de agentes agressivos (BAROGHEL, 1999).

Diante deste contexto, existe a necessidade de compreender perfeitamente e poder simular as transferências de umidade. Esta necessidade pode ser destacada pelas pesquisas direcionadas à avaliação dos mecanismos de transferência de umidade em materiais porosos, como por exemplo as desenvolvidas pelos seguintes autores: Kooi (1971); Perrin (1985); Merouani (1987); Freitas, Abrantes, Crause (1996); Mendes (1997), Kumaran et al. (2004) e Paes (2004).

No entanto, destes estudos, os mecanismos de transferência de umidade têm sido investigados apenas nas argamassas ditas convencionais. No entanto, partindo-se da premissa de uso crescente de resíduos sólidos industriais na construção civil, torna-se de fundamental importância a compreensão destes mecanismos em materiais não convencionais.

Na região sul do Brasil, dentre os resíduos sólidos industriais disponibilizados anualmente destacam-se as cinzas pesadas provenientes da combustão do carvão mineral, pois nesta região estão situadas as principais jazidas carboníferas do país. Somente no complexo termelétrico de Jorge Lacerda, localizado no município de Capivari de Baixo (SC), são geradas anualmente 818 mil toneladas de cinzas, das quais 30% são cinzas pesadas (CHERIAF, ROCHA; 1997). Uma das soluções para esta problemática ambiental está na viabilidade do uso das cinzas como agregado.

Além da problemática ambiental, a relevância do estudo com as cinzas da queima de carvão mineral deve-se ao fato do conteúdo de umidade de equilíbrio destas ser bastante superior ao da areia em função da sua natureza porosa (BARBARE, SHUKLA, BOSE, 2003). Assim sendo, deve ser esclarecida a influência da porosidade das cinzas no comportamento hídrico do material polifásico que é a argamassa.

## 1.1 Mecanismos de transferência de umidade

Os mecanismos que regem a transferência de umidade em materiais de construção são complexos e atuam simultaneamente (CSTC, 1982):

- na fase vapor: a difusão e os movimentos convectivos no interior dos poros condicionam o transporte;
- na fase líquida: a capilaridade, a gravidade e o efeito dos gradientes de pressão externa comandam a transferência de umidade.

Do ponto de vista físico pode-se considerar que há três mecanismos fundamentais de fixação de umidade: adsorção, condensação e capilaridade.

O fenômeno de adsorção abordado na presente pesquisa consiste no processo físico de ligação ou retenção de moléculas na superfície de partículas sólidas regido pelas forças de Van der Waals.

Em geral, o que afeta a adsorção está relacionado a qualquer parâmetro que altere a estrutura porosa e a distribuição dos tamanhos de poro. Como, por exemplo, a relação a/c, tipo de cimento, tempo e tipo de cura, temperatura, carbonatação (para estruturas com seções transversais finas), aditivos, relação cimento/agregado (XI et al., 1994).

Como efeito macroscópico da adsorção tem-se que um material poroso varia o seu conteúdo de umidade em função de uma variação da umidade relativa. Quando há um aumento do conteúdo de umidade do material trata-se do fenômeno de adsorção, quando ocorre a diminuição trata-se do fenômeno de dessorção.

Modelos como o de Langmuir, o de BET (Brauner, Emmette Teller) e o de GAB (Guggenheim, Anderson, De Boer) foram propostos para o ajuste dos dados experimentais de adsorção e dessorção. Estes modelos estão detalhadamente descritos em Merouani (1987) e segundo este autor o modelo de GAB é o que melhor ajusta-se aos dados experimentais em tratando-se de argamassas.

Como trata-se do conteúdo de umidade mássico, é pertinente apresentar a sua definição que é a relação entre o conteúdo de umidade e a massa da amostra seca, que para efeitos deste artigo é definido pelo símbolo “W”.

Existem dois modos de condensação da água que são: água adsorvida e água capilar. A água adsorvida é composta por camadas de moléculas que condensam sobre a superfície dos poros. Sua quantidade no equilíbrio é função da superfície específica do meio poroso, da afinidade entre o vapor de água e a matriz sólida e as condições higrotérmicas reinantes.

Já a água capilar representa uma fase contínua de líquido que preenche totalmente certos poros do material. Existindo uma descontinuidade de pressão na interface da curva que separa a água capilar da fase sólida.

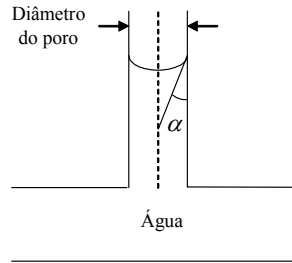
A ação capilar dos líquidos se deve à tendência dos líquidos de subir pelas paredes de tubos capilares (tubos muito finos) e é uma consequência da tensão superficial.

O fenômeno da capilaridade gera interfaces curvas entre o fluido (água) e o ar contido no interior dos poros. Na interface líquido-gás estabelece-se um gradiente de pressões designado por pressão capilar que é função da tensão superficial líquido-ar ( $\sigma$ ), dos raios de curvatura principal ( $R_1$ ) e do ângulo de molhamento ( $\alpha$ ) conforme apresentado pela eq. (1):

$$P_c = P_{ar} - P_{água} = \sigma \times \cos \alpha \times \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (\text{eq.1})$$

Quanto a influência da força gravitacional nas taxas de umidade transportada, para a grande maioria dos materiais de construção, nas suas condições usuais de aplicação, é pequena (HALL, 1994).

Como visto na eq. (1) o fenômeno de capilaridade depende do ângulo de molhamento, sendo que este é formado na interface entre o menisco capilar (esférico) e parede do poro, conforme ilustrado na Figura 1.



**Figura 1 - Esquematização do ângulo de molhamento**

Para a determinação deste ângulo, emprega-se um procedimento experimental usualmente empregado em solos que consiste na determinação do ângulo de molhamento aparente ( $\alpha$ ) através da avaliação da ascensão capilar em ensaio realizado em argamassas considerando-se a cinética de absorção capilar de dois líquidos molhantes diferentes: água e álcool. O uso do álcool é dado em função deste ser considerado um líquido perfeitamente molhante, ou seja, o ângulo de molhamento é praticamente nulo em função do menisco capilar ser bastante curvo. Logo, a absorção capilar de álcool implica em uma diferença de pressão praticamente máxima acarretando em uma elevada força capilar.

Empregando-se esta metodologia o ângulo de molhamento pode ser calculado através da eq. (2):

$$\cos \alpha = \left( \frac{S_a}{S_{al}} \right)^2 \frac{\mu_a \times \sigma_{al}}{\mu_{al} \times \sigma} \quad (\text{eq.2})$$

$\alpha$  - ângulo de molhamento aparente ( $^\circ$ );

$\mu_a$  - a viscosidade dinâmica da água ( $\text{g/cm} \times \text{s}$ );

$\mu_{al}$  - viscosidade dinâmica do álcool ( $\text{g/cm} \times \text{s}$ );

$\sigma$  - tensão superficial água-ar ( $\text{N/m}$ );

$\sigma_{al}$  - tensão superficial álcool-ar ( $\text{N/m}$ );

$S_a$  - inclinação da reta que relaciona o estoque de água infiltrado ( $S_t$ ) com a raiz do tempo ( $\text{cm}$ );

$S_{al}$  - inclinação da reta que relaciona o estoque de álcool infiltrado ( $S_t$ ) com a raiz do tempo ( $\text{cm}$ ).

No que diz respeito ao estoque de líquido infiltrado ( $S_t$ ) este pode ser obtido através da aplicação da eq. (3):

$$S_t(t) = \frac{m(t) - ms}{\rho_l \times A} \quad (\text{eq.3})$$

$m(t)$  - massa do corpo de prova num determinado instante ( $\text{g}$ );

$\rho_l$  - massa específica do líquido molhante ( $\text{g/cm}^3$ );

$A$  - área da seção transversal do corpo de prova ( $\text{cm}^2$ ).

Através do ensaio de absorção por capilaridade também é possível determinar o coeficiente denominado de sorptividade ( $S$ ), que é linear para tempos iniciais da ordem de horas segundo Martys & Ferraris (1997), e que está apresentado na eq. (4):

$$X = S \times \sqrt{t} \quad (\text{eq.4})$$

$X$  - volume do líquido absorvido por área da seção transversal do corpo-de-prova ( $\text{m}$ );

$t$  - tempo ( $\text{s}$ ).

## 2 OBJETIVO

O objetivo deste artigo é avaliar as propriedades relacionadas com os mecanismos de transferência de umidade de argamassas contendo cinza pesada oriunda da queima do carvão mineral em substituição ao agregado natural.

## 3 METODOLOGIA

### 3.1 Materiais utilizados

Os materiais empregados na presente pesquisa são:

- cimento Portland composto com adição de filler calcário, CP-II-F, classe 32, com massa unitária de 1,08 kg/dm<sup>3</sup>;
- cal hidratada classificada pela NBR7175/1992 como tipo CH-III, com massa unitária de 0,77 kg/dm<sup>3</sup>;
- areia natural oriunda de rio enquadrada na Zona 1 (muito fina) pela NBR7217/1983;
- cinza pesada (CZP) da Unidade C do Complexo Termelétrico de Jorge Lacerda, localizado em Capivari de Baixo/SC;
- água.

A caracterização dos lotes do cimento e da cal utilizados foi fornecida pelos fabricantes, conforme apresentado na Tabela 1.

**Tabela 1 - Características dos aglomerantes**

| Cimento                        |                    |       |        |        |        | Cal  |                |                                       |
|--------------------------------|--------------------|-------|--------|--------|--------|--|----------------|---------------------------------------|
| Ensaio físico                  | Unidade            | Média | Desvio | Mínimo | Máximo | Análises   | Resultados (%) | Limites NBR 7175 p/ cales tipo CH III |
| Peneira 200                    | %                  | 2,69  | 0,28   | 2,20   | 2,90   | Perda ao fogo  | 28,40          | -                                     |
| Peneira 325                    | %                  | 11,98 | 0,81   | 11,10  | 13,5   | CO <sub>2</sub>  | 11,80          | inferior a 13,0%                      |
| Blaine                         | m <sup>2</sup> /kg | 3213  | 19,09  | 3190   | 3240   | Água combinada   | 16,50          | -                                     |
| Água de consistência           | %                  | 27,00 | 0,4    | 26,2   | 27,5   | Umidade  | 3,10           | -                                     |
| Início de pega                 | min                | 186   | 10,2   | 170    | 200    | SiO <sub>2</sub> + Rl  | 4,80           | -                                     |
| Fim de pega                    | min                | 248   | 8,9    | 235    | 255    | R <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) | 1,00           | -                                     |
| Expansão à quente              | mm                 | 0,71  | 0,39   | 0,50   | 1,50   | CaO  | 43,80          | -                                     |
| Resistência 28 dias            | MPa                | 0,00  | 0,00   | 0,00   | 0,00   | MgO  | 22,00          | -                                     |
| Massa específica               | g/cm <sup>3</sup>  | 3,09  |        |        |        | Óxidos totais  | 91,90          | superior a 88,0%                      |
| Ensaio químicos                | Unidade            | Média | Desvio | Mínimo | Máximo | Óxidos não hidratados  | 5,80           | inferior a 15,0%                      |
| Perda ao fogo                  | %                  | 5,01  | 0,33   | 4,33   | 5,49   | Retenção de água   | 76,80          | superior a 70,0%                      |
| SiO <sub>2</sub>               | %                  | 18,28 | 0,19   | 18,03  | 18,57  | Capacidade de incorporação de areia  | 1:2,75         | superior a 1:2,20                     |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | %                  | 4,20  | 0,08   | 4,09   | 4,28   | Finura da peneira ABNT 30 (0,6 mm)   | 0,00           | inferior a 0,50%                      |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | %                  | 2,38  | 0,05   | 2,33   | 2,45   | Finura da peneira ABNT 200(0,075 mm)   | 11,50          | inferior a 15,0%                      |
| CaO                            | %                  | 60,46 | 0,24   | 60,06  | 60,7   |  |                |                                       |
| MgO                            | %                  | 4,94  | 0,08   | 4,83   | 5,06   |  |                |                                       |
| CaO livre                      | %                  | 1,52  | 0,25   | 1,15   | 1,88   |  |                |                                       |
| SiO <sub>3</sub>               | %                  | 2,87  | 0,07   | 2,73   | 2,94   |  |                |                                       |
| Resíduo insolúvel              | %                  | 1,24  | 0,22   | 0,88   | 1,45   |  |                |                                       |
| Equação alcalina               | %                  | 0,58  | 0,02   | 0,55   | 0,61   |  |                |                                       |

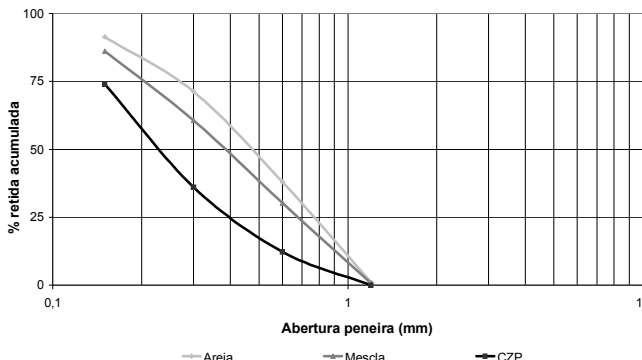
Na Tabela 2 estão sintetizadas as principais características dos agregados (areia e cinza pesada), bem como os ensaios empregados para a caracterização.

**Tabela 2 - Características dos agregados**

| Características                        | Ensaio               | Areia | CZP  |
|--|----------------------|-------|------|
| Módulo de finura                       | NBR7217/83           | 2,02  | 1,22 |
| D50 <sup>(1)</sup> (mm)                | --                   | 0,48  | 0,23 |
| Massa unitária (kg/dm <sup>3</sup> )   | NBR7251/82           | 1,41  | 0,61 |
| Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> ) | Método do Picnômetro | 2,57  | 1,80 |
| Material Pulverulento (%)              | NBR7219/87           | 4,08  | 9,81 |
| Perda de massa ao fogo (%)             | NBR5743/77           | 1,15  | 4,44 |

Nota: (1) D50 é a abertura da peneira correspondente a 50% do material retido acumulado.

No Gráfico 1 são apresentadas as curvas granulométricas da areia e da CZP obtidas experimentalmente, bem como da mescla de 50% de areia e 50% de CZP, em volume, estimada por meio de cálculo (teórica).



**Gráfico 1 - Curvas granulométricas dos agregados das argamassas**

### 3.2 Programa experimental

Foram produzidas argamassas com a formulação base, em volume, constituída de 10,91% de cimento, 30,64% de cal e 58,45% de areia, sendo trabalhados teores de 0, 50 e 100% substituição em volume de areia por cinza pesada, denominadas respectivamente por 0%CZP, 50%CZP e 100%CZP. A relação água/cimento foi de 2,29 para todas as argamassas, através da qual foram obtidas as seguintes medidas de consistência através do ensaio da mesa de espalhamento: 306, 285 e 236 mm, respectivamente para argamassas com 0%, 50% e 100% de cinza pesada.

Esta formulação base, que não é convencional, foi adotada com o objetivo de conferir argamassas confeccionadas com cinza pesada que não apresentassem pulverulência na superfície e fissuras ocasionadas pela perda de água. Pois, em estudos preliminares de formulação verificou-se que os traços convencionais não são os mais adequados para as argamassas com cinza pesada uma vez que estas demandam maiores teores de cal a fim de ficarem mais plásticas.

O procedimento de mistura consistiu na mistura mecânica dos materiais secos (inclusive da cal que, portanto não foi maturada), juntamente com a água, na velocidade baixa durante um minuto. Então, promoveu-se a mistura na velocidade alta por mais um minuto. Desligou-se o misturador e por 30 segundos, com o auxílio de uma espátula, foram removidos materiais segregados das laterais da cuba e da pá para o interior da cuba, deixando a mistura descansar por mais 30 segundos. Logo após esse intervalo, para finalizar a preparação da argamassa, a mistura foi efetuada por mais um minuto em velocidade alta.

As amostras moldadas consistiram em corpos-de-prova cilíndricos nas dimensões de 5x10 cm. O preenchimento dos corpos-de-prova deu-se em três camadas, sendo cada uma destas foi submetida a quinze quedas no adensamento mecânico realizado por meio de mesa de queda livre.

As amostras assim preparadas foram protegidas com filme plástico parafinado e papel alumínio, e mantidas sob condições controladas de umidade e temperatura. Este procedimento de cura teve por objetivo evitar a carbonatação ou qualquer troca gasosa entre a amostra e o meio externo. Para mensurar a eficácia deste procedimento de selagem mediu-se a variação do peso de amostras depois de decorrido um período de 60 dias, e verificou-se que foi inferior a 1%.

Após a cura, as amostras então com 28 dias de idade, foram secas a 50°C em estufa ventilada até a constância de massa.

As propriedades avaliadas nas argamassas com 28 dias de idade, bem como os ensaios realizados nas amostras representativas estão apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3 - Propriedades das argamassas e ensaios realizados**

| <b>Propriedades</b>                      | <b>Ensaio</b>                     |
|--|-----------------------------------|
| <b>Massa específica</b>                  | NBR13280/95 [16] com modificações |
| <b>Porosidade aberta</b>                 | NBR9778/87 [17]                   |
| <b>Absorção de água por capilaridade</b> | Procedimento experimental         |
| <b>Secagem ao ar</b>                     | Procedimento experimental         |
| <b>Isoterma de adsorção</b>              | ASTM C 1498 [18]                  |
| <b>Ângulo de molhamento aparente</b>     | Procedimento experimental         |

As adaptações efetuadas na determinação da massa específica, em relação ao proposto pela NBR13280/95, dizem respeito a determinação do volume da amostra que foi por meio de imersão em mercúrio.

Para determinação da porosidade aberta, que é definida como a razão entre o volume dos poros acessíveis às moléculas de água e o volume total da amostra, foram medidas a massa seca, a massa saturada em água com superfície seca e a massa imersa em água da amostra saturada.

No ensaio para a determinação da absorção de água por capilaridade foi adotado um procedimento utilizado pelo grupo Valores, descrito em Santos (2006), que consiste na medida da variação da altura em função do tempo de uma coluna de água contida em um tubo de Mariotte graduado, sendo que esta variação da altura da coluna de água está diretamente relacionada com a quantidade de água absorvida pela amostra. Logo, a carga hidráulica no tubo é nula. O interessante deste procedimento é a possibilidade da realização de medidas consecutivas para cada unidade de volume ingressado na amostra.

Para o ensaio de secagem ao ar as amostras, previamente saturadas através de imersão em água fria por 72 horas, foram secas em condições controladas de temperatura e umidade relativa ( $T=25\pm3^{\circ}\text{C}$  e  $UR=60\pm5\%$ ). Em tratando-se destas faixas de umidade relativa e temperatura apenas a água capilar e adsorvida presentes na mistura são retiradas.

O ensaio para determinação das isotermas de adsorção consistiu basicamente em colocar uma amostra em uma atmosfera em equilíbrio com uma solução salina saturada com corpo fundo, cuja função era manter a umidade relativa constante. A medida realizada consiste na determinação da quantidade de água adsorvida para diferentes valores de umidade relativa no estado de equilíbrio, sendo que esta é obtida através de método gravimétrico. Neste ensaio foram empregados sete diferentes sais: hidróxido de potássio, acetato de potássio, cloreto de magnésio, dicromato de sódio, nitrito de sódio, cloreto de sódio e sulfato de potássio. Tais sais a temperatura de  $50^{\circ}\text{C}$  forneceram os seguintes valores de umidade relativa (UR): 6, 20, 31, 47, 65, 76 e 96%, respectivamente.

Para determinação do ângulo de molhamento aparente foi utilizado o mesmo aparato do ensaio de absorção de água por capilaridade. A única modificação consiste na substituição da água destilada e deionizada por álcool etílico. Quanto as amostras, foram as mesmas utilizadas no ensaio de absorção capilar com água e encontravam-se inicialmente secas.

## **4 ANÁLISE DE RESULTADOS**

Para uma melhor análise dos resultados determinou-se estatisticamente, através da análise de variância (ANOVA) dos resultados, se a cinza pesada é um parâmetro que influi significativamente, com 95% de confiabilidade, nas propriedades analisadas das argamassas.

Desta maneira, foi possível comprovar estatisticamente que a cinza pesada é um parâmetro que afeta significativamente as propriedades analisadas, exceto o ângulo de molhamento aparente.

#### 4.1 Propriedades físicas das argamassas

O emprego da cinza pesada como agregado acarreta em uma redução da massa específica da argamassa no estado endurecido, devido a massa específica da cinza pesada ser menor do que a da areia (cerca de 30%).

Já na porosidade aberta verifica-se através de uma relação nítida que quanto maior o teor de CZP maior é a porosidade aberta, sendo que isto mostra que o uso das cinzas pesadas implica em argamassas com maior volume de poros permeáveis.

Estas constatações podem ser feitas através da análise dos resultados apresentados no Gráfico 2, sendo que estes referem-se à média dos valores encontrados para três amostras.

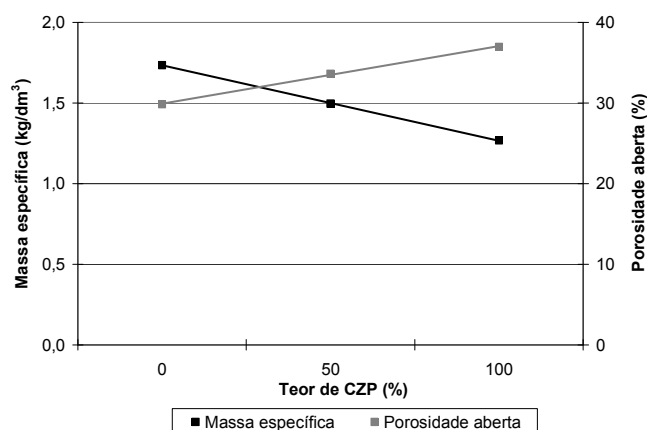


Gráfico 2 - Propriedades físicas das argamassas

#### 4.2 Absorção de água por capilaridade

No Gráfico 3 está apresentada a relação entre o volume de líquido absorvido por área da seção transversal do corpo-de-prova, e a raiz do tempo. Através desta relação, que é linear para tempos iniciais (da ordem de horas), foi obtido o coeficiente de sorptividade (S) fazendo-se uso da Eq. (4).

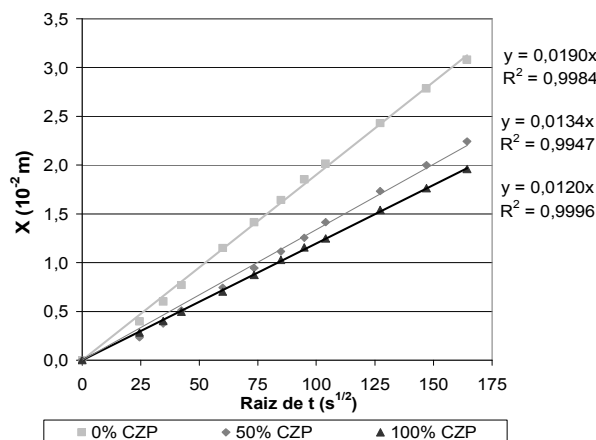


Gráfico 3 - Volume de líquido absorvido por área da seção transversal (X) em função da raiz do tempo



Para as argamassas estudadas constata-se que o emprego da cinza pesada reduz o coeficiente de sorptividade. Isto pode ser decorrente do refinamento dos poros das argamassas com cinza pesada, pois a CZP em função da sua finura promove um efeito filler e do seu potencial pozolânico (CHERIAF; PÉRA; ROCHA, 1999). Além do mais, a natureza porosa da cinza não promoveu um aumento na taxa de absorção de água das argamassas.

### 4.3 Secagem ao ar

Durante o processo de secagem ao ar as argamassas com cinzas, apesar de possuírem maior conteúdo de umidade inicial, apresentaram menor fluxo de secagem e maior conteúdo de umidade residual, conforme apresentado no Gráfico 4.

Isto sugere que as cinzas pioram a comunicação entre os poros. Caso isto de fato ocorra pode ser função do refinamento dos poros e de uma maior quantidade de poros do tipo garganta, que são poros nos quais o diâmetro sofre estrangulamento.

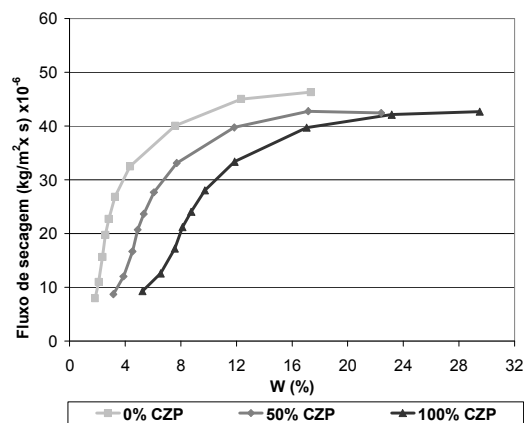


Gráfico 4 - Fluxo de secagem em função do conteúdo de umidade mássico (W)

### 4.4 Adsorção

Os dados experimentais do ensaio de adsorção ajustam-se bem ao modelo GAB em todo o domínio de umidades relativas (correlações variando de 0,9942 a 0,8824). No entanto este ajuste é melhor quanto menor o teor de CZP. No Gráfico 5 são apresentadas as isotermas de adsorção obtidas através deste ajuste juntamente com os pontos experimentais.

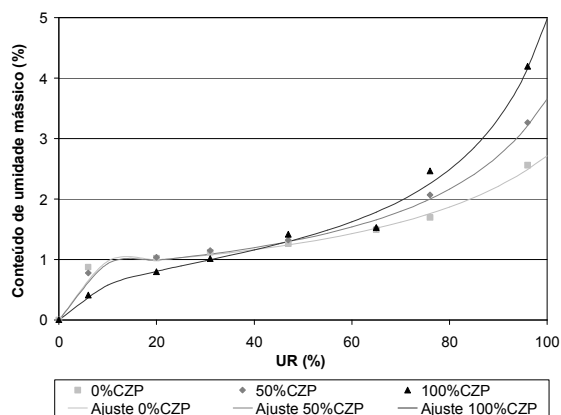


Gráfico 5 - Isotermas de adsorção ajustadas através do modelo GAB

No Gráfico 5 é possível verificar que quanto maior o teor de cinza pesada maior é a quantidade de água adsorvida nas paredes dos poros das argamassas para teores de umidade relativa (UR) elevados. Este aumento pode ser decorrente de um volume maior de microporos (raio inferior a 20 Å) e mesoporos (raio entre 20 e 500 Å), já que para o material com macroporos (raio superior a 500 Å) a adsorção desempenha um papel pouco significativo e a condensação capilar começa apenas para valores de umidade relativa muito próximos de 100%. Em síntese, as diferenças existentes nas isotermas das argamassas revelam diferenças na distribuição de tamanhos de poros e na quantidade destes.

#### 4.5 Ângulo de molhamento aparente

No Gráfico 5 é apresentado o ângulo de molhamento aparente das argamassas em função do teor de CZP. Este foi determinado por meio das Equações (2) e (3).

Através deste é possível observar uma tendência da CZP promover uma redução na molhabilidade (aumento do ângulo de molhamento). Esta redução era esperada em função das argamassas com cinzas no ensaio de absorção de água apresentarem maior tempo de ascensão da franja capilar e menor sorptividade.

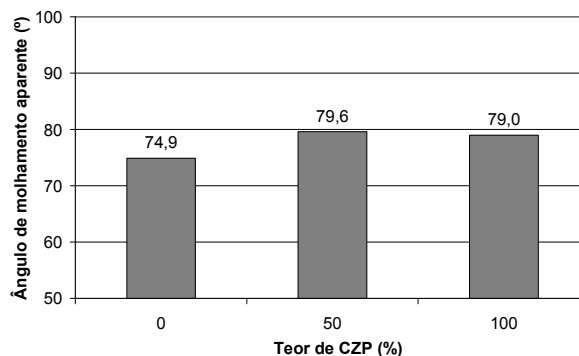


Gráfico 5 - Ângulo de molhamento aparente em função do teor de CZP

## 5 CONCLUSÕES

A cinza pesada promove a redução da massa específica e da sorptividade, e o aumento da porosidade aberta e da adsorção de água para teores elevados de umidade relativa (UR=96%).

Estes efeitos de aumento da porosidade aberta e da adsorção de água são indesejáveis, pois a porosidade, por exemplo, contribui para suscetibilidade da argamassa à ação deletéria de agentes agressivos do meio ambiente, como gases ácidos, material particulado em suspensão no ar, chuvas e ventos fortes e ciclos intensos de molhagem e secagem, e portanto afeta os mecanismos de transferência de umidade e a durabilidade das argamassas.

## 6 BIBLIOGRAFIA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR5743**. Análise química do cimento Portland – Determinação da perda de massa ao Fogo. Rio de Janeiro, 1977

\_\_\_\_. **NBR7175**. Cal hidratada para argamassas. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_. **NBR7217**. Agregados – Determinação da Composição Granulométrica. Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_. **NBR7219**. Determinação do teor de material pulverulento. Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_. **NBR7251**. Agregado em estado solto – Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1982.

\_\_\_\_\_. **NBR9778**. Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_\_. **NBR13280**. Argamassa de assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 1995.

**ASTM C 1498**, Standard test method for hygroscopic sorption isotherms of building materials, 2001.

BARBARE, N.; SHUKLA, A.; BOSE, A., Uptake and loss of water in a cenosphere–concrete composite material, **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 10, pp. 1681-1686, October 2003.

BAROGHEL, B. V.; MAINGUY, M.; LASSABATERE, T.; COUSSY, O. Characterization and identification of equilibrium and transfer moisture properties for ordinary and high-performance cementitious materials, **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 8, pp. 1225-1238, August 1999.

CHERIAF, M., PÉRA, J., ROCHA, J.C. Pozzolan Properties of Pulverized Coal Combustion Bottom Ash. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 9, pp. 1387–1391, 1999.

CHERIAF, M.; ROCHA, J. C. Caracterização dos resíduos industriais do estado de Santa Catarina e as possibilidades de valorização na construção civil. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS, 1º. **Anais...**, Canela, 1997, p. 81-92.

CSTC, Comportement à l'humidité des éléments de construction, application aux toitures, **CSTC**, revue no. 1, Bruxelles, 1982.

FREITAS, V. P.; ABRANTES, V.; CRAUSSE, P. Moisture migration in building walls—Analysis of the interface phenomena, **Building and Environment**, v. 31, n. 2, pp. 99-108, March 1996.

HALL, C. Barrier performance of concrete: a review of fluid transport theory, **Materials and Structures**, n. 27, pp. 291-306, 1994.

KOOI, V. D. **Moisture transport in cellular concrete roofs**, Ph.D. Thesis, University of Technology, Waltman Delft, Netherlands, 1971.

KUMARAN, K.; LACKEY, J.; NORMANDIN, N.; VAN REENEN, D.; TARIKU, F. Heat, Air and Moisture Transport Properties of Several North American Bricks and Mortar Mixes, **Journal of Testing and Evaluation**, v. 32, n. 5, pp. 383-389, 2004.

MARTYS, N. S.; FERRARIS, C. F. Capillary transport in mortars and concrete. **Cement and Concrete Research**, Volume 27, Issue 5, May 1997, p. 747-760

MENDES, N. **Modelos para Previsão da Transferência de Calor e de Umidade em Elementos Porosos de Edificações**. Tese de D.Sc, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil, 1997.

MEROUANI, L. **Phénomènes de sorption et de transfert d'humidité dans des matériaux du bâtiment. Étude expérimentale comparative d'un mortier de ciment et d'un enduit de façade**. Thèse Docteur, 3 Cycle, Institut National Polytechnique de Grenoble, France, 1987.

PAES, I. N. L. **Avaliação do transporte de água em revestimentos de argamassas nos momentos iniciais de pós-aplicação**. Tese (Pós-graduação em Engenharia Civil), Universidade de Brasília, 2004.

PERRIN, B., **Etude des transferts couples de chaleur et de masse dans des matériaux poreux consolidés non saturés utilisés en génie civil**. These Docteur, Université Paul Sabatier de Toulouse, Toulouse, France, 1985.

SANTOS, F. I. G. **Avaliação de propriedades higrotérmicas das argamassas: estudo de caso com a cinza pesada**. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.