

Retração e desenvolvimento de propriedades mecânicas em argamassas de revestimento

Pedro Kopschitz Xavier Bastos

Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, SP
pedrokop@terra.com.br

Charles-Henri Détriché

Université Paul Sabatier, Toulouse, França
detriche@gcil.iut-tlse3.fr

Jean-Paul Balayssac

Université Paul Sabatier, Toulouse, França
balayssa@insa-tlse.fr

Maria Alba Cincotto

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
maria.cincotto@poli.usp.br

Recebido em 05/09/2001; aceito em 21/12/2001

A presente pesquisa aborda a retração e o desenvolvimento de propriedades mecânicas em argamassas mistas de revestimento de cimento, cal e areia, na proporção 1:1:6 em volume e em composições onde é variado o teor de cal. Procurando-se inovar na metodologia adotada, a retração foi observada nos estados fresco e endurecido, em corpos-de-prova de dimensões 400 mm x 150 mm, de espessuras 15 e 25 mm. Os ensaios mecânicos de flexão foram realizados em placas de dimensões 200 mm x 75 mm, espessura 15 mm, medindo-se o deslocamento no meio do corpo-de-prova, durante o carregamento, para o cálculo do módulo de deformação. Sobre os resultados dos ensaios foi analisada a influência dos fatores composição da argamassa, sucção de água pelo substrato e aderência argamassa/substrato. Observou-se também a porosimetria das argamassas com a técnica de intrusão de mercúrio. O conjunto de ensaios da pesquisa mostrou a importância da simulação em laboratório de condições de aplicação da argamassa de revestimento existentes em obra.

Palavras-chave: revestimento, argamassa, retração, resistência à tração, módulo de deformação.

This research discusses shrinkage and the development of mechanical properties in mortars made of cement, lime and sand 1:1:6 (volume), and in compositions with varying content of lime. Technology innovation was sought for in what concerns laboratory tests similar to real rendering conditions. The tests have been carried out in plaque specimens 15 and 25 mm thick. Factors such as mortar composition, water absorption through the basis and mortar/basis adherence, have been taken into account when analysing shrinkage in 400 mm x 150 mm specimens, as well as flexural strength and elasticity modulus. The mechanical tests have been carried out in plaques 200 mm x 75 mm, and the displacement in the centre of the specimen has been measured during loading for calculating elasticity modulus. The porosity of mortars has also been observed through the technique of mercury intrusion. The set of tests in the research showed the importance of laboratory simulation of real rendering conditions.

Keywords: rendering, mortar, shrinkage, flexural strength, elasticity modulus.

Introdução

A simples observação da fachada dos edifícios com revestimento externo em argamassa permite constatar, de um modo geral, que a fissuração é um dos fenômenos patológicos de maior incidência nas construções. A fissuração pode resultar de um ou mais fatores, entre eles a retração da argamassa, gerando tensões por vezes combinadas desfavoravelmente com as propriedades mecânicas resistência à tração e módulo de deformação.

Em pesquisas de argamassa de revestimento no meio técnico-científico nacional, nota-se a carência de metodologia que procure reproduzir em laboratório condições próximas às que são encontradas em obra, quanto à aplicação do material e formato dos corpos-de-prova. Determinadas propriedades costumam ser medidas de forma distante da realidade, tornando difíceis a avaliação do desempenho e a previsão de vida útil do revestimento.

É justamente no estudo da retração e de propriedades mecânicas das argamassas de revestimento que se

encontram duas lacunas na metodologia empregada em laboratório.

Quanto à retração, falta, principalmente em nosso meio, uma metodologia que permita observar o fenômeno com a argamassa no estado fresco; quanto à resistência à tração e o módulo de deformação, a falha está no formato inadequado dos corpos-de-prova. Em ambos os casos, a desconsideração da influência do substrato em que é aplicada a argamassa também compromete os resultados de ensaios, tanto qualitativa quanto quantitativamente.

As publicações sobre argamassa de revestimento das três últimas décadas revelam ser a França o país que mais realizou pesquisas simulando condições reais de aplicação do revestimento. Entre os trabalhos de maior destaque estão os de Détriché (1977, 1983), Tamin (1986) e Ouzit (1990), dos quais podem-se ressaltar como pontos importantes:

- (a) o desenvolvimento de equipamento que permite registrar as deformações da argamassa no estado fresco aplicada em camada única, por Détriché (1977, 1983);
- (b) as conclusões de Tamin (1986) sobre relaxação de tensões devido à microfissuração;
- (c) a técnica de moldagem de uma camada de argamassa sobre uma grelha metálica para obter o efeito da aderência e medir a retração impedida, desenvolvida por Ouzit (1990).

Com o objetivo de contribuir para o preenchimento das lacunas mencionadas, idealizou-se um programa experimental para argamassas de cimento, cal e areia, que incluiu alguns dos ensaios dos autores citados e procurou inovar em outros (BASTOS, 2001). Apresenta-se a seguir a metodologia adotada e os principais resultados da pesquisa.

Casos de aplicação de argamassa

Procurou-se observar o desempenho do revestimento quanto à retração e propriedades mecânicas considerando as situações:

- (a) sem influência da base;
- (b) sob influência da aderência à base;
- (c) sob influência da aderência e da ação da base quanto à sucção de água, simultaneamente.

Desta forma, foram estudadas as seguintes condições de aplicação de argamassa (Figura 1):

- I. sobre base não absorvente (fundo do molde);
- II. sobre base não absorvente, com grelha metálica sobre o fundo do molde para obtenção do efeito de aderência;
- III. sobre base porosa (bloco cerâmico).

Metodologia, materiais e argamassas estudadas

Retração no estado fresco

A unidade básica do equipamento de medida da retração no estado fresco utilizado é composta de três partes principais (Figura 2):

- (a) molde de aço inoxidável que permite a moldagem de placas de argamassa de dimensões 400 mm x 150 mm e espessuras de 15 a 25 mm;
- (b) dois conjuntos grelha/haste metálica;
- (c) dois captores de deformação do tipo digital, de curso máximo 2,5 mm e precisão 0,001 mm.

A retração é registrada linearmente, captando-se o deslocamento dos dois conjuntos grelha/haste, posicionados nas extremidades do molde e envolvidos pela argamassa na operação de moldagem.

Os captores de deformação funcionam ligados a um computador e a aquisição de dados do ensaio foi feita a cada 20 segundos, por meio do programa Orbit Excel. A retração, em mm/m, em cada intervalo de 20 s, foi calculada dividindo-se a soma dos deslocamentos dos dois captores pela distância entre o centro das duas grelhas, igual a 0,32 m. Este equipamento foi originalmente desenvolvido no *Institut National des Sciences Appliquées* - INSA de Toulouse, França (DÉTRICHÉ, 1977, 1983), e teve ampliadas, em novo modelo da Escola Politécnica da USP (EPUSP), suas condições de uso em laboratório, como no caso do ensaio de argamassa aplicada diretamente sobre base absorvente (bloco cerâmico).

As paredes internas do equipamento foram preparadas com uma fina película de óleo mineral, a fim de diminuir o atrito argamassa/molde. Para o caso do ensaio sobre base absorvente, uma folha plástica semi-rígida, de espessura 0,2 mm, foi posicionada sobre o componente de alvenaria. Ao ser retirada, após o lançamento da argamassa, a sucção de água pelo bloco ocorreu uniformemente. A argamassa foi aplicada em camada única, sem compactação, apenas espalhada com colher de pedreiro, sob leve pressão - primeiramente nas extremidades e, em seguida, na parte central do molde. Imediatamente após a colagem dos captores às hastes metálicas, e antes de se iniciar o registro da retração no computador, a superfície da argamassa recebeu acabamento liso com a colher.

Com relação às condições de aplicação das argamassas, os casos I, II e III estão apresentados no item anterior. No Caso III, a argamassa foi aplicada sobre bloco cerâmico vazado, de textura superficial, com ranhuras longitudinais (ver absorção de água nas Figuras 17 e 18).

As condições de umidade do bloco cerâmico para aplicação da argamassa foram as seguintes:

- (a) bloco com 0% de umidade: secagem em estufa a 100 °C durante 24 horas, período após o qual foi obtida constância de massa na secagem;

(b) bloco com 50% de umidade: imersão em água por 5 minutos, tempo extraído da curva de ganho de massa do material por absorção, obtida em laboratório com uma amostra de 6 blocos;

(c) bloco com 100% de umidade: imersão em água por 24 horas.

As espessuras da camada de argamassa foram de 15 e 25 mm. As posições dos captosres foram as seguintes:

(a) para os ensaios com camada de 15 mm de espessura, os captosres foram posicionados a 5 mm do fundo do molde;

(b) para camada com 25mm de espessura sobre bloco cerâmico, os captosres foram posicionados em dois planos horizontais paralelos - a 5mm do fundo do molde e a 5 mm da superfície da argamassa exposta ao ar.

A medida da retração foi iniciada, no computador, em todos os ensaios, 15 minutos após o contato dos materiais secos com a água na argamassadeira. O tempo total de registro de deformações foi de 24 horas.

Ensaio mecânicos

Foi desenvolvida metodologia que consistiu em confecção de fôrmas para aplicação da argamassa sobre base não absorvente (fundo do molde) e diretamente sobre bloco cerâmico, em formato de pequenas placas. As fôrmas de PVC possibilitaram a moldagem de 4 corpos-de-prova por bloco de 200 mm x 75 mm e de espessura 15 mm. Um papel-filtro foi colocado sobre o bloco, permitindo a sucção de água e a liberação dos corpos-de-prova da base para os ensaios mecânicos, 24 horas após a moldagem.

As formas foram preenchidas com argamassa em camada única, para fabricação de corpos-de-prova de 15 mm de espessura. Após a colocação de uma quantidade de argamassa que ultrapassava um pouco o nível desejado na forma, foram aplicados, manualmente, 30 golpes sobre esta camada com um soquete metálico cilíndrico de acabamento liso,¹ espalhados uniformemente na argamassa fresca. O excesso de argamassa foi retirado com o movimento de vai-e-vem de um gabarito - pequena peça confeccionada em PVC, apoiada nas bordas do molde. Em seguida, o molde com argamassa foi posicionado sobre uma mesa vibratória, para adensamento da argamassa até o nivelamento e a retirada de bolhas de ar de seu interior (tempo de vibração igual a 1 minuto, frequência de vibração 70 ciclos/s). O acabamento da superfície foi feito com uma espátula, passada sobre a superfície da argamassa para torná-la lisa, sem aplicação de pressão, em movimento longitudinal de ida e volta.

A Figura 3 mostra o conjunto bloco-forma-argamassa e a operação de desmoldagem.

Os ensaios de flexão foram realizados aplicando-se carga a uma velocidade de 0,02 kN/minuto, no meio do corpo-de-prova bi-apoiado, com distância entre os apoios igual a 160 mm.

A prensa Instron utilizada no ensaio de flexão permitiu medir, durante o carregamento, o deslocamento (flecha) no meio do vão entre os apoios do corpo-de-prova, usado para o cálculo do módulo de deformação da argamassa, a partir da relação entre *tensão de tração na flexão (MPa)* e *deformação (mm/mm)*. A tensão no regime elástico-linear é dada (TIMOSHENKO; GERE, 1983; GERE; WEAVER, 1981) por

$$\rho = \frac{1,5PL}{bh^2} \quad (1)$$

Por sua vez, o módulo de deformação, em função da flecha, considerando-se o mesmo regime, é dado por

$$E = \frac{PL^3}{4\epsilon bh^3} \quad (2)$$

Onde:

E = módulo de deformação (MPa)

P = carga aplicada no meio do corpo-de-prova (N)

L = distância entre os apoios (160 mm)

b = maior lado da seção transversal do corpo-de-prova (mm)

h = espessura do corpo-de-prova (mm)

ϵ = deslocamento (flecha) no meio do corpo-de-prova, medido no ensaio de flexão (mm)

Como, na realidade, não houve proporcionalidade na relação tensão/deformação do ensaio de flexão das argamassas ao longo de todo o carregamento, tornou-se necessário fixar alguns parâmetros e adotar simplificações no cálculo do módulo. Foi adotado o Módulo Corda para representar a deformabilidade das argamassas, que é dado pela declividade da reta traçada entre dois pontos da curva *tensão x deformação* (MEHTA; MONTEIRO, 1994). Adotando-se os pontos correspondentes a 5% e 30% da tensão de ruptura (Figura 4), o Módulo Corda foi calculado pela expressão

$$E_c = \frac{\rho_{30} - \rho_5}{\epsilon_{30} - \epsilon_5} \quad (3)$$

Onde:

E_c = módulo corda (MPa)

ρ_i = tensão de tração na flexão igual a "i" % da tensão de ruptura (MPa)

ϵ_i = deformação longitudinal específica de tração (mm/mm) no corpo-de-prova na posição mais distante da linha-neutra, no meio do vão entre os apoios, ocorrida para a tensão de tração na flexão igual a "i" % da tensão de ruptura

A deformação ϵ_i foi calculada nos pontos correspondentes a 5% e 30% da carga de ruptura pela relação $\epsilon = \rho/E$, sendo $\rho = 1,5 PL/bh^2$ e $E = PL^3/4\epsilon bh^3$ (expressões já mencionadas). Para cada corpo-de-prova (6 a 8 em cada

¹ Mesmo soquete usado em moldagem de corpos-de-prova para determinação da resistência à compressão de cimento Portland - NBR 7215/96.

idade, para cada caso de aplicação da argamassa) foi montada uma seqüência de cálculos como a da Tabela 1. Foram medidas as propriedades mecânicas resistência à tração na flexão e módulo de deformação da argamassa

1:1:6 aplicada nas condições dos casos I e III, espessura 15 mm, aos 3, 7, 14 e 28 dias de idade. Os resultados de cada caso representam a média de oito corpos-de-prova por idade.

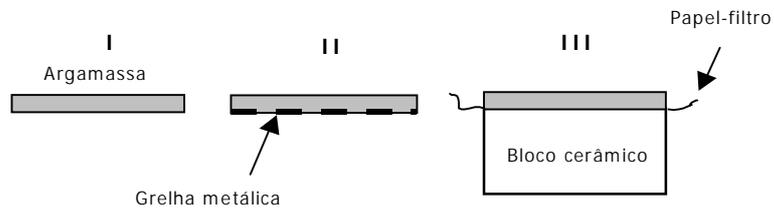


Figura 1 - Casos de aplicação de argamassa estudados

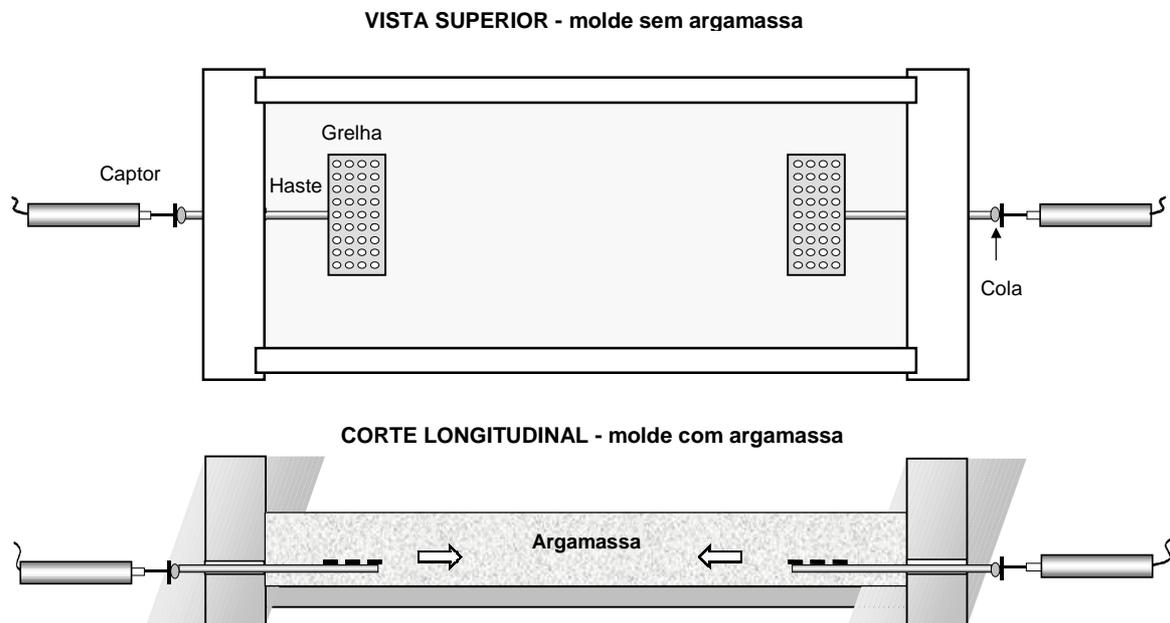
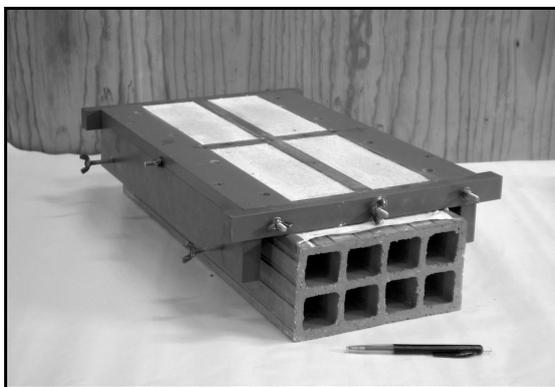


Figura 2 - Equipamento de medida de retração de argamassa no estado fresco desenvolvido no INSA de Toulouse (desenho esquemático)



(a)



(b)

Figura 3 - Fotografia do conjunto bloco-molde-argamassa dos ensaios mecânicos (a) e da operação de desmoldagem (b)

Porosimetria

Os ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio foram realizados com o intuito de observar a microestrutura das argamassas quanto ao efeito provocado pelas alterações de composição e pela perda de água por sucção, quando da aplicação sobre base porosa. Foi utilizado o porosímetro Autopore II 9220 (versão 3.03), marca Micromeritics (ver parâmetros de ensaio adotados na Tabela 2).

A técnica de intrusão de mercúrio, embora limitada em determinados aspectos, como a impossibilidade de se atingir os poros fechados do material, é válida para efeito de comparação entre resultados obtidos em amostras de mesma natureza.

As argamassas ensaiadas foram preparadas na EPUSP. Foram analisados os casos I (base não absorvente) e III (sobre bloco cerâmico) de aplicação das argamassas 1:1:6 e Cal 60. No caso III, variou-se o teor de umidade do bloco cerâmico: 0%, 50% e saturado.

As amostras para o ensaio de porosimetria foram retiradas de corpos-de-prova de argamassa endurecida de dimensões 200 mmx75 mmx15 mm, moldados segundo o mesmo procedimento descrito para os ensaios mecânicos. Os pequenos pedaços de argamassa provieram de uma posição central das placas de argamassa, partidas manualmente até obtenção de uma amostra de cerca de 1cm³. Para cada argamassa e cada condição de aplicação foram analisadas duas amostras, retiradas de duas placas diferentes.

O preparo das amostras envolveu os seguintes passos:

- idade e cura dos corpos-de-prova: 28 dias em câmara seca (24°C e 50% U. R.);
- 28º dia: retirada das amostras das placas e imersão das amostras em álcool isopropílico;
- permanência das amostras no álcool isopropílico: 20 dias;
- após retirada do álcool: secagem em estufa a 100°C, a vácuo, por 24 horas;
- após retirada da estufa: embalagem em papel alumínio e armazenagem em dessecador com 20% de umidade relativa, até o ensaio no porosímetro por intrusão de mercúrio.

Materiais

Os materiais empregados foram os seguintes:

Cimento: Portland CPJ CEM II/B 32,5 R² (norma francesa/européia NF EN 197-1 – *Ciment - Partie 1*:

Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants) e Portland Corpo-de-prova II E 32 (NBR 5732/91 – ABNT – *Cimento Portland comum*).

Cal: CH I (NBR 7175/92 – ABNT – *Cal hidratada para argamassas*) e CL 90³ (norma francesa NF P15-311 – *Chaux de construction – Définitions, spécifications et critères de conformité*).

Areia: areia normal do IPT e areia especificada na norma francesa/européia NF EN 196-1 – *Méthodes d'essais des ciments – Partie 1: détermination des résistances mécaniques* (1995) (a composição granulométrica está apresentada na Figura 16).

Composição das argamassas

As variações de composição das argamassas foram feitas a partir da argamassa de referência 1:1:6, proporções em volume. As proporções em massa foram calculadas a partir da massa unitária dos materiais constituintes – 1:0,44:7,50:1,17 (argamassas do INSA) e 1:0,44:7,50:1,50 (argamassas da EPUSP). Ao variar o teor de cal, mantendo-se a quantidade de água total original da mistura de referência, criou-se um grupo de argamassas de relações *cal/aglomerantes*, em massa, iguais a 0,30 (argamassa 1:1:6), 0,45 e 0,60. As argamassas foram denominadas 1:1:6, Cal 45 e Cal 60.

Consistência das argamassas

Tanto no INSA quanto na EPUSP, a quantidade de água da mistura de referência foi a necessária à obtenção da consistência para aplicação em obra. A medida de consistência das argamassas na EPUSP foi obtida na mesa ABNT, pelo procedimento de ensaio da NBR 7215/96 – *Cimento Portland – determinação da resistência à compressão*; no INSA o método utilizado foi o das normas francesas NF P 18 452/1988 – *Bétons – Mesure du temps d'écoulement des bétons et des mortiers aux maniabilimètres* e NF P 15 437/1987 – *Liants hydrauliques – Technique des essais – Caractérisation des ciments par mesure de la fluidité sous vibration des mortiers* (DUPAIN et al., 1995). Nota-se na Tabela 3 que, com o aumento do teor de cal, as argamassas tornaram-se menos fluidas.

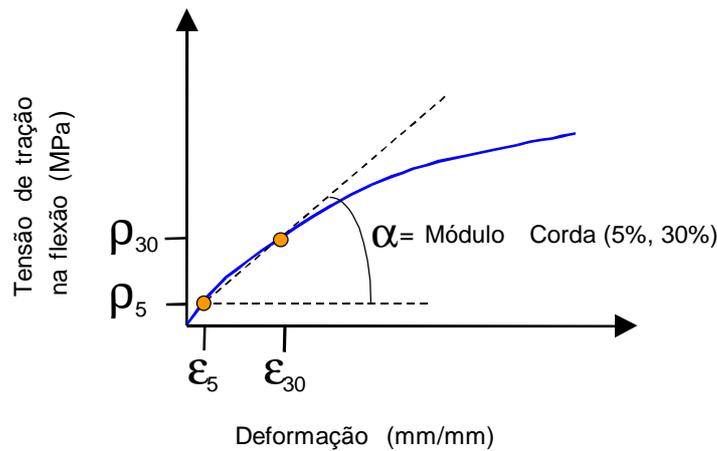
Condições de cura

Todas as argamassas ficaram expostas à condição de 24 °C de temperatura e umidade relativa de 50%, em câmara seca.

² Cimento CPJ - CEM II/B 32,5 R: O cimento composto CPJ - CEM II/B tem de 65% a 79% de clínquer. O restante é composto de um ou mais constituintes (cinzas volantes silicosas, cinzas volantes cálcicas, escória granulada de alto-forno, pozolanas naturais, calcários, xistos calcinados, filers). As normas francesas NF P 15-301 e NF EN 196-1 classificam os cimentos segundo sua resistência à compressão em corpo-de-prova de argamassa. Esta classificação existe tanto para 28 dias, quanto para 2

dias. Para a idade de 28 dias existem 3 classes de resistência, diferenciadas por seu valor característico inferior, em MPa: 32,5 – 42,5 – 52,5. Para cada classe de resistência aos 28 dias existem duas classes de resistência aos 2 dias, chamadas *normal* e *elevada*, a segunda sendo distinguida pela letra **R**, de *rapide*, após a indicação da classe de resistência aos 28 dias (por exemplo, 32,5 R). O cimento 32,5 R deve ter resistência mínima garantida de 12 MPa aos 2 dias e uma resistência mínima característica de 32,5 MPa aos 28 dias.

³ Cal CL 90 (Norma Européia ENV459:1:1994): A sigla *CL* vem de "calcique lime" e 90 representa a porcentagem mínima, em massa, de CaO + MgO.



Observações: O traçado da reta passa nos pontos correspondentes a 5% e 30% da tensão de ruptura. A declividade α corresponde ao Módulo Corda

Figura 4 - Curva tensão x deformação longitudinal de tração no corpo-de-prova na posição mais distante da linha-neutra

% da carga de ruptura	Carga (kN)	Tensão (MPa) $\rho = 1,5 PL/bh^2$	Deslocamento (flecha) no meio do vão (mm) ϵ	Deformação (mm/mm) $\epsilon_i = \rho_i/E_i$	Módulo Corda 5%-30% (MPa) $E_c = (\rho_{30} - \rho_5)/(\epsilon_{30} - \epsilon_5)$
5	0,001981	0,02817	0,00096	0,000003	4045,70
30	0,011886	0,16905	0,01087	0,000038	

Tabela 2 - Exemplo de cálculo do Módulo Corda de um corpo-de-prova de argamassa

POROSÍMETRO AUTOPORE II 9220 (VERSÃO 3.03), DA MICROMETRICS		
Baixa pressão	Pressão de vácuo	50 μHg
	Tempo de vácuo	5 min
	Pressão de mercúrio	0,50 psia
	Tempo de equilíbrio	15 s
Alta pressão	Tempo de equilíbrio	15 s
Pressão máxima	60 000 psi (= 414 MPa)	
Ângulo de contato	130 °	
Tensão superficial do mercúrio	485 dyn/cm	
Densidade do mercúrio	13,5335 g/ml	

Tabela 3 - Parâmetros adotados nos ensaios de porosimetria

Resultados e análise dos resultados

Como os ensaios foram realizados em dois laboratórios – INSA de Toulouse e Escola Politécnica da USP – indica-se, na legenda das figuras dos resultados, o local de realização dos experimentos.

Retração no estado fresco

A seguir, primeiramente são apresentados resultados de medidas até 24 horas dos ensaios de argamassas aplicadas

em espessura de 15 mm, em que foi observada a retração com os captadores a 5 mm do fundo do molde. O registro da retração foi iniciado 15 minutos após o contato dos aglomerantes com a água na argamassadeira.

Argamassa aplicada sobre base não absorvente

A curva de retração das argamassas aplicadas sobre base não absorvente apresentou três estágios – Primeira Retração, Período de Estabilização das deformações e Segunda Retração (Figura 5). Tendo sido observado que o intervalo de tempo compreendido entre o início e o fim de

pega da pasta da argamassa 1:1:6 está posicionado dentro do Período de Estabilização, confirmaram-se, para argamassas mistas, as conclusões de Détriché (1977) para argamassas cimento/areia: o fim da Primeira Retração coincide com a diminuição de deformabilidade da pasta e o início da Segunda Retração se dá com o material no estado endurecido. O Período de Estabilização das deformações resulta do somatório do efeito de expansão, de origem química, provocado pela formação de hidratos, e do efeito da retração por secagem. Depende, portanto, da composição do cimento e das condições de exposição da argamassa.

A Figura 6 mostra as curvas de retração até 24 horas das argamassas 1:1:6, Cal 45 e Cal 60.

Ao aumento do teor de cal correspondeu o aumento da retração, principalmente da Segunda Retração. A reconhecida capacidade de retenção de água da cal não foi capaz de impedir que outros fatores tivessem maior influência na ocorrência da retração, a saber:

- a maior deformabilidade da argamassa devido à diminuição da quantidade de cimento;
- a diminuição dos espaços entre as partículas sólidas da mistura causada pela presença da cal, de maior finura que o cimento, fazendo com que a saída de água (a uma velocidade muito próxima para todas argamassas a partir da primeira hora de secagem) se desse com aumento de tensão capilar.

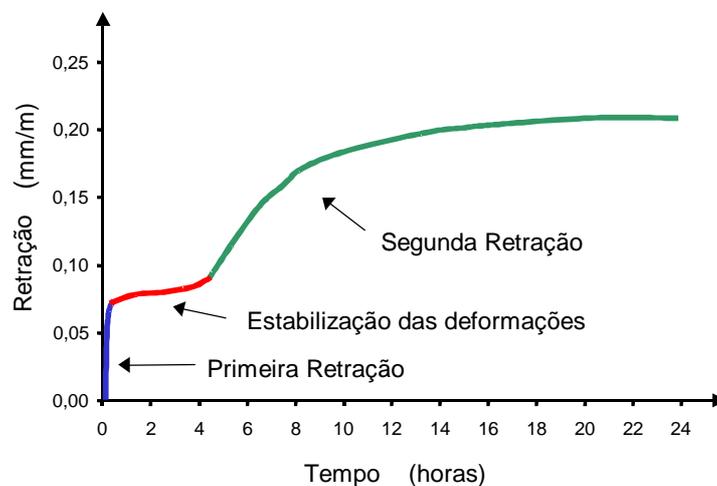


Figura 5 - Curva de retração no estado fresco, até 24 horas, da argamassa 1:1:6, espessura 15 mm, aplicada sobre base não absorvente (INSA)

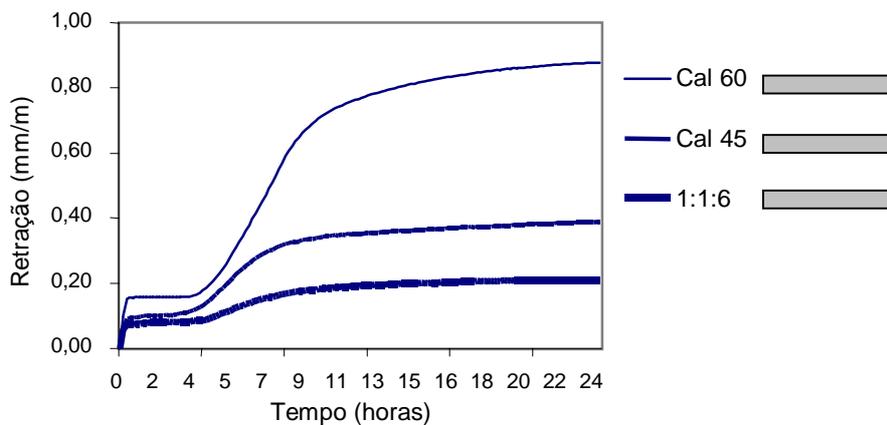


Figura 6 - Retração no estado fresco, até 24 horas, das argamassas 1:1:6, Cal 45 e Cal 60, espessura 15 mm, aplicadas sobre base não-absorvente (INSA)

Argamassa aplicada sobre grelha metálica

A aplicação da argamassa na condição do Caso II permitiu observar a influência exercida pela aderência no sentido de bloquear a retração no estado endurecido, ou seja, impedir a ocorrência da Segunda Retração (Figura 7). Deste resultado depreendeu-se: em base não-absorvente, enquanto existiu mobilidade entre as partículas sólidas da mistura, a deformação da argamassa ocorreu de forma independente do tipo de superfície onde esteve aplicada – se lisa ou de natureza propícia à adesão.

A influência do tipo de base ficou ressaltada apenas depois do enrijecimento da argamassa, após o fim de pega da pasta, revelando a fase da evolução das deformações em que ocorreu o impedimento da retração.

Observou-se, levando-se em conta o efeito da aderência na Segunda Retração, a partir de que ponto da curva *Retração x Tempo* tornam-se mais importantes avaliações a respeito da fissuração. Antes da pega da pasta, o nível de tensões gerado pela retração não oferece risco quanto a este aspecto, uma vez que o material possui um grau de deformabilidade em virtude do qual a livre deformação não é impedida pela base.

Argamassa aplicada sobre bloco cerâmico

Apresentam-se, na Figura 8, os resultados dos ensaios das argamassas 1:1:6, Cal 45 e Cal 60 aplicadas sobre bloco cerâmico seco, a respeito dos quais destacam-se as seguintes observações:

(a) o aspecto das curvas de retração até 24 horas manteve-se semelhante ao do caso da argamassa aplicada sobre grelha metálica, ou seja, sem ocorrência da Segunda Retração devido à aderência à base. A amplitude das deformações, no entanto, aumentou consideravelmente por causa da sucção de água da argamassa exercida pelo substrato poroso seco.

(b) as curvas mostram a mesma tendência dos resultados dos ensaios sobre base não absorvente: a retração aumentou com o aumento do teor de cal. Também nesta condição de aplicação, o efeito da tensão capilar, maior devido ao aumento de partículas finas na mistura fresca, superou a capacidade de retenção de água da cal.

A argamassa 1:1:6 também foi aplicada sobre blocos com diferentes teores de umidade: 0%, 50% e 100%.

A Figura 9 mostra que o pré-umedecimento do substrato exerceu grande influência no sentido de diminuir a retração nas primeiras horas após o contato da argamassa com a base.

Medida da retração em dois planos horizontais, com argamassa sobre bloco cerâmico:

Ressaltam-se, para este experimento, com a aplicação da argamassa 1:1:6 em camada de 25 mm sobre bloco cerâmico, os seguintes resultados:

(a) bloco com 0% de umidade: a retração foi maior na interface argamassa/base;

(b) bloco com 100% de umidade: a retração foi maior na superfície exposta ao ar;

(c) bloco com 50% de umidade: houve equilíbrio na perda de água por evaporação e por sucção, e a conseqüente uniformidade na retração ocorrida na superfície e na interface argamassa/base (Figura 10).

Resistência à tração na flexão e módulo de deformação

Na Figura 11 apresentam-se os resultados de resistência à tração da argamassa aplicada com 15 mm de espessura (cada ponto das curvas representa a média dos resultados de oito corpos-de-prova). Devido à sucção de água pela base, houve aumento de resistência à tração em todas as idades; quanto mais intensa a sucção, maior foi a resistência mecânica.

De um modo geral, nas diversas idades de ensaio, a influência da sucção significou dobrar a resistência mecânica da argamassa. Este efeito é devido ao adensamento mecânico da argamassa promovido pela sucção da água, ocasionando maior área de contato e ligação íntima entre as partes sólidas da mistura.

O resultado dos cálculos mostrou aumento do módulo de deformação com a sucção de água em todas as idades, a exemplo do que ocorreu com a tensão de tração na flexão (Figura 12).

Porosimetria

Os resultados dos ensaios de intrusão de mercúrio são apresentados de duas formas:

(a) curva *Volume de mercúrio x Diâmetro dos poros*: indica, pelo volume de mercúrio intrudido, a quantidade de poros de um determinado diâmetro;

(b) curva *Volume de mercúrio acumulado x Diâmetro dos poros*: indica a quantidade total de mercúrio intrudido, por unidade de massa da amostra, a um determinado nível de pressão atingido durante o ensaio, representando a porosidade do material até o diâmetro de poro correspondente. Ao final do ensaio, o gráfico mostra a porosidade total da amostra, por unidade de massa.

A seguir é analisada a influência, sobre a porosidade, dos fatores *teor de cal e sucção de água pela base*. As curvas representam a média de dois ensaios (duas amostras) por argamassa e por condição de aplicação.

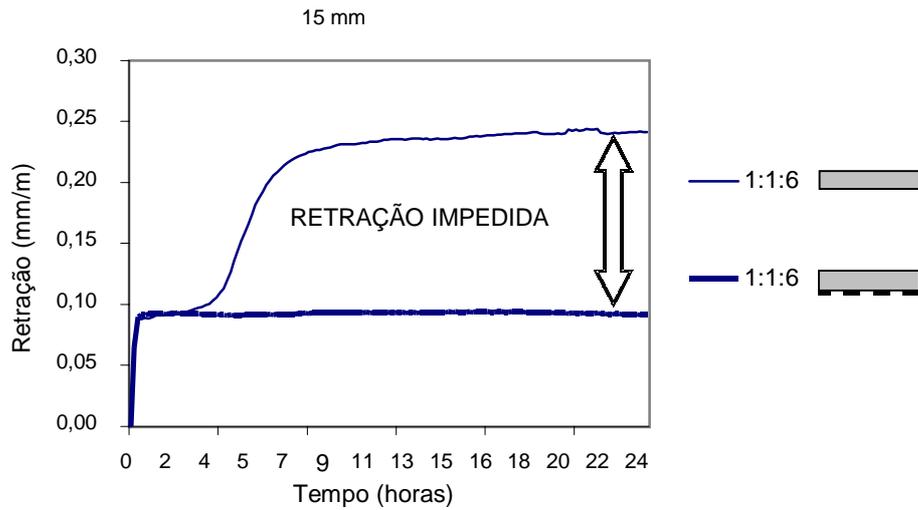


Figura 7 - Retração impedida – ensaio de retração da argamassa 1:1:6 no estado fresco, até 24 horas, aplicada com espessura de 15 mm sobre base não-absorvente com grelha metálica (INSA)

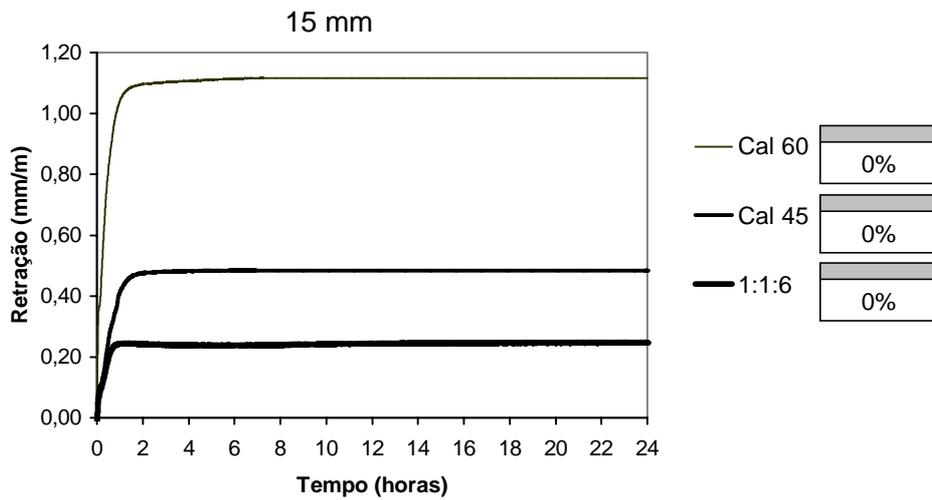


Figura 8 - Retração no estado fresco, até 24 horas, das argamassas 1:1:6, Cal 45 e Cal 60, espessura 15 mm, aplicadas sobre bloco cerâmico com teor de umidade 0% (EPUSP)

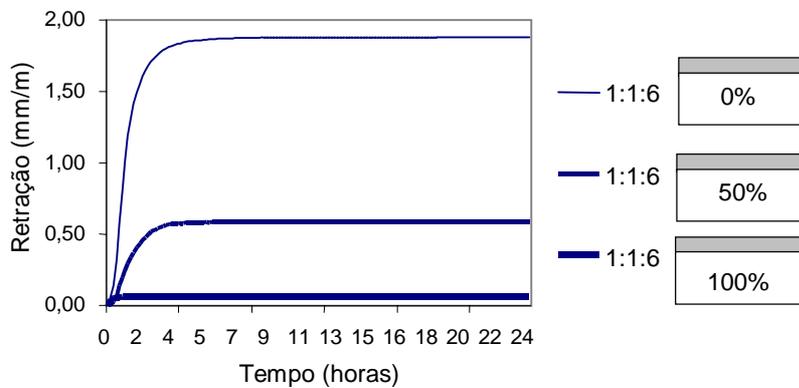


Figura 9 - Retração da argamassa 1:1:6, espessura 15 mm, aplicada sobre bloco cerâmico com três teores de umidade diferentes (INSA)

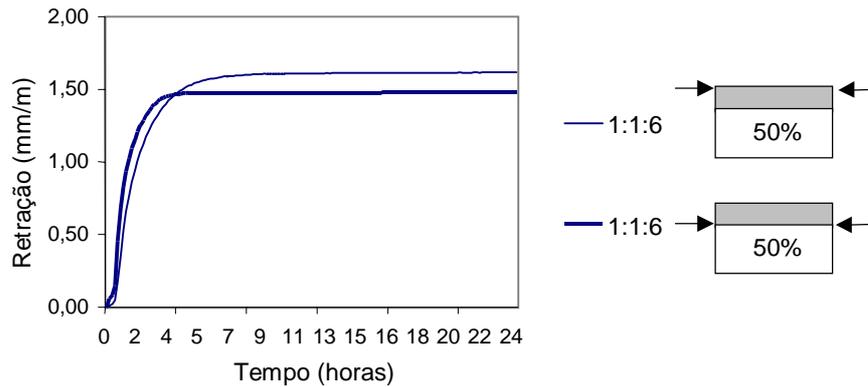


Figura 10 - Retração da argamassa 1:1:6, espessura 25 mm, aplicada sobre bloco cerâmico com 50% de umidade, medida na interface argamassa/base e na superfície exposta ao ar (INSA)

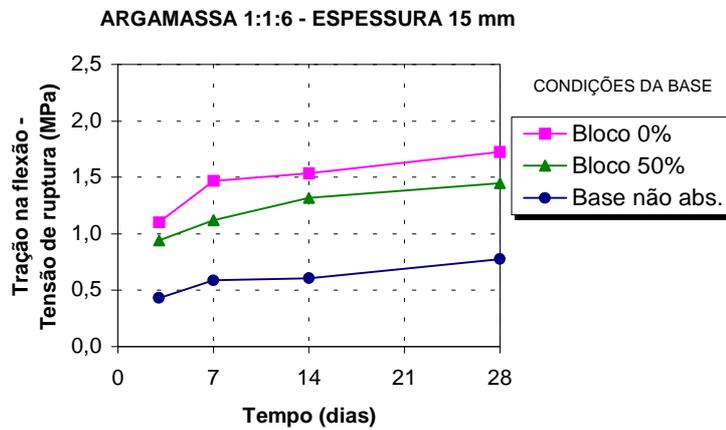


Figura 11 - Resultados do ensaio de tração na flexão de argamassa aplicada sobre bloco cerâmico em três condições de umidade, aos 3, 7, 14 e 28 dias de idade (EPUSP)

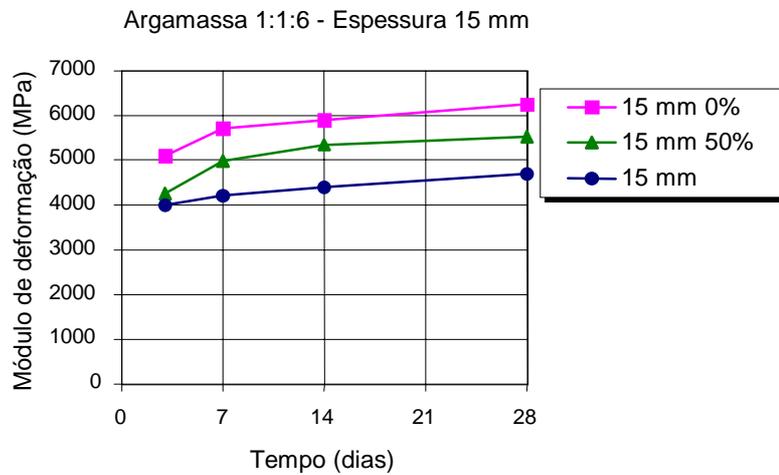


Figura 12 - Resultados do cálculo do módulo de deformação da argamassa 1:1:6, espessura 15 mm, aplicada sobre base absorvente com três teores de umidade (EPUSP)

Influência do teor de cal

A Figura 13 mostra uma distribuição de tamanhos de poros diferente para as argamassas 1:1:6 e Cal 60 – com a adição de cal houve um aumento da quantidade de poros de diâmetros próximos a 0,8 μm e diminuição da quantidade de poros iguais ou maiores que 1,0 μm . O aumento do teor de cal também significou a diminuição da porosidade total, como mostra a curva de volume total de poros da argamassa Cal 60 ao final do ensaio.

Com as argamassas 1:1:6 e Cal 60 aplicadas sobre bloco cerâmico seco, a posição das curvas de porosidade total se inverteu: a porosidade total foi maior para a argamassa Cal 60 (Figura 14). Nesta condição de aplicação parece ter havido influência da capacidade de retenção de água da cal sobre a porosidade total da argamassa, ou seja, a quantidade de água inicialmente retida resultou em maior volume de vazios na pasta endurecida.

Influência da sucção de água pela base

Nos gráficos da Figura 15 observa-se a diminuição do volume de poros de diâmetro compreendido entre 0,8 e 5,0 μm , devida à perda de água por sucção ocorrida na argamassa 1:1:6 aplicada sobre bloco cerâmico, em comparação com o perfil da distribuição de poros da mesma argamassa aplicada sobre base não absorvente. A curva de volume de mercúrio acumulado mostra o efeito de diminuição do volume total de poros provocado pela sucção de água pela base, tanto no caso de aplicação sobre bloco seco, como sobre bloco com 50% de umidade. Esta posição relativa das curvas confirma o adensamento mecânico exercido sobre a argamassa fresca pela sucção, efeito que provocou aumento da resistência à tração na flexão e do módulo de deformação da argamassa 1:1:6.

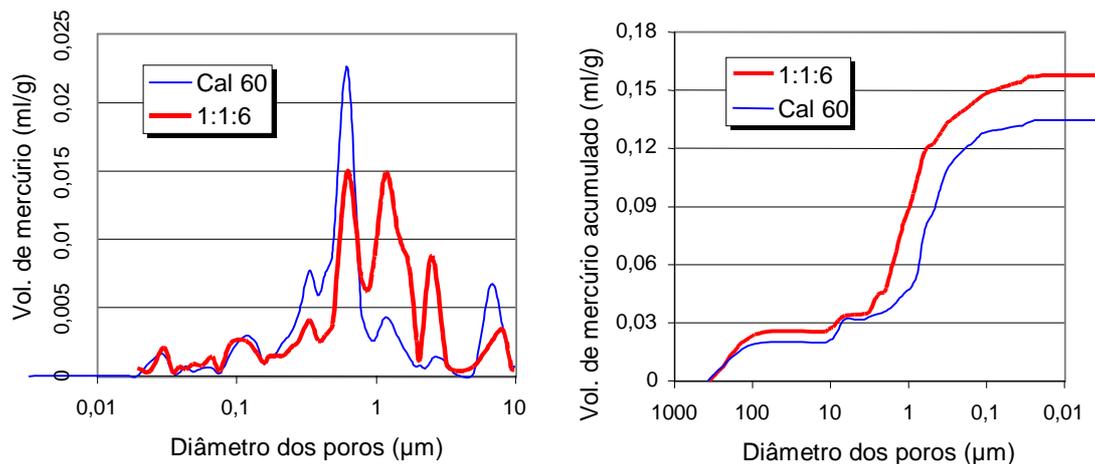


Figura 13 - Distribuição dos tamanhos de poros e volume de poros acumulado - argamassas 1:1:6 e Cal 60 (EPUSP)

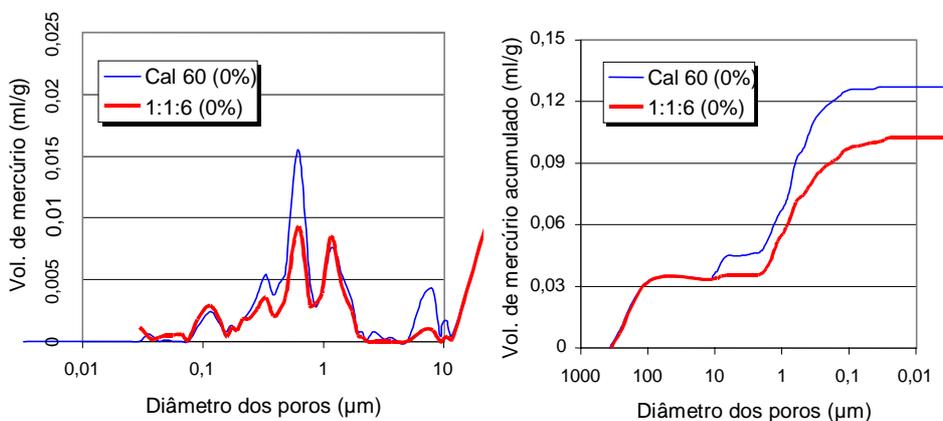


Figura 14 - Distribuição dos tamanhos de poros e volume de poros acumulado – argamassas 1:1:6 e Cal 60, aplicadas sobre bloco cerâmico seco (EPUSP)

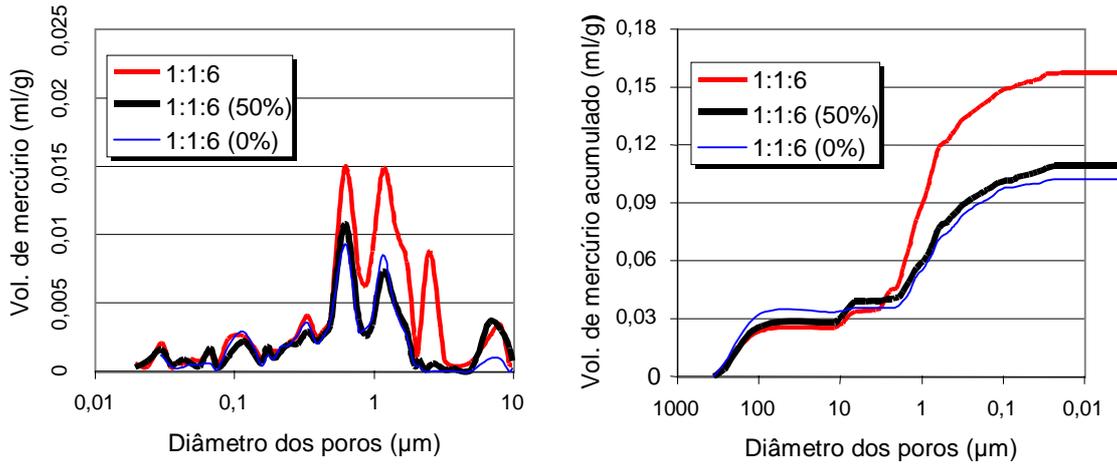


Figura 15 - Distribuição dos tamanhos de poros e volume de poros acumulado – argamassa 1:1:6 aplicada sobre base não absorvente e sobre bloco cerâmico seco e com teor de umidade 50% (EPUSP)

Considerações finais

Procurou-se destacar, com a metodologia e os resultados dos ensaios apresentados, a importância da simulação em laboratório das condições de aplicação da argamassa encontradas em obra para o estudo da retração e de propriedades mecânicas.

O equipamento de medida da retração no estado fresco revelou aspectos importantes do desempenho das argamassas até então desconhecidos para as composições de cimento, cal e areia, resumidos a seguir:

- (a) a retração ocorreu em três estágios: Primeira Retração, Período de Estabilização e Segunda Retração;
- (b) a Segunda Retração foi impedida de ocorrer por causa da aderência à base;
- (c) a retração aumentou com o aumento do teor de cal das argamassas, tanto para o caso de aplicação sobre base não absorvente, como para argamassa aplicada sobre bloco cerâmico seco;
- (d) a umidade do bloco cerâmico mostrou ser uma condição de grande influência sobre os valores de retração atingidos nas primeiras duas horas após a aplicação da argamassa – sobre o bloco seco, a retração foi cerca de 20 vezes maior do que a ocorrida na argamassa aplicada sobre o bloco saturado;

(e) mensurando-se a retração na interface *argamassa/base* e na superfície exposta do revestimento, foi possível observar que existe uma condição de umidade do substrato que permite um equilíbrio do fenômeno ao longo da espessura da camada de argamassa aplicada;

Os resultados motivam o prosseguimento das pesquisas com este equipamento, com variação de composição e condições de aplicação da argamassa – cura, tipo de substrato, preparo do substrato com chapisco e outras.

A influência da sucção de água pela base nas propriedades mecânicas resistência à tração na flexão e módulo de deformação foi claramente demonstrada: a perda de água para o bloco cerâmico promoveu o adensamento mecânico da argamassa 1:1:6, aumentando os valores das duas propriedades nas diferentes idades estudadas. O método, contudo, requer aperfeiçoamento no sentido de considerar também a influência da aderência à base nas propriedades mecânicas. O papel-filtro permitiu a sucção de água e a recuperação dos corpos-de-prova para os ensaios mecânicos mas, justamente por impedir a total aderência à base, distanciou o método da situação real de aplicação em obra.

A porosimetria confirmou algumas explicações dadas para os resultados de retração e de propriedades mecânicas, como o adensamento da argamassa provocado pela sucção de água pela base e a diminuição da porosidade total com o aumento do teor de cal.

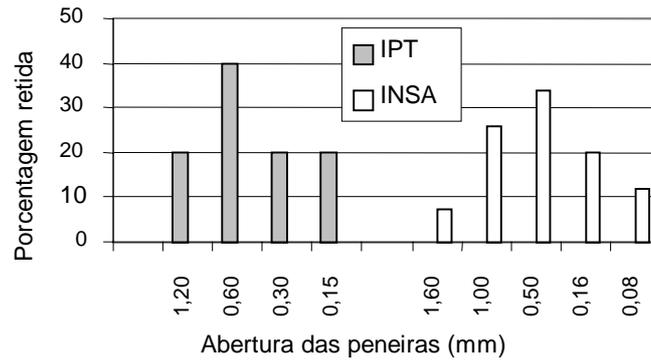


Figura 16 - Granulometria areias IPT e INSA

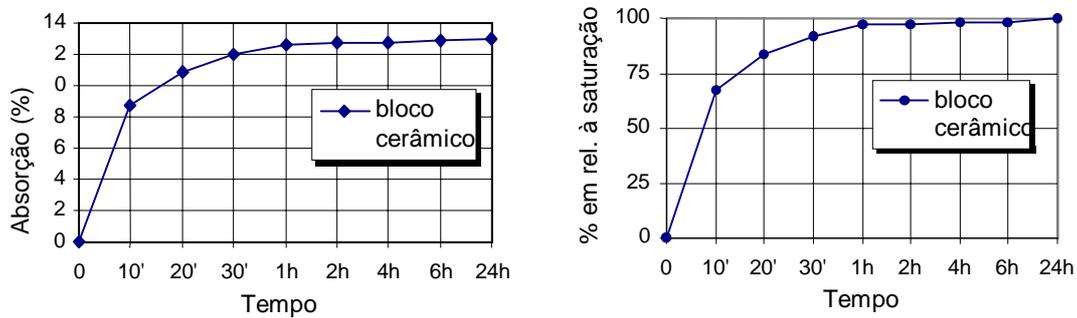


Figura 17 - Características do bloco cerâmico INSA

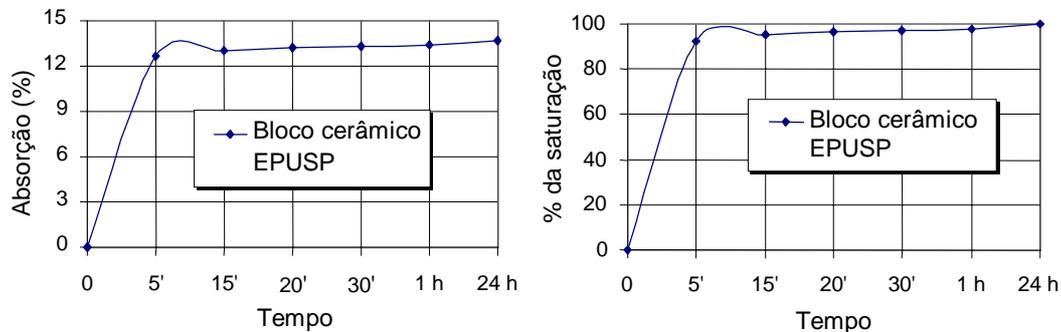


Figura 18 - Características do bloco cerâmico EPUSP

Referências bibliográficas

BASTOS, P.K.X. **Retração e desenvolvimento de propriedades mecânicas de argamassas mistas de revestimento**. 2001. 172 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo.

DÉTRICHÉ, C.H. **Contribution a l'étude des déformations des couches minces de mortiers de liants hydrauliques**. 1977. 247 f. Thèse (Docteur-ingenieur) - Université Paul Sabatier de Toulouse, Toulouse.

_____. **Contribution à l'étude du comportement des couches minces de mortiers de liants hydrauliques:**

applications aux enduits. 1983. 202 f. Thèse (Docteur-ingenieur) - Université Paul Sabatier de Toulouse, Toulouse.

DUPAIN R.; LANCHON R.; SAINT-ARROMAN, J.C. **Granulats, Sols, Ciments et Bétons**. Paris, Casteilla, 1995.

GERE, J.M.; WEAVER, W. **Análise de estruturas reticuladas**. Tradução Carlos M.P. Ferreira Pinto. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994.

OUZIT, M.A. **Contribution a l'étude du comportement mécanique des enduits de façade a base de liants hydrauliques**. 1990. 136 f. Thèse (Doctorat) - Université Paris VI, Paris.

TAMIN, P.F. **Étude du comportement mécanique des revêtements de façades-enduits**. 1986. 138 f. Thèse (Doctorat en Sciences et Techniques du Bâtiment) - École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.

TIMOSHENKO, S.P.; GERE, J.E. **Mecânica dos sólidos**. Tradução José R. de Carvalho. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1983. v.1.

Agradecimentos

ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland; CAPES; FAPESP; IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo.