

# Efeito da variação do consumo de cimento em argamassas de revestimento produzidas com base nos conceitos de mobilidade e empacotamento de partículas

*Effect of cement consumption on rendering mortars produced according the concepts of packing particles and mobility*

Marcel Hark Maciel  
Heitor Montefusco Bernardo  
Gabriela Simões Soares  
Roberto Cesar de Oliveira Romano  
Maria Alba Cincotto  
Rafael Giuliano Pileggi

## Resumo

**A** redução do consumo de cimento na composição de argamassas de revestimento é uma alternativa para a diminuição do impacto ambiental provocado na cadeia de produção do ligante. A utilização de materiais cimentícios suplementares (supplementary cementitious materials – SCM) e a dosagem com base nos conceitos de empacotamento e mobilidade de partículas são estratégias que podem resultar nas propriedades projetadas tanto no estado fresco quanto endurecido. O objetivo deste trabalho foi ilustrar a influência da alteração no consumo de ligante nas propriedades no estado fresco e endurecido de argamassas de revestimento mantendo-se constante a distribuição de tamanho de partículas, o que resultou em porosidade de empacotamento com insignificante variação. O consumo de cimento variou de 8% a 16% em massa, com adição de filler calcário como SCM, sendo que a consistência foi a mesma devido à alteração dos teores de água nas argamassas. Os resultados indicaram que a redução no consumo de cimento afeta negativamente as propriedades no estado endurecido, mas ainda assim atendem às exigências estabelecidas para esse tipo de revestimento.

**Palavras-chave:** Argamassas de revestimento. Consumo de cimento. Empacotamento de partículas. Mobilidade das partículas.

## Abstract

*The reduction of cement consumption in rendering mortar composition is an alternative to reduce the environmental impact in the binder production chain. The use of supplementary cementitious materials (SCM) and the dosage based on the concepts of particle packing and mobility are strategies that can result in designed properties both fresh as hardened state. The objective of this study was to illustrate the influence of the change in binder consumption in the properties of formulated rendering mortars keeping constant the particle size distribution, resulting in negligible variation in packing porosity. The cement consumption was ranged from 8 to 16% by mass, with the addition of limestone filler as SCM, with the consistency has being the same due to the alteration of the water content of the mortars. The results indicated that the reduction in cement consumption adversely affect the properties of the mortar in the hardened state, but still quite comply with the requirements for this type of rendering.*

**Keywords:** Rendering mortars. Cement consumption. Packing particles. Particle mobility.

Marcel Hark Maciel  
Universidade de São Paulo  
São Paulo - SP - Brasil

Heitor Montefusco Bernardo  
Universidade de São Paulo  
São Paulo - SP - Brasil

Gabriela Simões Soares  
Universidade de São Paulo  
São Paulo - SP - Brasil

Roberto Cesar de Oliveira  
Romano  
Universidade de São Paulo  
São Paulo - SP - Brasil

Maria Alba Cincotto  
Universidade de São Paulo  
São Paulo - SP - Brasil

Rafael Giuliano Pileggi  
Universidade de São Paulo  
São Paulo - SP - Brasil

Recebido em 22/08/16  
Aceito em 30/09/16

## Introdução

A utilização do conceito de empacotamento de partículas como estratégia de desenvolvimento de argamassas de revestimento possibilita a obtenção de produtos com baixo consumo de cimento, fato que, além de diminuir o impacto ambiental da cadeia de produção do ligante, também resulta em redução de custos. Essa estratégia pode potencializar a ecoeficiência da produção de argamassas sem comprometer a resistência projetada.

Para tanto, tem sido cada vez mais comum a utilização de materiais cimentícios suplementares (*supplementary cementitious materials* – SCM) como *filler* calcário, escória e pozolanas (naturais ou artificiais), com capacidade de melhorar o empacotamento das partículas e, em alguns casos, ainda reagir com o cimento durante o desenvolvimento da microestrutura nas primeiras horas de hidratação ou mesmo em longas idades.

Acontece que muitas vezes a substituição parcial do ligante por tais materiais afeta as características das argamassas no estado fresco, dependendo das propriedades químicas, mineralógicas e, principalmente, físicas dos SCM. O aumento na área específica dos sistemas, por exemplo, pode resultar em aumento da demanda de água para o amassamento e manutenção da consistência desejada, e conseqüentemente requerer aumento no consumo de cimento para compensar a perda de desempenho e durabilidade. Dessa forma, deve ser levado em consideração também o conceito de mobilidade das partículas durante a mistura, transporte e aplicação do produto.

Buscando atender a tais exigências, neste trabalho as argamassas foram formuladas variando-se o consumo de cimento de 8% a 16% (em massa) e tendo *filler* calcário como substituinte, material carbonático com menor reatividade, mesmo perfil de distribuição de tamanho de partículas e menor área superficial específica em relação ao cimento. Com essa estratégia pretendeu-se avaliar somente o impacto da alteração do teor de ligante no estado endurecido dos revestimentos.

Para a manutenção dos parâmetros de mobilidade nas formulações, ou seja, distância de separação entre as partículas mais finas (IPS) e espessura da camada de pasta que separa os agregados (MPT), a quantidade de água para o amassamento das argamassas foi alterada, variando de 14,5% a 15% em massa. Assim, pretendeu-se aplicar as argamassas formuladas com consistências em uma

faixa estreita de variação, definidas a partir do ensaio *squeeze-flow*, visando simular o processo de aplicação em obra.

Na sequência é apresentada uma breve revisão sobre os parâmetros relevantes para a análise das formulações avaliadas neste trabalho.

## Empacotamento de partículas

O empacotamento de partículas tem um efeito marcante sobre a porosidade do corpo conformado, tanto na resistência mecânica e no módulo de elasticidade quanto na permeabilidade (ROMANO; TORRES; PILEGGI, 2015).

Especificamente no caso das argamassas de revestimento, além de existir variação das propriedades físicas, químicas e mineralógicas das matérias-primas, a extensão granulométrica dos pós é bastante ampla, variando de micra a milímetros. No entanto, com o proporcionamento adequado entre as matérias-primas, podem-se obter produtos com bom desempenho.

De acordo com MacGeary (1961<sup>1</sup> *apud* OLIVEIRA *et al.*, 2000), um material está bem empacotado quando ocorre a adequada seleção da proporção e do tamanho dos particulados, de forma a preencher os vazios maiores por partículas menores, e os vazios remanescentes preenchidos por partículas ainda menores, e assim sucessivamente.

Contudo, se forem introduzidas partículas maiores que os vazios existentes, essas provocarão o surgimento de novos vazios pelo deslocamento das partículas maiores com relação às posições originais, o que poderá levar ao aumento na porosidade e à diminuição da eficiência do empacotamento.

De maneira geral, empacotamentos de monodispersões (partículas de um único tamanho) esféricas irão ocorrer sempre com o mesmo fator de empacotamento  $(0,60 < f_c < 0,64)$ , independentemente do diâmetro das partículas. Porém, é praticamente impossível gerar uma monodispersão real, visto que os materiais produzidos se distribuem em faixas granulométricas, mesmo que estreitas.

Estudos teóricos e práticos relacionados ao empacotamento geraram duas abordagens básicas: uma discreta, que considera as partículas individualizadas, sendo as propostas por Furnas e Westman e Hugill as mais conhecidas, e outra

<sup>1</sup>MCGEARY, R. K. Mechanical Packing of Spherical Particles. *Journal of the American Ceramic Society*, v. 44, n. 10, p. 513-522, 1 out. 1961.

contínua, a qual trata as partículas como distribuições contínuas, proposta por Andreasen (FUNK; DINGER, 1992a, 1992b, 1993, 1994a, 1994b).

Utilizando uma abordagem conhecida como discreta, Furnas desenvolveu um procedimento para o cálculo do volume aparente de misturas binárias ou de multicomponentes e definiu que o máximo empacotamento ocorre quando as partículas finas preenchem completamente os vazios existentes entre as maiores. Como as proporções das várias matérias-primas formam uma progressão geométrica, generalizou sua teoria para qualquer mistura polimodal, conforme ilustrado na Equação 1:

$$CPFT = \left( \frac{D_p^{\log r} - D_s^{\log r}}{D_l^{\log r} - D_s^{\log r}} \right) \times 100 \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

CPFT é a porcentagem acumulada de partículas menores que  $D_p$ ;

$D_p$  é o diâmetro da partícula;

$D_s$  é o diâmetro da menor partícula;

$D_l$  é o diâmetro da maior partícula; e

$r$  é o quociente entre o volume das partículas retidas em uma malha imediatamente inferior.

Entretanto, Andreasen mostrou que em situações reais todos os tamanhos de partículas podem estar presentes na composição granulométrica, de forma que uma teoria para o empacotamento deveria ser desenvolvida considerando-se a continuidade granulométrica. Sendo assim, para o autor, o empacotamento ideal seria obtido a partir do que foi chamado de “imagem de granulação”, ou seja, sob a hipótese de similaridade em torno de duas partículas específicas com tamanhos muito diferentes. Assim, definiu a distribuição de tamanho de partículas em termos de uma lei de potências, conforme ilustrado na Equação 2, onde  $q$  é o coeficiente da distribuição.

$$CPFT = \left( \frac{D_p}{D_l} \right)^q \times 100 \quad \text{Eq. 2}$$

Em estudo posterior, Funk e Dinger (1993) mostraram que a maior densidade de empacotamento é obtida com um expoente  $q=0,37$ . Os mesmos autores realizaram muitas avaliações comparativas entre modelos de empacotamento (FUNK; DINGER, 1992b) e consideraram que tanto no modelo de Furnas quanto no de Andreasen são observadas progressões geométricas. Sendo assim, podem convergir matematicamente para o que é descrito na Equação 3, conhecida como modelo de Alfred.

$$CPFT = \left( \frac{D_p^q - D_s^q}{D_l^q - D_s^q} \right) \times 100 \quad \text{Eq. 3}$$

Neste caso, pode-se introduzir o conceito de diâmetro mínimo da partícula, proposto por Andreasen, e realizar uma revisão do modelo de Furnas. Tal modelo indica que, na realidade, os anteriores se tratavam de duas formas distintas de se visualizar o mesmo fenômeno.

Além da distribuição granulométrica e área superficial específica (ASE), outras características interferem no empacotamento das partículas, como morfologia, porosidade do agregado, aglomeração das partículas, entre outros. No entanto, nenhuma dessas propriedades é considerada nos modelos de empacotamento citados, não sendo então consideradas também neste trabalho.

### Distância de separação entre as partículas - IPS

O modelo de IPS é interessante para o cálculo da distância ( $d$ ) de separação entre as partículas por considerar o efeito da distribuição granulométrica e prever que as partículas ficam em contato ( $d=0$ ) quando a quantidade de fase líquida é inferior à porosidade do sistema empacotado.

Os demais modelos, por serem baseados nas relações entre a concentração de sólidos e área superficial específica (ASE) das partículas na suspensão, consideram que há contato entre as partículas somente quando o teor de líquido for nulo, hipótese irreal. Esses atributos fazem do IPS um parâmetro com maior potencial de utilização para estimativa da mobilidade das partículas mais finas em composições em geral.

A Equação 4 ilustra como a distância de separação entre as partículas pode ser determinada (OLIVEIRA *et al.*, 2000):

$$IPS = \frac{2}{VSA} \times \left[ \frac{1}{V_s} - \left( \frac{1}{1-P_{of}} \right) \right] \quad \text{Eq. 4}$$

Onde:

VSA é a área superficial volumétrica (produto entre a área superficial específica e a densidade real do pó);

$V_s$  é a fração volumétrica de sólidos; e

$P_{of}$  é a porosidade de empacotamento das partículas.

Por definição, o IPS é a distância média entre partículas adjacentes na mistura, admitindo-se que todas estão completamente desaglomeradas.

Quanto menor a porosidade do sistema, ajustada pela distribuição granulométrica, maior o valor de IPS da pasta (considerando-se constantes a ASE e o

$V_s$ ), pois maior é a quantidade de fase líquida livre para separar as partículas (ROMANO; CARDOSO; PILEGGI, 2011).

Se o teor de fluido for inferior ou igual à porosidade do sistema a mistura não flui, pois há contato entre as partículas. Somente quando o teor de água for suficiente para preenchimento da porosidade e recobrimento de toda superfície, haverá uma significativa separação entre as partículas e efetiva fluidez das suspensões.

A área superficial, por outro lado, atua de maneira direta: o aumento dessa propriedade leva a uma demanda maior de líquido para recobrimento e afastamento das partículas, resultando em menor IPS.

O conceito de IPS é particularmente aplicável às suspensões de partículas finas, onde as forças de superfície são predominantes. No entanto, como as argamassas são materiais multifásicos cujas partículas grosseiras estão sob a ação das forças de origem mássica e gravitacional, e as partículas mais finas são predominantemente sujeitas à ação das forças de superfície, seu comportamento no estado fresco é significativamente relacionado com o efeito dos agregados.

### Espessura da camada de pasta que afasta os agregados - MPT

O conceito embutido na maximização de IPS é diretamente aplicável a suspensões de partículas finas, em que a água é o fluido que as separa. O domínio de forças superficiais atrativas e repulsivas nessa faixa granulométrica faz com que, quanto mais empacotada seja a suspensão, maior se torne o valor de IPS e mais facilitada a movimentação entre as partículas.

Por outro lado, em argamassas o empacotamento máximo resulta em maior proximidade entre os grãos grossos e menor volume de matriz nos sistemas, apesar da minimização da porosidade total. Essa condição dificulta o escoamento em função da grande interferência física entre os agregados. Desse modo, seria possível pensar até mesmo que existe certa incoerência entre o conceito de IPS e a fluidez de argamassas, uma vez que o que maximiza o IPS da pasta prejudica o escoamento do conjunto.

Contudo, tal contradição não se justifica devido à presença de partículas macroscópicas (agregados) que impõem ao sistema acentuada influência de forças mássicas. Portanto, para que ocorra a movimentação entre essas partículas com maior facilidade é necessário que a distância entre elas seja maximizada. Uma vez que o fluido que afasta os grãos grossos é a matriz, e não apenas a água, os

coeficientes de distribuição que proporcionam valores elevados de fluidez são aqueles que propiciam elevado teor de matriz, valores que são inferiores aos que promovem alta densidade de empacotamento (OLIVEIRA *et al.*, 2000).

Essa distância que afasta os agregados pode ser expressa pela espessura máxima de pasta (*maximum paste thickness* – MPT) (HU; LARRARD, 1995; POWERS, 1968). Sendo assim, para se elevar a fluidez de uma argamassa é necessário que se maximize o valor de MPT, de forma a propiciar o menor contato possível entre os grãos grossos.

A equação original para o cálculo de MPT foi desenvolvida admitindo-se partículas esféricas. Por isso não inclui diretamente a área específica das partículas grossas (HU; LARRARD, 1995; POWERS, 1968), mas sim o diâmetro. No entanto, é interessante considerar a verdadeira área superficial para o cálculo de MPT.

Dessa forma, pode-se utilizar a equação original de IPS apresentada anteriormente, modificando os parâmetros  $VSA_g$  (área superficial volumétrica da fração grossa),  $P_{ofg}$  (porosidade da distribuição das partículas grossas) e  $V_{Sg}$  (concentração volumétrica dos grossos), o que resulta na Equação 5.

$$MPT = \frac{2}{VSA_g} \times \left[ \frac{1}{V_{Sg}} - \left( \frac{1}{1-P_{ofg}} \right) \right] \quad \text{Eq. 5}$$

Cardoso, John e Pileggi (2009) verificaram que, para valores de MPT menores que 20  $\mu\text{m}$ , as cargas compressivas aumentam intensamente, pois maiores são a interferência e o atrito entre os agregados. Acima desse valor, a carga compressiva cai suavemente em função do aumento do MPT, sendo que tal valor pode mudar de acordo com as propriedades específicas de cada argamassa avaliada. Assim, podem ser obtidas argamassas com o mesmo MPT e com fluidez diferente devido, principalmente, às características da pasta, à tendência à segregação e à presença de aditivos responsáveis pela lubrificação dos agregados (não utilizados neste trabalho). De todo o modo, Romano, Torres e Pileggi (2015) mostraram que o MPT apresenta íntima relação com o estado fresco e as propriedades no estado endurecido de argamassas de revestimento.

Sendo assim, o desenvolvimento de argamassas com base nos conceitos de empacotamento e mobilidade das partículas pode ser uma estratégia para otimizar as propriedades dos produtos durante a mistura, passando pelo estágio de aplicação até o desempenho durante o uso.

## Métodos de ensaio

### Caracterização física das matérias-primas

#### Distribuição granulométrica a laser

A distribuição de tamanho de partículas dos pós utilizados neste trabalho (cimento e *filler*) foi determinada no granulômetro a laser Helos (Sympatec) com faixa de detecção de 0,1 µm a 350 µm. Cerca de 0,15 g do pó seco foi adicionado em béquer e, em seguida, misturado com 50 ml de água, utilizando-se um misturador de bancada RW20 (IKA), com rotação mantida em 1.000 rpm durante 1 min. A suspensão foi transferida para o reservatório de análise, aplicado ultrassom por 2 min e logo iniciada a avaliação.

#### Distribuição granulométrica por análise dinâmica de imagens (ADI)

A distribuição de tamanho de partículas das areias foi determinada por ADI no equipamento QICPIC – Sympatec. Foram analisados aproximadamente 100 g de cada material, com lente M7 (faixa de análise entre 10 µm e 3.410 µm) e dispersão por gravidade.

#### Densidade real

Realizada no equipamento Multipicnometer, da marca Quantachrome MVP 5DC, e o resultado quantificado por uma média de cinco determinações para cada matéria-prima. O equipamento apresenta duas câmaras, uma de expansão (referência) e outra com o porta-amostra. Antes de se iniciar o ensaio, a matéria-prima foi seca em estufa por 24 h a 60 °C e, após esse tempo, resfriada até a temperatura ambiente. A amostra foi pesada em uma balança analítica e adicionada no porta-amostra. Injetou-se gás hélio na câmara de referência e anotou-se o valor de pressão atingido ( $p_1$ ). O valor ideal deve estar entre 17 e 17,3 psi. Utilizando-se a Equação 6, de Clapeyron, foi calculado o número de mols ( $n$ ) do gás He que ocupa a câmara de expansão e que permanece constante no sistema. Na equação  $p_1$  e  $V_e$  indicam, respectivamente, a pressão e o volume da câmara de expansão,  $R$  é a constante universal dos gases (8,314 J/mol.K) e  $T$  a temperatura.

$$n = \frac{p_1 \cdot V_e}{R \cdot T} \quad \text{Eq. 6}$$

Com a abertura da válvula de expansão houve transferência do gás He para a câmara onde se encontra a amostra, e, após a estabilização, a nova pressão ( $p_2$ ) foi anotada. Admitindo-se um comportamento ideal do gás He e conhecendo-se seu número de mols, o volume do sólido presente no porta-amostra é calculado a partir da Equação 7.

$$V_s = V_a - \frac{V_e}{\frac{p_1}{p_2} - 1} \quad \text{Eq. 7}$$

Onde:

$V_s$  = volume do sólido; e

$V_a$  = volume da câmara que contém a amostra.

Como a massa era conhecida e o volume ocupado foi calculado, obteve-se a densidade real a partir da relação massa-volume.

#### Área superficial específica

Determinada no equipamento Belsorp Max, com pré-tratamento das amostras em temperatura de 60 °C e pressão de  $10^{-2}$  kPa por 24 h no equipamento Belprep vac-II para a retirada da umidade e de outros gases adsorvidos. No caso do cimento o pré-tratamento foi realizado sob temperatura menor (40 °C) e em menor tempo (16 h) para evitar o risco de desidratação da gipsita (MANTELLATO; PALACIOS; FLATT, 2015). A medida da área superficial específica foi determinada pelo método BET (desenvolvido por Brunauer, Emmet e Teller), a partir do pressuposto de que a adsorção do gás se deu em multicamadas.

#### Estado fresco

A avaliação das argamassas no estado fresco foi realizada mediante a determinação de seu teor de ar incorporado e do ensaio *squeeze-flow*, que compara a consistência das argamassas quando solicitadas por espalhamento. Os ensaios foram realizados conforme detalhado a seguir, após mistura das argamassas seguindo a norma técnica brasileira NBR 13276:2002: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência (ABNT, 2002).

#### Incorporação de ar

Determinada de acordo com a norma técnica brasileira NBR 13278:1995: Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado (ABNT, 1995), e os valores calculados por meio da densidade real do pó (obtida por picnometria de gás He).

#### Squeeze-flow

Realizado seguindo as recomendações da norma técnica brasileira NBR 15839:2010: Argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos – Caracterização reológica pelo método *squeeze-flow* (ABNT, 2010). Os ensaios foram realizados em uma prensa Instron 3345 após moldagem das amostras (101 mm de diâmetro x 10 mm de altura)

em prato metálico, sem absorção de água, com controle de deslocamento de 0,1 mm/s.

### Estado endurecido

Como os parâmetros de formulação e mobilidade foram mantidos constantes, resultando em características similares no estado fresco das argamassas, as propriedades no estado endurecido foram avaliadas após cura dos corpos de prova por 28 dias, com controle de temperatura em  $23\pm 2$  °C e umidade relativa de  $50\pm 2\%$ .

Os ensaios realizados estão detalhados na seqüência. Para a realização dos ensaios de porosidade, resistência mecânica e módulo de elasticidade dinâmico, utilizaram-se corpos de prova de 50 mm de diâmetro e de 60 mm de espessura, e para os ensaios de resistência de aderência à tração e permeabilidade ao ar, as argamassas (50 mm de diâmetro x 20 mm de altura) foram moldadas sobre bloco cerâmico, visando simular o desempenho e a durabilidade do revestimento em uso.

### Porosidade

Determinada a partir do método de imersão de Arquimedes. Inicialmente os corpos de prova foram secos em estufa a 60 °C por 48 h, pesados e, em seguida, imersos em água por 24 h. Nas primeiras 2 h aplicou-se vácuo mantendo-se constante a pressão em 2 bar. Após esse tempo as massas foram determinadas com as amostras imersas e úmidas.

### Resistência mecânica

A resistência à tração na compressão diametral foi determinada de acordo com o método brasileiro, em máquina de ensaios universal, Instron, modelo 5569, controlando-se a carga a  $0,05\pm 0,02$  MPa/s.

### Módulo de elasticidade dinâmico - pulso-eco

Determinado de acordo com a norma técnica brasileira NBR 15630:2008: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica (ABNT, 2008), utilizando-se o equipamento (Pundit) com transdutores de frequência de 200 kHz e seção transversal circular de 20 mm de diâmetro.

### Resistência de aderência à tração - pull-out test

Os ensaios foram realizados utilizando-se o dinamômetro digital Imada, modelo ATX-500 DPU, com célula de carga de 5 kN, Dynatest, com precisão de 1,0 N. As amostras foram moldadas de maneira distinta da convencional, conforme reportado por Romano, Torres e Pileggi (2015), visando diminuir a variabilidade dos resultados. Todas as amostras foram moldadas sobre blocos cerâmicos para avaliação de uma condição real de aplicação em obra, já que em substrato padrão o resultado é muito distinto e, muitas vezes, não representa a realidade.

### Permeabilidade ao ar

Determinada a partir da técnica de *vacuum-decay* (TORRENT, 1992; TORRENT; FRENZER, 1995; ROMANO, 2013). O aparato utilizado consiste em uma bomba de vácuo acoplada a uma câmara de sucção que fica em contato com a superfície da amostra. A bomba de vácuo é ligada, e espera-se atingir a pressão negativa de estabilidade. Mantém-se o vácuo por 30 s, desligado em seguida, monitorando-se a queda de pressão em função do tempo. A permeabilidade ao ar (expressa somente em valores de  $k_1$  – constante de permeabilidade darcyana) é calculada a partir da Equação 8, de Forchheimer (INNOCENTINI *et al.*, 2009; ROMANO, 2013), considerando para efeito de simplificação duas hipóteses: compressibilidade desprezível do gás e utilização apenas do termo linear.

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{k_1} v_s + \frac{\rho}{k_2} v_s^2 \quad \text{Eq. 8}$$

Onde:

$\Delta P$  é o gradiente de pressão;

$v_s$  é a velocidade de percolação do ar;

$L$  é a espessura da amostra;

$\mu$  é a viscosidade do fluido; e

$\rho$  é a densidade do fluido.

### Materiais

Na Figura 1 é ilustrada a distribuição de tamanho de partículas das matérias-primas utilizadas no trabalho, e na Tabela 1 a área superficial específica e a densidade real das matérias-primas, parâmetros determinantes para a formulação.

Figura 1 - Distribuição de tamanho de partículas das matérias-primas utilizadas nas formulações das argamassas

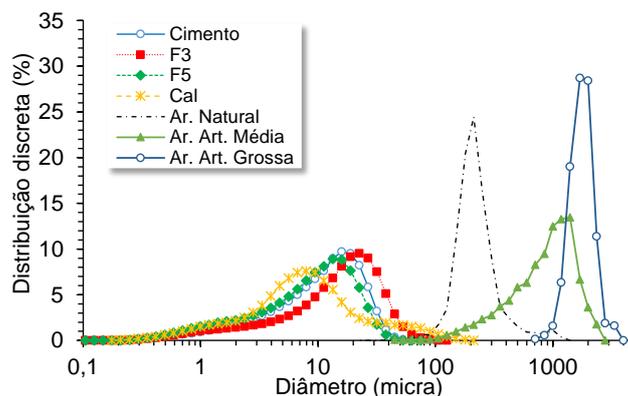


Tabela 1 - Área superficial específica, densidade real e diâmetros de partículas características das distribuições

	Cimento	F3	F5	Cal	Ar. natural	Ar. art. média	Ar. art. grossa
Área superficial específica (m <sup>2</sup> /g)	1,19	0,92	0,90	9,51	0,45	0,30	0,20
Densidade real (g/cm <sup>3</sup> )	3,08	2,76	2,76	2,35	2,60	2,60	2,60
d <sub>10</sub> (micra)	2,30	2,30	1,60	1,70	140	340	1300
d <sub>50</sub> (micra)	12,5	17,5	10,5	8,50	230	1050	1900
d <sub>90</sub> (micra)	26,0	38,0	24,0	37,5	320	1900	2400

Nota: Legenda:  
Ar. = areia; e  
Art. = artificial.

Optou-se por utilizar um cimento com maior pureza comercializado no mercado nacional, até 5% de adição de calcário e até 3% de sulfatos de cálcio, regulador de pega. O teor foi variado de 8% a 16% em massa, e as argamassas descritas como A\_8 a A\_16.

Os *fillers* escolhidos consistem em produtos que, combinados, resultam em partículas com mesma distribuição de tamanho do ligante hidráulico, com o objetivo de avaliar puramente o impacto da variação do teor de cimento nas composições. A quantidade de cal e as proporções de areia foram mantidas constantes.

Após a determinação das características físicas das matérias-primas, os parâmetros de empacotamento e mobilidade teóricos foram quantificados a partir do modelo de Westman e Hugill (OLIVEIRA *et al.*, 2000), as composições avaliadas apresentadas na Figura 2, e os parâmetros de mobilidade e empacotamento indicados na Tabela 2.

A porosidade de empacotamento indica o volume de vazios microestruturais resultantes da

combinação das matérias-primas. A área superficial específica indica a rugosidade superficial das partículas, e a área superficial volumétrica é o produto entre a ASE e a densidade real, o que resulta em uma comparação tridimensional da rugosidade. O IPS e o MPT, conforme descrito anteriormente, são parâmetros de mobilidade estimados a partir das características físicas das matérias-primas e da quantidade de água utilizada para o amassamento.

Conforme já citado, se o teor de fluido for inferior ou igual à porosidade de empacotamento, o sistema não fluirá, pois as partículas se encontrarão em contato. Contudo, quando o teor de água for suficiente para exceder a porosidade e recobrir a superfície das partículas, pode-se esperar que o sistema flua. Sendo assim, o IPS e o MPT podem influenciar diretamente nas características reológicas e no estado endurecido das argamassas (OLIVEIRA *et al.*, 2000; ROMANO, 2013; ROMANO; TORRES; PILEGGI, 2015). Por isso, foram fixados para manter a consistência das argamassas e variar somente o teor de cimento.

Figura 2 - Distribuição granulométrica das argamassas

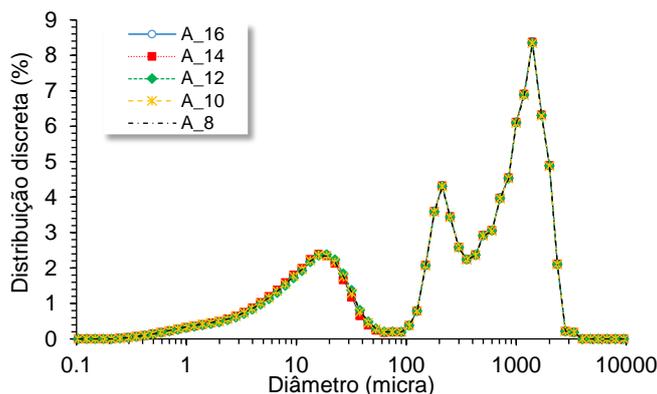


Tabela 2 - Parâmetros de mobilidade e empacotamento resultantes nas formulações

Parâmetro da formulação	A_16	A_14	A_12	A_10	A_8
Porosidade de empacotamento (%)	10,4	10,3	10,2	10,2	10,1
Área superficial volumétrica (m <sup>2</sup> /cm <sup>3</sup> )	2,13	2,11	2,09	2,07	2,05
Área superficial específica (m <sup>2</sup> /g)	0,80	0,79	0,79	0,78	0,77
IPS (micra)	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44
MPT (micra)	1,91	1,90	1,90	1,89	1,89
%-peso – água	15,0	14,9	14,8	14,6	14,5
%-vol – água	28,6	28,4	28,3	28,0	27,8

Deve ser salientado que, para o cálculo do MPT, não foi considerado o teor de ar incorporado, que afeta o volume da pasta que afasta os agregados, para o desenvolvimento da formulação. No entanto, conforme será apresentado mais adiante, esse fato não foi representativo, visto que o teor de ar incorporado não apresentou significativa alteração.

Dessa forma, a quantidade de água foi ligeiramente alterada (variação em massa de 14,5% a 15%), e o resultado obtido avaliado por reometria compressiva (*squeeze-flow*), para garantir consistências similares para todas as composições.

## Resultados e discussão

### Consistência das argamassas

Conforme ilustrado na Figura 3, parte superior, houve pequena alteração no teor de ar incorporado nas argamassas, variando de 0,3% a 0,9% com o aumento do teor de cimento. Trata-se de um volume de ar muito pequeno, mas a consistência das argamassas estava de acordo com o que se espera de um material para aplicação manual. A utilização da cal foi responsável pela adequação da trabalhabilidade.

Na mesma figura, parte inferior, é apresentado o resultado do ensaio *squeeze-flow*, e, apesar de as consistências não serem exatamente iguais, para a

carga obtida em função do deslocamento foi considerada admissível variação de 10% em relação à média, região destacada em amarelo no gráfico.

Com o deslocamento de até 2 mm por punção, todas as argamassas apresentaram comportamento idêntico, mas para compressões maiores houve pequena alteração nas cargas. No entanto, pode-se dizer que as argamassas moldadas apresentavam propriedades reológicas próximas e teores de ar com pequena variação absoluta.

Como na aplicação dessas composições em obra dificilmente seria necessária a utilização de maior quantidade de água, o objetivo de avaliar somente o impacto do teor de cimento nas propriedades no estado endurecido será perfeitamente atingido. Sendo assim, os resultados apresentados na sequência serão correlacionados com o teor de cimento e relação água-cimento.

### Estado endurecido

Na Figura 4 é apresentada a porosidade das argamassas, total (PT), aparente (PA) e fechada (PF), em função da relação água-cimento, visto que houve pequena alteração na quantidade de água para o amassamento das argamassas com manutenção da consistência. Somente como critério ilustrativo, é apresentada a quantidade de cimento em cada composição.

Figura 3 - Proporção das fases nas argamassas levando em consideração o teor de ar incorporado (parte superior) e consistência resultante de acordo com o ensaio *squeeze-flow* (parte inferior)

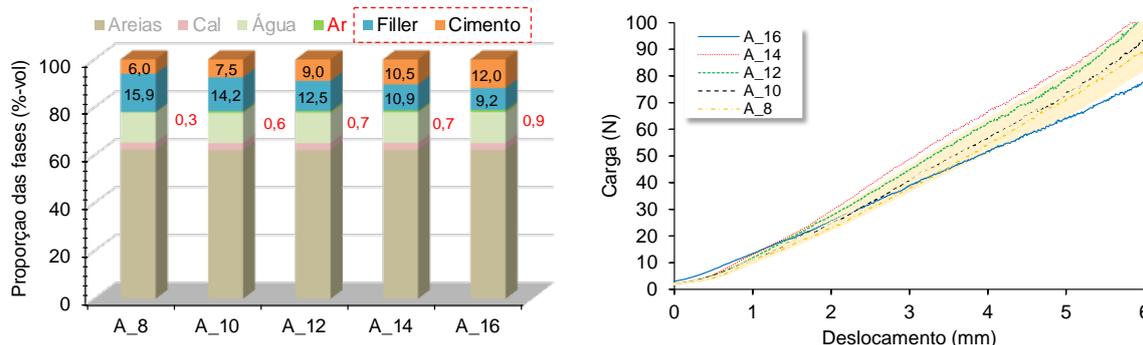
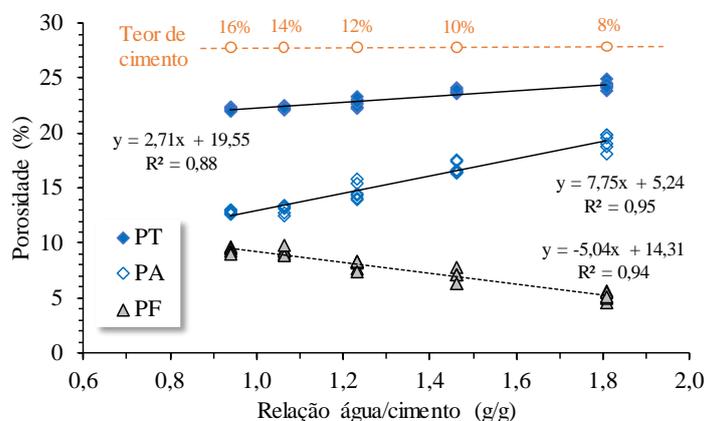


Figura 4 - Porosidade total, aparente e fechada em função da relação água-cimento nas argamassas



Tanto PT quanto PA aumentaram em função do aumento de a/c, mas a alteração foi mais brusca para os poros abertos, com a consequente diminuição da porosidade fechada. Assim, mesmo com o incremento da água de amassamento para manter a porosidade de empacotamento, à medida que se aumentou a quantidade do ligante, houve maior colmatação, resultando em isolamento dos poros no interior da microestrutura das argamassas.

Para a avaliação da significância da variação do teor de ligante foram utilizadas duas formas de análise estatística: a Anova com fator único, para rejeitar ou aceitar a hipótese da igualdade das médias, dentro e entre os grupos, e o teste Tukey (teste-t) para avaliação comparativa entre pares com distintos teores de cimento, de modo a indicar qual ou quais estão diferindo dos demais. Os resultados de porosidade em função do teor de cimento são apresentados na Tabela 3, a seguir.

Atentando-se somente para o resultado da análise estatística de variância, na primeira parte da tabela são apresentadas as informações da quantidade de amostras avaliadas para cada teor de cimento, a soma dos resultados da porosidade, total ou aparente, a média dos resultados e a variância para

cada caso. No entanto, somente com esses resultados não é possível avaliar se houve diferença estatística entre amostras em relação às respectivas porosidades.

Já a segunda parte da tabela trata da fonte de variação entre os grupos. O valor-P indica o valor de prova e demonstra se a hipótese de igualdade entre os resultados referentes à variação do teor de cimento nas composições deve ser aceita ou rejeitada. Se o valor de prova for superior ao erro, ou seja 0,05, deve-se aceitar; caso contrário, deve-se rejeitar a igualdade. Nos casos avaliados, o valor foi muito inferior aos 5% de erro.

Outra forma de se concluir se há igualdade é comparar o valor de F com F crítico: o F crítico limita a região de rejeição e significa que para valores de F superiores a hipótese da igualdade deve ser rejeitada. Portanto, como o valor de F foi maior do que o de F crítico em ambos os casos, há indicativo de que o aumento do teor de cimento resultou em aumento tanto da porosidade total quanto aparente, e o valor-P menor do que 0,05 comprova a significância do resultado comparativo de F com F crítico.

Tabela 1 - Análise estatística de variância (Anova-fator único) e teste Tukey para avaliação comparativa da porosidade das argamassas em função do teor de cimento. No caso do teste Tukey, as células destacadas indicam que foram observadas diferenças significativas entre os pares

<b>POROSIDADE TOTAL</b>				
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
A_8	6	145,98	24,33	0,13
A_10	6	142,99	23,83	0,03
A_12	6	136,51	22,75	0,14
A_14	6	132,61	22,10	0,24
A_16	6	133,14	22,19	0,03

<i>ANOVA – fator único</i>						
Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-p	F-crítico
Entre grupos	23,84	4	5,96	<b>52,21</b>	8,9e-12	<b>2,76</b>
Dentro dos grupos	2,85	25	0,11			
Total	26,69	29				

<i>TESTE TUKEY</i>					
Teor de cimento (%)	8	10	12	14	16
A_8	-	0,00013	0,00013	0,00013	0,00013
A_10	3,596	-	0,00021	0,00013	0,00013
A_12	11,44	7,85	-	0,01994	0,05493
A_14	16,18	12,58	4,735	-	0,9908
A_16	15,54	11,94	4,093	0,642	-

<b>POROSIDADE APARENTE</b>				
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
A_8	6	115,05	19,17	0,43
A_10	6	101,12	16,85	0,29
A_12	6	88,19	14,70	0,57
A_14	6	78,29	13,05	0,14
A_16	6	76,86	12,81	0,03

<i>ANOVA – fator único</i>						
Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-p	F-crítico
Entre grupos	174,38	4	43,60	<b>148,63</b>	4,9e-17	<b>2,76</b>
Dentro dos grupos	7,33	25	0,29			
Total	181,72	29				

<i>TESTE TUKEY</i>					
Teor de cimento (%)	8	10	12	14	16
A_8	-	0,00013	0,00013	0,00013	0,00013
A_10	10,51	-	0,00013	0,00013	0,00013
A_12	20,28	9,77	-	0,00028	0,00015
A_14	27,77	17,26	7,49	-	0,9415
A_16	28,84	18,32	8,56	1,07	-

Utilizando-se como base o teste Tukey para comparação das variáveis duas a duas, comprovou-se que até 14% de cimento houve significativa alteração na porosidade, seja total ou aparente, e a partir desse valor as argamassas apresentaram o mesmo comportamento. Assim, a partir de 14% de teor de cimento, apesar de ilustrada no gráfico da Figura 4 tendência de diminuição da porosidade

com elevado  $R^2$ , não houve impacto significativo na alteração da microestrutura porosa.

Como as alterações no volume de vazios deve resultar em significativo impacto nas propriedades no estado endurecido das argamassas, os resultados apresentados na sequência foram avaliados em função da porosidade, conforme ilustrado na Figura

5, com os valores de resistência à tração na compressão diametral.

Como esperado, o aumento do teor do ligante hidráulico na composição, ou diminuição da relação água-cimento, resultou em aumento na resistência mecânica, da mesma forma que o aumento na porosidade total resultou em diminuição. Em outras palavras, a propriedade mecânica foi governada pela compactação de sua microestrutura.

Como as argamassas de revestimento não apresentam função estrutural, a avaliação da resistência à tração na compressão diametral poderia ser encarada como um parâmetro secundário para o desempenho do revestimento. No entanto, o resultado pode indicar a máxima resistência de aderência que o material apresentará quando aplicado sobre determinada base, visto que os macrodefeitos na interface argamassa-substrato são os responsáveis pelos menores valores comumente observados na aderência. Sendo assim, caso a resistência à tração seja maior do que a resistência ao arrancamento, o revestimento será rompido na interface entre a base e o material aplicado. Do contrário, no caso de a resistência à tração ser menor, o rompimento no arrancamento ocorrerá na argamassa (JOISEL, 1981).

A resistência à tração de materiais frágeis depende do tamanho e da geometria do defeito crítico, ponto no qual ocorre a concentração das tensões e se inicia a propagação da fissura. Além disso, as argamassas também podem ser consideradas como materiais compósitos, formados por agregados e pasta cimentícia, e a resistência da fase contínua tem influência significativa no sistema como um todo.

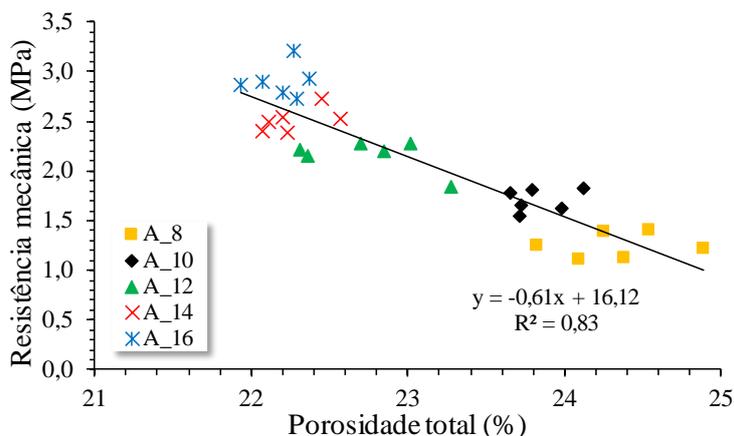
A análise estatística de variância e o teste Tukey foram utilizados de forma combinada para a avaliação do impacto do teor de cimento na resistência mecânica. Os conceitos são os mesmos que os apresentados anteriormente para a avaliação da porosidade.

Os resultados indicaram que existem diferenças significativas nas composições, devidas ao aumento do teor de cimento, independentemente do teor utilizado, ou seja, com até 16% do ligante a comparação em pares ilustra que a resistência ainda estaria aumentando.

O fato é que para aplicação como argamassa de revestimento não é necessária elevada resistência mecânica, e a escolha da melhor composição depende da resistência de projeto. Um levantamento das resistências à tração de argamassas industrializadas brasileiras e algumas europeias realizado por Cardoso (2009) indicou que a faixa obtida variou entre 0,2 e 1,6 MPa, com porosidade total entre 28% e 50%.

Dessa forma, pode-se dizer que, em geral, somente as argamassas com 8% e 10% de cimento apresentaram-se dentro do “mapa de resistências” dos produtos industrializados comercializados no Brasil e em alguns locais na Europa. Nas argamassas avaliadas neste trabalho a resistência à tração obtida já é considerada elevada para aplicação como revestimento a partir de 12% de cimento na composição. Assim, pode-se inferir que econômica e ambientalmente não seria necessário o uso de maiores quantidades do ligante hidráulico para o adequado desempenho dessas argamassas.

Figura 5 - Resistência à tração na compressão diametral em função da porosidade total das argamassas



Outra forma de avaliação do desempenho desse tipo de produto é a partir do módulo de elasticidade. A capacidade de deformação do revestimento é um parâmetro importante, pois deve ser adequada para acompanhar as alterações dimensionais da edificação, visando evitar/difícultar a geração de fissuras, trincas ou falhas na interface que possam comprometer a aderência ou a estanqueidade do revestimento.

Os resultados obtidos são apresentados na Figura 6 e indicam o aumento do módulo em função da redução da porosidade (ou incremento no teor de cimento nas composições). Como o módulo de elasticidade tem relação com a densidade do material e esta, por sua vez, depende da porosidade total da argamassa, houve ótima correlação.

As mesmas argamassas industrializadas comercializadas no Brasil, avaliadas por Cardoso (2009) para determinação da resistência à tração na compressão diametral, tiveram o módulo de elasticidade quantificado apresentando faixa de variação de 5 a 18 GPa. Isso indica que das argamassas avaliadas neste trabalho somente a formulada com 8% de cimento apresentou-se dentro desse mapa. Teores maiores de cimento resultaram em composições muito pouco “deformáveis”.

Estatisticamente, constatou-se que a variação do teor de cimento resultou em diferenças significativas na variação do módulo de elasticidade e que todas as argamassas avaliadas são distintas entre si, mas pode-se inferir que não há necessidade da utilização de elevada quantidade de cimento nas composições para não comprometer a deformabilidade do revestimento aplicado.

Para que as argamassas de revestimento cumpram satisfatoriamente as funções a que são especificadas, uma série de propriedades devem ser

atendidas e mantidas durante a vida útil da edificação, entre as quais uma das mais importantes é a capacidade de aderência à base.

O desempenho mecânico da interface argamassa-substrato foi avaliado a partir de resistência de aderência à tração ( $R_{ad}$ ). Trata-se da propriedade do revestimento de resistir a tensões normais ou tangenciais na interface com o substrato. Os resultados são apresentados na Figura 7 em função da relação água-cimento; não foram avaliados em função da porosidade, pois esta não foi determinada para o corpo de prova arrancado. Adicionalmente, é apresentada a quantidade de cimento para cada argamassa. Optou-se por apresentar todos os resultados obtidos para melhor ilustração do desvio do ensaio, indicando os símbolos sem preenchimento a resistência de aderência média.

Os resultados apontam para a redução da  $R_{ad}$  em função do aumento da relação a/c, ou da diminuição do teor de cimento, mas, apesar de ser observada tendência linear com bom coeficiente de correlação, o desvio padrão foi elevado. No entanto, tal variabilidade é conhecida e intrínseca ao ensaio de arrancamento.

A normalização técnica brasileira não indica um valor mínimo para ensaios realizados sobre blocos cerâmicos. Indica somente um limite mínimo para os revestimentos aplicados sobre substrato padrão (>0,3 MPa). O fato é que resultados de aderência de argamassas aplicadas sobre esse tipo de substrato sempre são superiores aos resultados obtidos após a aplicação sobre blocos cerâmicos ou de concreto comumente empregados nas obras, em função da absorção e da rugosidade distintas. Entretanto, ainda assim os resultados obtidos foram superiores aos estipulados para o substrato padrão, indicando adequada resistência de aderência.

Figura 6 - Módulo de elasticidade dinâmico em função da porosidade total das argamassas

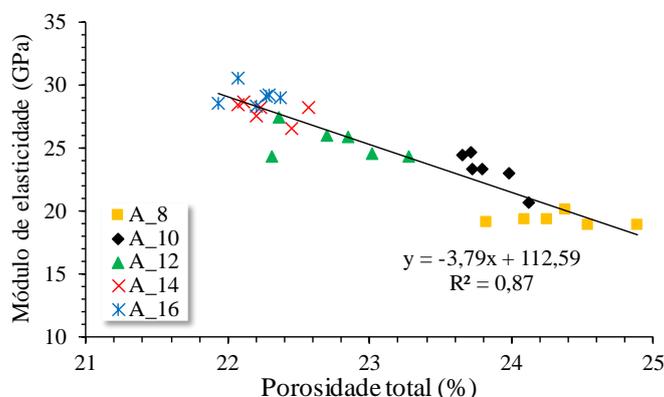
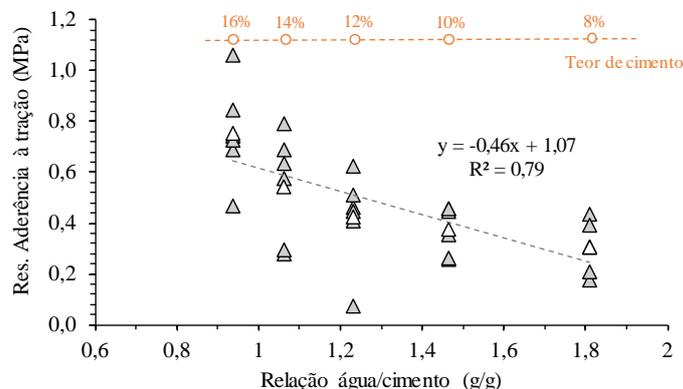


Figura 7 - Resistência de aderência à tração das argamassas em função da relação água-cimento. É ilustrado também o teor de cimento utilizado em cada composição - os símbolos sem preenchimento indicam a resistência de aderência média



Estatisticamente, o valor de F calculado na análise de variância foi maior do que o F crítico, indicando que a hipótese de igualdade entre as médias deve ser rejeitada. Adicionalmente, no teste Tukey foi observado que somente existem diferenças significativas quando são comparadas as amostras formuladas com 8%, 10% ou 12% de cimento em relação às amostras moldadas com 14% ou 16% de ligante.

Como parte do sistema de vedação das edificações, os revestimentos têm a função de proteger os componentes internos da ação de agentes que podem causar manifestações patológicas, como a ação da umidade. Apesar de as propriedades avaliadas até aqui serem importantes para a caracterização do desempenho das argamassas de revestimento, pouca informação se tem em relação à durabilidade.

Uma das formas de se avaliar isso é através da permeabilidade, que determina a taxa de penetração de fluidos em materiais porosos decorrentes de gradientes de pressão. Assim, pode-se dizer que essa propriedade apresenta íntima relação com a durabilidade dos revestimentos e está diretamente relacionada com diversos fatores, como a natureza química dos componentes da argamassa, a distribuição granulométrica, o teor de ligantes, a condição de aplicação, entre outros (TORRENT, 1992; TORRENT; FRENZER, 1995; INNOCENTINI *et al.*, 2009; CARDOSO, 2009; ROMANO, 2013; ROMANO; TORRES; PILEGGI, 2015).

Na Figura 8 é apresentado o resultado da permeabilidade ao ar em função da relação água-cimento. Os teores de cimento utilizados em cada composição são apresentados na parte da cima da figura.

Observa-se que não há nenhuma tendência clara. A variação dos resultados foi elevada e estatisticamente não há como dizer que existem diferenças provocadas pelo aumento no teor de ligante ou redução da relação água-cimento nas argamassas. Dessa forma, não se pode dizer, a partir dos resultados de permeabilidade ao ar, que o aumento no teor de cimento na composição das argamassas avaliadas promove ganho de durabilidade no revestimento aplicado.

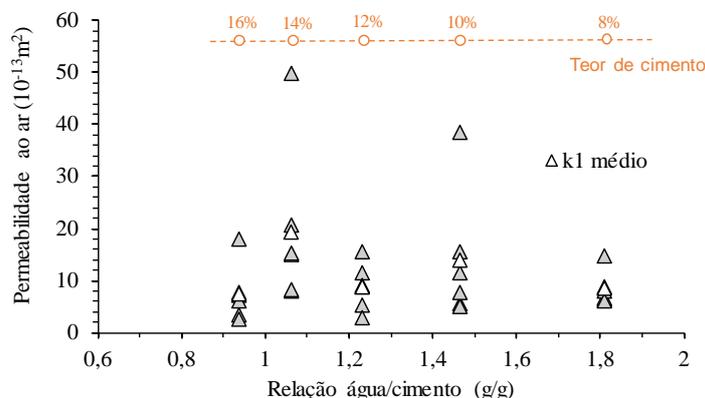
Independentemente disso, a ordem de grandeza de permeabilidade obtida para as argamassas avaliadas neste trabalho converge com o que foi estudado por Cardoso (2013), nas argamassas industrializadas brasileiras e em algumas europeias (entre  $10^{-13}$  e  $10^{-15}$  m<sup>2</sup>).

## Conclusões

A diminuição do consumo de cimento na composição de argamassas de revestimento é uma alternativa muito importante para a redução do impacto ambiental da cadeia de produção do ligante, mas o desenvolvimento das composições deve ser feito atentando-se para as principais características de desempenho e durabilidade dos produtos.

Com o aumento do teor de cimento e a consequente redução da relação água-cimento nas composições avaliadas, a porosidade das argamassas diminuiu, resultando em aumento da resistência à tração, no módulo de elasticidade dinâmico e na resistência de aderência. No entanto, estatisticamente foi possível observar que o aumento do teor de cimento acima de 12% em massa não resultou em ganhos consideráveis nas propriedades das argamassas.

Figura 8 - Permeabilidade das argamassas em função da relação água-cimento - os teores de cimento utilizados em cada composição são apresentados acima. Os símbolos sem preenchimento indicam a resistência de aderência média



No caso do resultado de permeabilidade ao ar, por outro lado, propriedade intimamente ligada à durabilidade, não foi observada nenhuma variação em relação ao teor do ligante.

Comparando-se os resultados do estado endurecido com os resultados obtidos para argamassas industrializadas brasileiras e algumas europeias, constatou-se que os produtos avaliados neste trabalho apresentavam propriedades adequadas para um produto comercial, mesmo nos menores teores de cimento.

Sendo assim, pode-se concluir que não há necessidade da produção do revestimento com elevado consumo do ligante e que, mesmo com o mínimo teor utilizado de 8%, as argamassas apresentam condições adequadas de aplicação.

## Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAN DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278**: argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos: determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAN DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAN DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15839**: argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos: caracterização reológica pelo método *squeeze-flow*. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAN DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15630**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2008

CARDOSO, F. A. **Método de Formulação de Argamassas de Revestimento Baseado em Distribuição Granulométrica e Comportamento Reológico**. São Paulo, 2009. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

CARDOSO, F. A.; JOHN, V. M.; PILEGGI, R. G. Rheological Behavior of Mortars Under Different Squeezing Rates. **Cement and Concrete Research**, v. 39, n. 9, p. 748–753, set. 2009.

FUNK, J. E.; DINGER, D. R. Particle Packing, Part II: review of packing of polydisperse particle systems. **Interceram**, v. 41, n. 2, p. 95-97, 1992a.

FUNK, J. E.; DINGER, D. R. Particle Packing, Part III: discrete *versus* continuous particles sizes. **Interceram** v. 1, n. 5, p. 332-334, 1992b.

FUNK, J. E.; DINGER, D. R. Particle Packing, Part IV: computer modelling of particle packing phenomena. **Interceram** v. 42, n. 3, p. 150-152, 1993.

FUNK, J. E.; DINGER, D. R. **Predictive Process Control of Crowded Particulate Suspensions Applied to Ceramic Manufacturing**. London: Kluwer, 1994a.

FUNK, J. E.; DINGER, D. R. Particle Packing, Part V: computational methods applied to experimental distribution. **Interceram**, v. 43, n. 3, p. 150-154, 1994b.

HU, C.; LARRARD, F. Rheological Testing and Modelling of Fresh High Performance Concrete. **Materials and Structures** v. 28, p. 1-7, 1995.

INNOCENTINI, M. D. M. *et al.* Permeability Characterization of Hot Aerosol Filters Prepared With Foaming of Ceramic Suspensions. **Cerâmica**, v. 55, n. 336, p. 437-447, dez. 2009.

JOISEL, A. **Fissuras y Grietas en Morteros y Ormígonos: sus causas y remedios**. 5. ed. Barcelona: Editores Técnicos Asociados, 1981.

MANTELLATO, S.; PALACIOS, M.; FLATT, R. J. Reliable Specific Surface Area Measurements on Anhydrous Cements. **Cement and Concrete Research**, v. 67, p. 286-291, 2015.

OLIVEIRA, I. R. *et al.* **Dispersão e Empacotamento de Partículas**. São Paulo: Fazendo Arte, 2000.

POWERS, T. C. **The Properties of Fresh Concrete**. New York: John Wiley, 1968.

ROMANO, R. C. O.; CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G. Propriedades do Concreto no Estado Fresco. In: ISAIA, G. C. **Concreto: ciência e tecnologia**. São paulo: Arte Interativa, 2011.

ROMANO, R. C. DE O. **Incorporação de Ar em Materiais Cimentícios Aplicados em Construção Civil**. São Paulo, 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) — Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

ROMANO, R. C. O.; TORRES, D. R.; PILEGGI, R. G. Impact of Aggregate Grading and Air-Entrainment on the Properties of Fresh and Hardened Mortars. **Construction and Building Materials**, v. 82, p. 219-226, 2015.

TORRENT, R. J. A Two-Chamber Vacuum Cell for Measuring the Coefficient of Permeability to Air of the Concrete Cover on Site. **Material Structure**, v. 25, p. 358-365, 1992.

TORRENT, R. J.; FRENZER, G. Methods for Measuring and Assessing the Characteristics of Concrete Cover on Site. **Report # 516**, Office Fédéral des Routes, Zürich, 1995.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao Consórcio Setorial para Inovação em Tecnologia de Revestimentos de Argamassa (Consitra) e ao CNPq, processo nº 155357/2016-6, pelo apoio financeiro para a realização do trabalho.

### Marcel Hark Maciel

Escola Politécnica | Universidade de São Paulo | Avenida Professor Almeida Prado, 83, Trav. 2, Cidade Universitária | São Paulo - SP - Brasil | CEP 05508-900 | Tel.: (11) 3091-5382 | E-mail: marcel\_hark\_maciel@hotmail.com

### Heitor Montefusco Bernardo

Escola Politécnica | Universidade de São Paulo | E-mail: heitorbernardo@live.com

### Gabriela Simões Soares

Escola Politécnica | Universidade de São Paulo | E-mail: gabriela.simoess95@hotmail.com

### Roberto Cesar de Oliveira Romano

Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica | Universidade de São Paulo | Tel.: (11) 3091-5248 | E-mail: rcorjau@gmail.com

### Maria Alba Cincotto

Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica | Universidade de São Paulo | Tel.: (11) 3091-5544 | E-mail: cincotto@usp.br

### Rafael Giuliano Pileggi

Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica | Universidade de São Paulo | Tel.: (11) 3091-5442 | E-mail: rafael.pileggi@usp.br

### Revista Ambiente Construído

Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído  
Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro  
Porto Alegre - RS - Brasil  
CEP 90035-190  
Telefone: +55 (51) 3308-4084  
Fax: +55 (51) 3308-4054  
www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido  
E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br