

## ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA DO AGREGADO MIÚDO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE DURABILIDADE DAS ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO

### ANALYSIS OF INFLUENCE OF THE FINE AGGREGATE PARTICLE SIZE IN THE MECHANICAL PROPERTIES AND DURABILITY OF COATING MORTAR

Lucimar Dias Haddad<sup>1</sup>, Caio Martin Costa<sup>2</sup>, Pedro Henrique Pires Lopes<sup>3</sup>, Antônio Neves de Carvalho Júnior<sup>4</sup>, White José dos Santos<sup>5</sup>

Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG

<sup>1</sup>Engenheira Civil, Mestranda em Construção Civil, E-mail: ldoeng@ig.com

<sup>2</sup>Graduando em Engenharia Civil, E-mail: caiomc1@hotmail.com

<sup>3</sup>Graduando em Engenharia Civil, E-mail: pedrohplopes@gmail.com

<sup>4</sup>Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Professor Associado, Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, E-mail: ancjunior@gmail.com

<sup>5</sup>Doutor em Engenharia Civil, Professor Adjunto, Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, E-mail: white.santos@demc.ufmg.br.

#### RESUMO

A construção civil apresenta elevada demanda por produtos e tecnologias construtivas que garantam melhor desempenho e maior durabilidade, necessitando do conhecimento do comportamento dos materiais e da influência que eles exercem nas propriedades dos compostos cimentícios. Este trabalho objetiva a verificação experimental da influência da granulometria do agregado miúdo nas argamassas mistas de revestimento, tanto no estado fresco, quanto no endurecido. Avaliou-se o empacotamento das partículas por meio da massa unitária solta das faixas granulométricas da ABNT NBR 248:2003 e de cada peneira individualmente. Em seguida, foi feita análise das propriedades mecânicas (resistências à compressão, à tração na flexão e potencial de aderência à tração e módulo de elasticidade dinâmico) e de indicadores de durabilidade (massa unitária aparente; consistência; densidade de massa e teor de ar incorporado no estado fresco; porosidade superficial; absorção de água por imersão e por capilaridade e imagens de microestrutura) para argamassas confeccionadas com agregado natural por meio das seguintes curvas granulométricas: ABNT NBR 248:2003, Carneiro e Cincotto (1999) e Reed (1995). Os ensaios foram avaliados nas idades de 7, 21 e 28 dias. Evidenciou-se que a distribuição granulométrica dos agregados influencia expressivamente as propriedades analisadas e devem ser consideradas durante o processo de dosagem e especificação.

**Palavras-chave:** propriedade mecânicas, durabilidade, argamassa de revestimento, agregados.

#### ABSTRACT

The building has a high demand for products and construction technologies to ensure optimum performance and durability, requiring knowledge of the behavior of materials and the influence they exert on the properties of cement composites. This work aims to experimental verification of the particle size influence of the fine aggregate in mixed mortar coating, both fresh and hardened. The particle packing was evaluated by loose bulk density of the particle sizes specified in NBR 248: 2003 and each sieve individually. Then, mechanical properties were determined by means of mechanical analysis (compressive strength, tensile strength in bending and potential adhesion to the tensile and dynamic modulus of elasticity) and durability indicators (loose bulk density, consistency, density and mass entrained air content either fresh, surface porosity, for water absorption and capillary microstructure and images) for mortars made with natural aggregate through size distribution curves - NBR 248: 2003, Carneiro and Cincotto (1999) and Reed (1995). The tests were evaluated the ages of 7, 21 and 28 days. It was evident that the particle size distribution of aggregates significantly influences the properties analyzed and should be considered during the process of dosage and specification.

**Keywords:** mechanical property, durability, coating mortar, aggregates.

## 1 – INTRODUÇÃO

De acordo com Bauer (2005), Sahmaran *et al.* (2009) e Carasek (2007), o agregado nas argamassas pode ser definido como o esqueleto dos sistemas de revestimentos executados, interferindo diretamente na resistência mecânica, no módulo de deformação e em outras propriedades. Santos (2014) afirma que o agregado garante certa resistência interna da mistura, com capacidade de suportar as tensões internas surgidas em função da variação

volumétrica, quando a argamassa está em processo de secagem, sendo responsável pela resistência à fissuração advinda da retração hidráulica.

De Larrard (1999) define a densidade de empacotamento como o volume de um sólido em relação a uma unidade de volume. Ela influencia o bom desempenho dos compostos cimentícios e depende, principalmente, da melhor distribuição dos grãos (PENG; HU; DING, 2009; FORMAGINI, 2005), da forma dos agregados (MENG *et al.*, 2012 e GOMES; BARROS, 2009) e do método de

processamento do empacotamento (FORMAGINI, 2005) e permite minimizar a porosidade da mistura, além de garantir o consumo mínimo possível de pasta de aglomerante para uma maior compactidade.

De Larrard (2009) fez experimentos adicionando água na dosagem ótima dos materiais secos a fim de avaliá-la se ainda seria a melhor dosagem, chegando à conclusão, dentre outras, de que: ao adicionar água à mistura seca, as propriedades reológicas devem ser consideradas; a densidade de empacotamento da mistura granular seca influencia a viscosidade plástica; a tensão de escoamento é mais influenciada pelas partículas finas do que pela densidade de empacotamento e a quantidade de areia fina é reduzida com a presença de pasta.

Silva (2014) constatou que uso de agregado mais leve podem melhorar alguns propriedades como aderência e isolamento térmico-acústico pelo peso reduzido dos agregados, contudo tente a reduzir as propriedades mecânicas com compressão e tração. Destaca ainda, que materiais menos absorventes necessitam de menor quantidade de água e dosagem idênticas poderão maximizar a retração hidráulica a fluidez destas argamassas.

Para Silva, Segadães e Devezas (2004), a distribuição granulométrica influencia a densidade de empacotamento, as propriedades físicas dos materiais compósitos cimentícios e dos sistemas refratários. De acordo com Cincotto, Angulo e Carneiro (2012), a granulometria descontínua não produz o melhor empacotamento de partículas e nem o menor índice de vazios, mas confere fluidez com menor teor de água de mistura em função da maior mobilidade e de menor atrito interno das partículas de agregado.

As argamassas de revestimento e de assentamento são produtos com grande utilização em edificações. A possibilidade de aprimorar as propriedades destes compósitos, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, proporciona inúmeros benefícios à construção civil, tais como:

- produção de argamassas com menor propensão de fissuração à retração com a utilização de granulometria adequada (CINCOTTO; SILVA; CARASEK, 1995);

- aproveitamento de partículas finas para confecção de argamassas menos porosas, menos suscetíveis a ataques de agentes externos e, portanto, mais duráveis (GOBLE e COHEN, 1999; KADRI; DUVAL, 2002; NENO, 2010 e ARNOLD, 2011). Estas partículas podem ser inerte trabalhando como fíleres (PENG; HU; DING, 2009) ou reativas (ANKUSK; RAJEEV; KOSHITA, 2014) contribuindo para ganho de resistência ou reduzindo o consumo de cimento;

- melhor utilização dos agregados miúdos por meio de uma distribuição granulométrica adequada (SILVA, 2014 e SANTOS, 2014), permitindo inclusive o uso de resíduos (OLIVEIRA; CABRAL, 2011 e SANTOS, 2011);

- verificação da possibilidade de confecção de argamassas com boa trabalhabilidade, reduzindo a mão de obra de produção e de aplicação, com melhor área de extensão e aderência, garantindo melhor desempenho (BAÍA; SABBATINI, 2008);

- maior eficiência no processo de dosagem, mistura, aplicação e durabilidade, devido ao maior aproveitamento e

aperfeiçoamento dos materiais disponíveis, a fim de gerar produtos de melhor desempenho, menor custo, com garantia de maior durabilidade, ecologicamente corretos, com menos necessidade de manutenção, além da redução do surgimento de patologias (SILVA, 2014 e SANTOS, 2014).

## 2 – MATERIAIS E PROGRAMA EXPERIMENTAL

Empregou-se o Cimento Portland do tipo CP II-E-32, fabricado pela HOLCIM do Brasil S.A.; Cal Hidratada Especial Aditivada tipo CH I – MASSICAL, fabricada pela ICAL Ltda e agregados miúdo natural quartzoso.

Os ensaios de Difração de Raios-X e Eflorescência de Raios-X apresentaram como compostos minerais para o agregado natural: quartzo ( $\text{SiO}_2$ ; trigonal) de forma abundante, ortoclásio ( $\text{Na}_{0,8}\text{Ca}_{0,2}\text{Al}_{1,2}\text{Si}_{2,8}\text{O}_8$ ; triclinico) com percentual médio-baixo, albita ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ; triclinico) com índice baixo, caulinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ; monoclinico) com teor baixo, ferro-hornblenda ( $\text{Ca}_2\text{Fe}^{2+}_4\text{Al}_{0,75}\text{Fe}^{3+}_{0,25}(\text{Si}_7\text{AlO}_{22})(\text{OH})_2$ ; monoclinico) baixo, goethita ( $\text{FeO}(\text{OH})$ , ortorrômbico) baixo-traço.

Neste trabalho foram consideradas quatro curvas granulométricas. Uma curva da ABNT NBR NM 248:2003 (curva 1), uma curva elaborada por Carneiro e Cincotto (1999): (curva 2) e duas curvas elaboradas por Reed (1995): (curvas 2 e 3).

A distribuição granulométrica da norma ABNT NBR NM 248:2003 considerada foi o ponto médio dos limites inferiores e superiores da zona ótima.

O método de dosagem de argamassas proposto por Carneiro e Cincotto (1999) visa ao aprimoramento da compactidade e eficiência das argamassas e é baseado na melhor utilização da curva granulométrica. Ele possibilitou a substituição de uma parte das partículas de cimento por areia sem prejuízo da resistência e da compactidade, inclusive com redução do consumo de água de amassamento para uma mesma trabalhabilidade, uma vez que o rolamento das partículas de diâmetros intermediários foi favorecida. A distribuição granulométrica foi obtida em função de uma equação geral de progressão geométrica (Equação 1) dos diâmetros dos agregados, em que os vazios entre os agregados de certo diâmetro são preenchidos por agregados de diâmetros menores, sucessivamente.

$$S_n = A' \frac{(1 - Pr^n)}{(1 - Pr)} \quad (1)$$

Em que:  $S_n$  = somatório da progressão geométrica;

$A'$  = quantidade do material retido na peneira que possui a maior abertura imediatamente inferior à abertura máxima característica;

$P_r$  = razão entre materiais retidos em cada peneira. Não pode ser igual a 1;

$n$  = número de peneiras da série adotada (peneiras da série normal com razão de abertura 2,0 – ABNT NBR 7211:2009).

A relação aglomerante/aglomerado é obtida por meio das formulações teóricas e das considerações de que todo o material passante na peneira # 200 (0,075 mm) seja aglomerante e que o material retido nas peneiras com aberturas a partir e acima da # 200 seja agregado.

Devem ser feitos ajustes nas curvas e fixação da relação finos/grossos, de forma a obter valores de  $P_r$  maiores do que 0,7 (valor mínimo para haver distribuição granulométrica contínua). Quanto mais o valor de  $P_r$  se aproximar de 1, maior será a compacidade e mais contínua se apresentará a curva granulométrica.

As curvas em massa são obtidas por meio de álgebra elementar e de proporções dos materiais nas curvas granulométricas. Os resultados permitiram concluir que a fração fina influencia diretamente o consumo de aglomerantes e que também preenche os espaços vazios da fração grossa; que a massa específica aparente da argamassa pode ser mensurada por meio da massa unitária da areia utilizada; que a série completa de peneiras permitiria produzir argamassas com maiores índices de retenção e de consistência, em função da maior utilização de aglomerantes.

O método de dosagem de argamassas proposto por Reed (1995) considera que o fator de empacotamento máximo das partículas depende do empacotamento das partículas grossas, médias e finas, com uso da Equação 2.

$$PF_{m\acute{a}x} = PF_c + (1 - PF_c)PF_m + (1 - PF_c)(1 - PF_m) PF_f \quad (2)$$

Em que:  $PF_{m\acute{a}x}$  = fração de empacotamento máximo;  
 $PF_c$  = fração de empacotamento de partículas grossas;  
 $PF_m$  = fração de empacotamento de partículas médias;  
 $PF_f$  = fração de empacotamento de partículas finas.

O autor refere-se às distribuições contínuas de outros autores e faz adaptações considerando porcentagens acumuladas de finos, conforme Equações 3 e 4.

$$F_m(a) = \left[ \frac{a}{a_{m\acute{a}x}} \right]^n \quad (3)$$

$$F_m(a) = \frac{a^n - a_{m\acute{a}x}^n}{a_{m\acute{a}x}^n - a_{m\acute{m}n}^n} \quad (4)$$

Em que:  $F_m$  = distribuição cumulativa de tamanhos menores que "a" em base mássica;  
 $a_{m\acute{a}x}$  = tamanho máximo de partícula;  
 $a_{m\acute{m}n}$  = tamanho mínimo de partícula;  
 $n$  = módulo de distribuição.

Cada uma das quatro curvas foi formulada com uma granulometria específica (vide Tabela 1 e Figura 1): ABNT NBR 248:2007 (Curva 1), Carneiro e Cincotto (1999) (Curva 2) e duas curvas de Reed (1995) (Curvas 3 e 4) para realização de ensaios a fim de atestar quais propriedades são influenciadas pela granulometria das partículas de agregados miúdos.

Forma avaliadas as propriedades no estado fresco: consistência (ABNT NBR 13276:2005), densidade de massa e do teor de ar incorporado (ABNT NBR 13278:2005); no estado endurecido: resistência à compressão (ABNT NBR 13279:2005), à tração na flexão (ABNT NBR 13279:2005) e potencial de aderência à tração (ABNT NBR 13528:2010), módulo de elasticidade dinâmico pelo ultrassom (ABNT NBR 15630:2009), densidade de massa (ABNT NBR 13280:2005), porosidade (ABNT NBR NM 45:2006), análise micro-estrutural, absorção de água por imersão (ABNT NBR 9778:2009) e

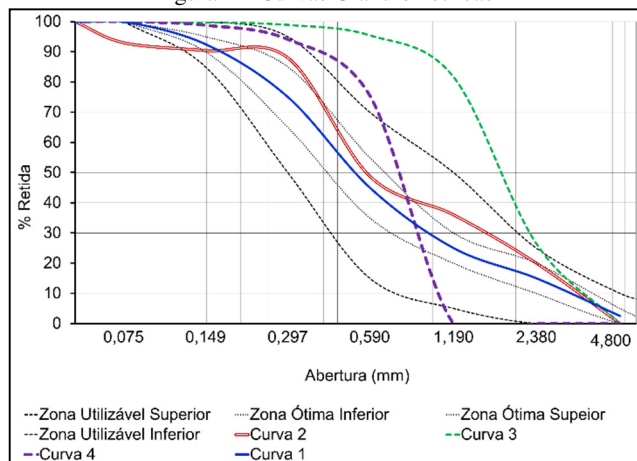
absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade (ABNT NBR 15259:2005).

Tabela 1 – Caracterização dos agregados miúdos utilizados.

	ABNT NBR 248	Carneiro (1999)	Reed (1995) (Grossa)	Reed (1995) (Fina)
	Curva 1	Curva 2	Curva 3	Curva 4
Diâmetro máximo	4,8	4,8	4,8	1,2
Módulo de finura	2,55	3,76	4,01	2,68
$\gamma_{real}$ (NM 52/2009)	2,59	2,59	2,59	2,59
Teor de argila (%)	Isento	Isento	Isento	Isento
Teor de Material Pulverulento (%)	0%	8%	0%	0%
Impureza orgânica (%)	< 300 p.p.m.	< 300 p.p.m.	< 300 p.p.m.	< 300 p.p.m.

Notas: Massa específica real (ABNT NBR NM 52:2009); Teor de argila (NBR 7218:2010); Teor de material pulverulento (ABNT NBR NM 46:2001); Impureza orgânica (ABNT NBR NM 49:2001).

Figura 1 – Curvas Granulométricas



O programa experimental foi realizado em duas fases. Primeiramente, houve a caracterização dos materiais e avaliação do empacotamento do material granular por meio de montagem e análise das faixas granulométricas previstas na ABNT NBR NM 248:2003. Ou seja, zona ótima: ponto médio e ponto médio com 5% de material pulverulento; limite inferior, limite inferior < 0,6mm e com 10% de material pulverulento; limite superior, limite superior com 5% de material pulverulento; zona utilizável: limite inferior, limite inferior < 0,6mm, limite superior. Em seguida, as curvas foram compostas considerando o traço padrão em volume 1:1:6 transformado em massa (Tabela 2), confecção das argamassas e moldagem dos corpos de prova.

Tabela 2 – Traço

Cimento (kg)	Cal (kg)	Areia (kg)	Água (L)
1,000	0,294	5,824	1,090

### 3 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Todos os ensaios foram realizados rigorosamente de acordo com os critérios estabelecidos nas normas técnicas correspondentes. Os resultados estão apresentados nos tópicos seguintes.

#### 3.1 Análise do empacotamento de partículas

A variação do empacotamento das partículas de agregado, distribuídas em conformidade com variadas faixas granulométricas da ABNT NBR NM 248:2003 e em cada peneira individualmente, foi aferida pela massa unitária solta (Figuras 2 e 3) e pelo coeficiente de vazios (Figuras 4 e 5).

Figura 2 – Massa unitária solta (kg/l) – faixas granulométricas

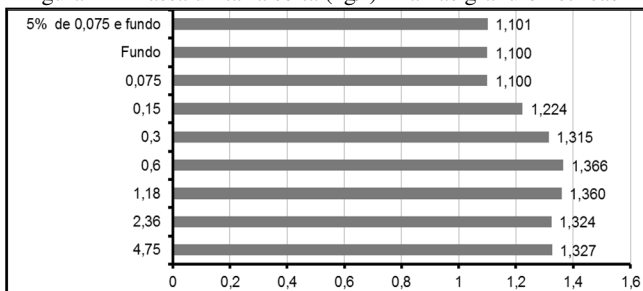


Figura 3 - Massa unitária solta (kg/l) – peneiras

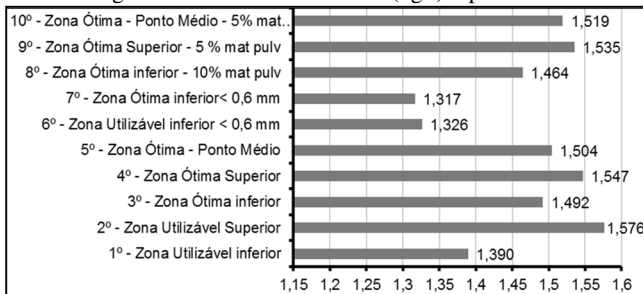


Figura 4 – Coeficiente de vazios (%) – faixas granulométricas

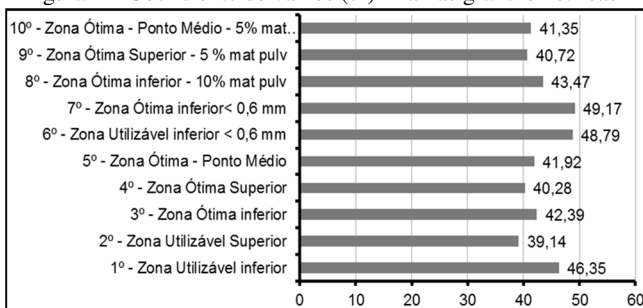
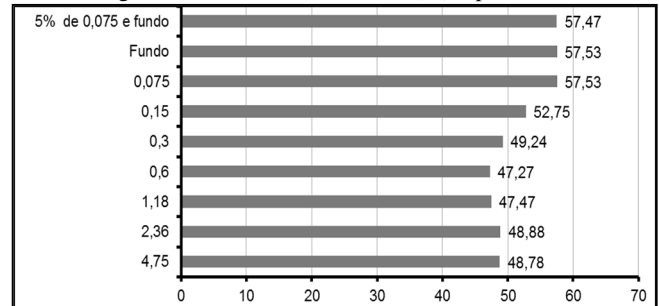


Figura 5 – Coeficiente de vazios (%) – peneiras



Ao analisar a massa unitária solta do agregado miúdo com relação às peneiras foi observado que os diâmetros medianos apresentaram melhores resultados. A maior massa unitária solta foi obtida com o diâmetro de 0,6 mm (1,366kg/l) seguida por 1,18 mm (1,360kg/l).

Distribuições granulométricas que produzem maior teor de vazios e, conseqüentemente, menor valor de massa unitária também necessitam de maior consumo de aglomerante para o preenchimento desses vazios. Na Figura 4 é possível perceber que as granulometrias que possuem quantidade considerável de grãos maiores (limite superior) apresentaram maior compacidade, e, portanto, menor coeficiente de vazios, proporcionando um melhor empacotamento de partículas. Assim, os menores coeficientes de vazios foram obtidos com a zona utilizável superior (39,14%) seguida pela zona ótima superior (40,28%) e os maiores foram obtidos por meio da zona ótima inferior < 0,6 mm (49,17%) e com a zona utilizável inferior < 0,6 mm (48,79%). Além disso, pelas Figuras 4 e 5 é possível constatar que ausência de variedade de diâmetros gera maiores coeficientes de vazios: o menor valor, obtido foi com a granulometria 0,6 mm (47,27%), é praticamente igual ao maior valor obtido com a distribuição da zona ótima inferior < 0,6 mm (49,17%).

A análise das Figuras de 2 a 5 demonstra que, isoladamente, o diâmetro 0,6mm produz maior massa unitária solta e menor coeficiente de vazios e que distribuição granulométrica com maior quantidade de agregados de maior diâmetro produz maior massa unitária solta. Logo, a produção de argamassas de revetimento que utilizam agregados com granulometria abaixo da peneira 0,6 mm (prática usual na produção de argamassas) produz maior coeficiente de vazios, necessitando de maior quantidade de aglomerante para preenchê-los.

Com a determinação de curvas granulométricas adequadas, com diâmetros que possibilitem maiores massas unitárias, é possível produzir argamassas com melhores desempenho e resistências, porosidade adequada e mais duráveis.

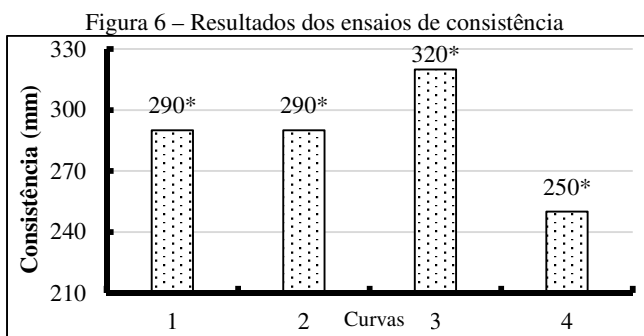
#### 3.2 Análise das propriedades das argamassas

São apresentados os resultados de cada de propriedade associada ao seu erro padrão. Foram realizados testes estatísticos para verificação da conformidade dos erros (coeficiente de variação) e testes para verificar se os valores entre as curvas eram significativamente diferentes.

### 3.2.1 Consistência (*Flow Table*)

Na Figura 6 são apresentados os resultados médios da consistência das argamassas. Ao analisar a Figura 6 é possível constatar que o maior valor foi obtido por meio da curva 3 e o menor por meio da curva 4.

A curva 1 apresenta distribuição granulométrica contínua que favorece a consistência, mas é a única curva que possui granulometria de 4,8mm. Essa curva possui o menor módulo de finura (MF = 2,55) de todas as curvas, o que criou maior demanda de água de amassamento devido à maior superfície específica (DE LARRARD, 2009). Como o fator a/c foi constante para todas as curvas, a água foi insuficiente para envolver todos os grãos e prejudicou a consistência. E, durante os experimentos, foi possível observar que tal curva proporcionou uma argamassa com média aspereza.



A curva 2 apresenta distribuição granulométrica semelhante à curva 1 e suas consistências foram as mesmas.

A curva 3 é a que contém maior quantidade de grãos grosseiros, com maior MF (4,01) de todas as curvas. Os agregados de maior diâmetro possuem superfície específica menor e, conseqüentemente, apresentam menor demanda de água de amassamento. Como a quantidade de água utilizada foi constante para todas as curvas, nessa dosagem ela foi superior à quantidade necessária, contribuindo para a produção de uma argamassa muito fluida e aumentando a consistência. Além disso, a distribuição granulométrica apresenta certa descontinuidade, em que a falta de algum diâmetro reduziu o atrito grão a grão e favoreceu a consistência, justificando seu maior valor (MENG; LI; ZHAO, 2012).

A curva 4 apresenta distribuição granulométrica tendente à uniformidade, com pouca variedade de diâmetros, o que prejudicou o rolamento dos grãos, enrijeceu o sistema e reduziu a consistência. Essa curva possui granulometria igual e abaixo de 0,6 mm, única curva com diâmetro característico de 1,2 mm. Seu baixo módulo de finura (2,68) gerou maior demanda de água, contribuindo para redução da consistência (PENG; HU; DING, 2009).

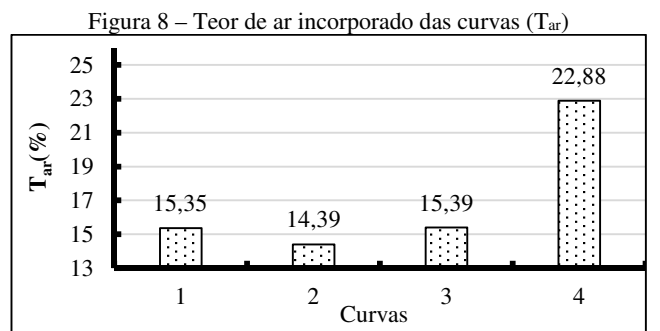
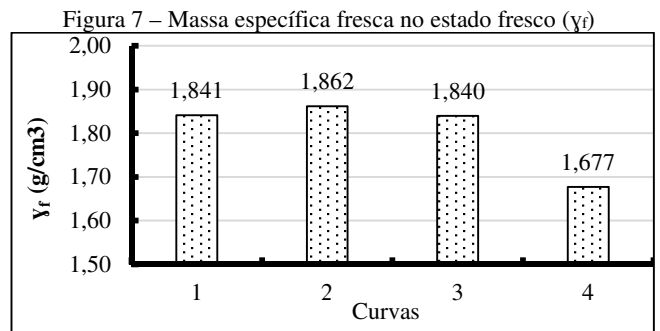
Gonçalves (2002) apresenta que uma pequena redução do índice de consistência deve-se, principalmente, ao efeito das pequenas partículas difundidas pela mistura, que atuam como uma barreira física para o movimento ascendente da água. Dessa forma, estes finos promovem um aumento da coesão, consistência e, conseqüentemente, redução da exsudação.

### 3.2.2 Densidade de massa e teor de ar incorporado – $\gamma_f$ , $T_{ar}$

Nas Figuras 7 e 8 são apresentados os resultados médios para a densidade de massa e teor de ar incorporado da argamassa.

A granulometria influenciou os valores dessas propriedades e as curvas que apresentam características de distribuição contínua (curvas 1 e 2) conferiram melhor arranjo do grãos, menor teor de ar incorporado e maior densidade de massa às argamassas (SILVA, 2014).

A curva 3 apresenta descontinuidade em sua distribuição, possui maior quantidade de areia grossa/média e pouca quantidade de areia fina, o que gerou piora no empacotamento das partículas e um pequeno aumento no teor de ar incorporado.



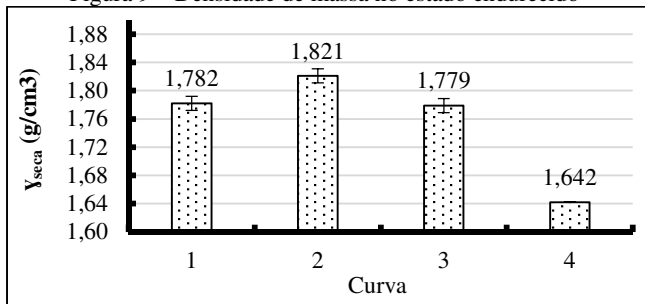
A curva 4 apresentou o pior resultado, possibilitando inferir que a uniformidade de uma distribuição granulométrica contribui negativamente para o arranjo entre os grãos. A pouca variedade de diâmetros piorou o empacotamento e criou grandes espaços vazios, causando redução da massa específica fresca.

De acordo com os critérios de classificação da densidade de massa no estado fresco da norma ABNT NBR 13281:2005, as curvas 1, 2 e 3 estão classificadas como D5 e a curva 4 como D4, logo possuem densidades altas e média.

### 3.2.3 Densidade de massa no estado endurecido – $\gamma_{seca}$

Na Figura 9 são apresentados os resultados médios,  $\pm$  erro padrão, para a densidade de massa no estado endurecido.

Figura 9 – Densidade de massa no estado endurecido



Os melhores resultados foram obtidos nas curvas 1 e 2. A curva 1, apesar de possuir distribuição granulométrica favorável à massa endurecida, apresentou menores valores do que a curva 2 em função da pouca quantidade de água que causou redução do poder de envolvimento do grão com pasta e piora na propriedade (KADRI; DUVAL, 2002). Como a curva 2 possui maior MF e, portanto, menor área específica, ela foi mais favorecida pela quantidade de água disponível.

A curva 3, por apresentar maiores porcentagens de areias grossa e média (maior MF das quatro curvas), apresentou maiores valores de densidade de massa no estado endurecido possibilitados pelo robustez do esqueleto sólido dessas areias, quando comparado com a curva 4, que possui menos quantidade de grãos mais grosseiros, além de distribuição granulométrica desfavorável (tendente à uniformidade).

De acordo com os critérios de classificação da norma ABNT NBR 13281:2005, as curvas estão classificadas como M5 e M6, logo, pode-se afirmar que elas são de alta densidade.

### 3.2.4 Absorção de água por imersão e porosidade

As Figuras 10 e 11 apresentam os resultados médios para a absorção de água por imersão e porosidade.

Figura 10 – Absorção de água por imersão ( $A_i$ )

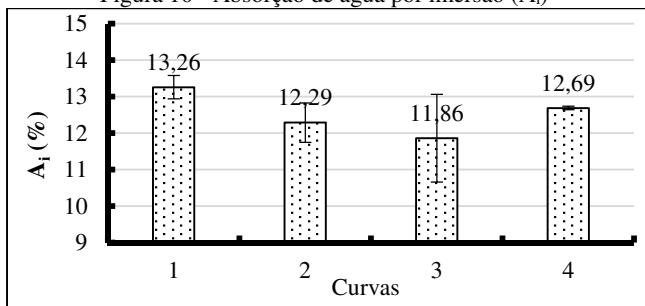
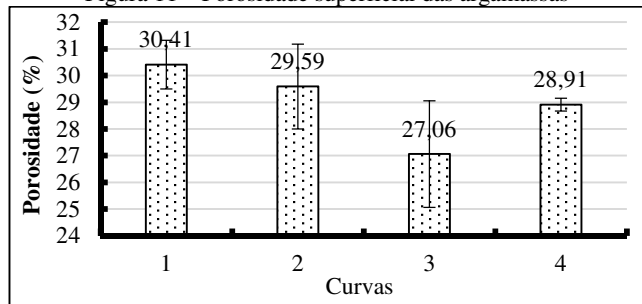


Figura 11 – Porosidade superficial das argamassas



Os resultados mostram que os valores de absorção e porosidade foram altos quando comparado com blocos concreto (ABNT NBR 3136: 2014 e MEHTA; MONTEIRO, 2014) contudo próximos, logo a granulometria não promoveu variação mensurável nessa propriedade. A justificativa desses altos valores está no fato de que nas argamassas de revestimento, a relação água/cimento é elevada (pode chegar a 20%) para garantir a trabalhabilidade, o que causou maior formação de vazios (poros), responsáveis pela maior absorção das argamassas (BAÍA; SABBATINI, 2008).

### 3.2.5 Análise microestrutural das argamassas

A microestrutura das argamassas foi avaliada por meio das imagens ópticas obtidas por lupa estereoscópica (Figura 12) e microscópio óptico (Figura 13).

As imagens com lupa estereoscópica (Figura 12) mostram que as argamassas, no geral, estão bem porosas, indo ao encontro com os resultados dos ensaios de absorção por imersão e porosidade.

Na curva 1 há grande quantidade de poros diminutos, com interligação entre eles. Na curva 2, os diâmetros dos poros superam um pouco o diâmetro dos poros da curva 1.

Na curva 3, os diâmetros dos poros são relativamente grandes comparados às outras curvas e há presença de considerável quantidade de bolhas de grandes diâmetros de ar incorporado.

Figura 12 – Imagem das argamassas com lupa estereoscópica

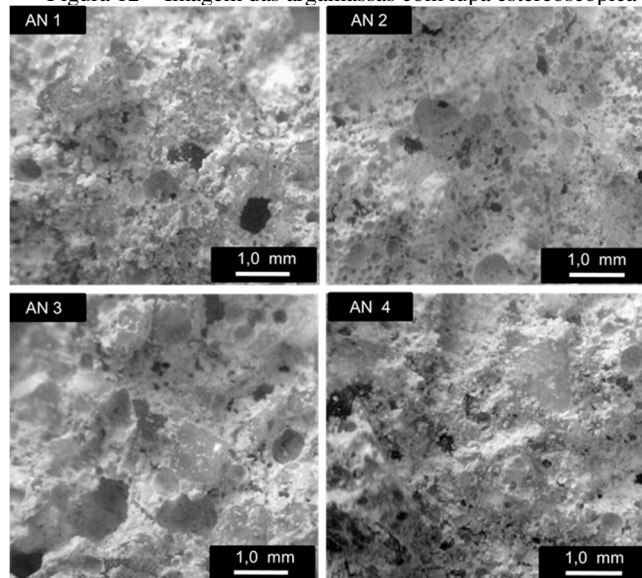
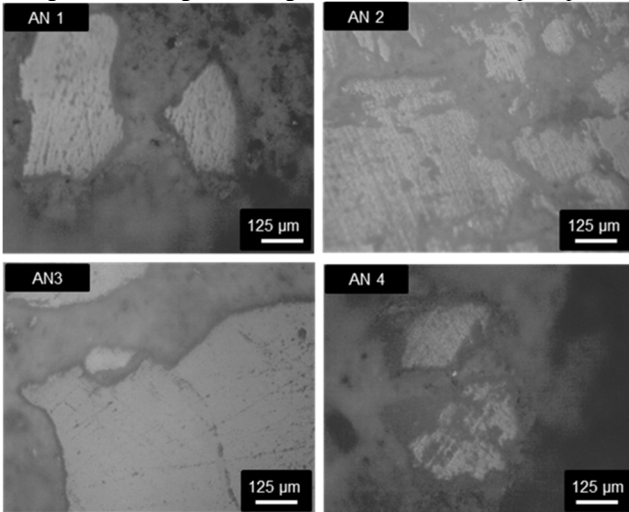


Figura 13 – Imagem das argamassas com microscópio óptico



Na Figura 13 percebe-se que a solidarização da matriz cimentícia com o agregado não foi totalmente adequada, apresentando poros.

Na curva 1, a quantidade de água inferior à necessária prejudicou a hidratação do cimento e a pasta não envolveu bem os agregados, surgindo muitos poros nessa interface.

A curva 2 apresentou melhor solidarização da pasta ao agregado devido à presença de granulometria fundo que contribui para criar o efeito filer e melhorar a zona de transição, onde é possível perceber a homogeneidade e bom envolvimento do material granular com a pasta.

A curva 3, com maior MF (4,01) de todas as curvas, apresentou excesso de água com maiores valores de consistência e piora da solidarização da pasta ao agregado.

A curva 4 possui distribuição com tendência à uniformidade e isso enrijeceu o sistema, prejudicou o rolamento grão a grão e aumentou a porosidade.

### 3.2.6 Absorção de água por capilaridade – $A_c$

Nas Figura 14 e Tabela 3 são apresentados, respectivamente, os resultados médios para a absorção de água por capilaridade e o coeficiente de capilaridade.

Figura 14 – Absorção de água por capilaridade ( $A_c$ )

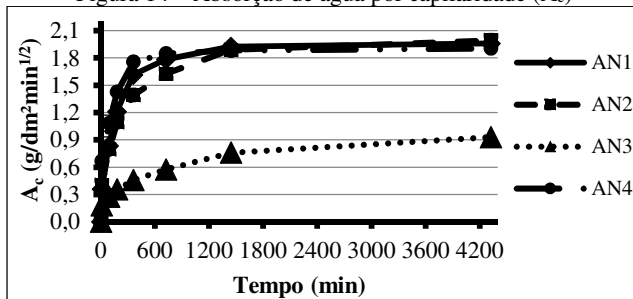


Tabela 3 – Coeficiente de capilaridade (CC)

(g/dm <sup>2</sup> ·min <sup>1/2</sup> )	Curva 1	Curva 2	Curva 3	Curva 4
CC	9,33	7,67	1,85	8,17
Erro	1,20	0,49	0,65	0,21

Ao analisar a Figura 12 é possível perceber grande quantidade de poros de pequenos diâmetros na curva 1, o que justifica sua grande capilaridade, uma vez que quanto menor for o diâmetro do poro, maior será altura de penetração da água nos capilares (GOBLE; COHEN, 1999). A quantidade de água da curva 1 foi insuficiente para promover o envolvimento de todos os grãos e gerou maior volume de vazios, aumentando a absorção de água da argamassa. Além disso, nessa curva há interligação dos poros, o que contribuiu para aumentar a permeabilidade e, conseqüentemente, a absorção de água.

A curva 2, com distribuição granulométrica do tipo contínua, como na curva 1, foi favorecida pela quantidade de água disponível, em função de seu MF ser maior do que o da curva 1, apresentou menor quantidade de água livre para formação de vazios, justificando sua menor capilaridade do que a curva 1. Além disso, os diâmetros dos poros superam um pouco o diâmetro dos poros da curva 1, o que contribui para reduzir a capilaridade (MEGN; LU; ZHAO, 2012).

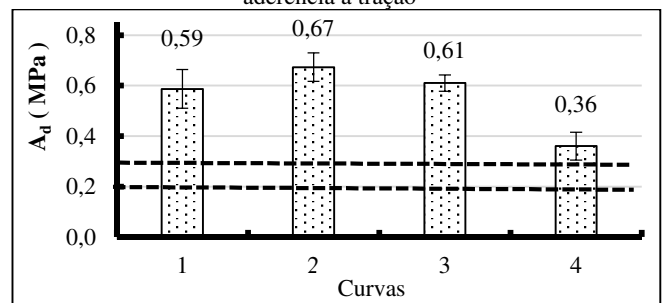
Na Figura 12 é mostrado que os poros da curva 3 estão se comunicando, o que contribuiria para aumento da permeabilidade e absorção da argamassa. Entretanto, há considerável quantidade de poros oriundos de bolhas de ar incorporadas com grandes diâmetros e isso contribuiu para impedir/reduzir o fluxo capilar, reduzir a capilaridade e a absorção por capilaridade. Além disso, os diâmetros dos poros são grandes, o que causa redução da capilaridade. A granulometria descontínua da curva 3, no geral, gerou poros com maiores diâmetros do que nas outras distribuições. A falta de alguns diâmetros originou poros grandes (macro poros) nas argamassas.

A distribuição granulométrica tendente à uniformidade da curva 4 promoveu enrijecimento do sistema, piorou o arranjo granular, aumentou o teor de ar incorporado, gerou muitos vazios e reduziu a massa específica no estado endurecido justificando sua considerável capilaridade.

### 3.2.7 Resistência potencial de aderência à tração – $A_d$

Na Figura 15 são apresentados os resultados médios para  $A_d$ .

Figura 15 – Resultados dos ensaios de resistência potencial de aderência à tração



A distribuição granulométrica do tipo contínua das curvas 1 e 2 favoreceu a resistência potencial de aderência à tração ( $A_d$ ), em função do melhor arranjo entre os variados diâmetros. O aumento da quantidade de areia mais grosseira (2,4 e 1,2 mm) e a utilização da granulometria fundo na



curva 2 possibilitaram maior ganho de resistência entre todas as curvas, demonstrando o efeito benéfico da distribuição contínua ao propiciar melhor arranjo entre as partículas e gerar a maior densidade de empacotamento, aos 28 dias, entre todas as curvas (1,821 g/cm<sup>3</sup>), além de favorecer a consistência e melhorar a área de contato da argamassa com o substrato (PEG, HU; DING, 2009).

A curva 3 é a que apresenta distribuição granulométrica mais destoante de todas as outras, com grande quantidade de areia grossa e média (2,4 a 0,6 mm). A consistência favorecida pela descontinuidade da distribuição e pela reduzida demanda de água (MF= 4,01) facilitou o preenchimento dos poros e das irregularidades da base com pasta, favoreceu a área de contato da pasta com o substrato, promoveu a ancoragem e favoreceu a aderência. Além disso, a considerável quantidade de grãos mais grosseiros, responsáveis pela sustentação física, proporcionou bons valores de  $A_d$ .

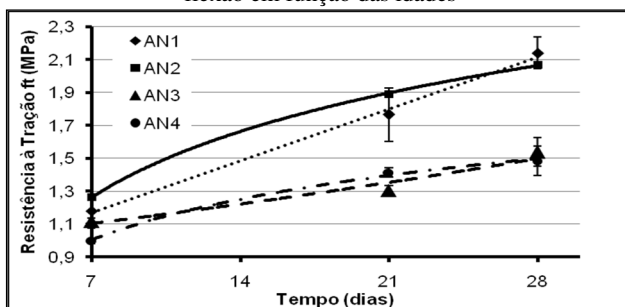
A distribuição da curva 4, com tendência à uniformidade, em função da grande quantidade de diâmetros do mesmo tamanho, originou o valor mais alto  $T_{ar}$  (22,88%) e o menor valor de  $A_d$ . O sistema granular enrijecido prejudicou a área de espalhamento, piorou a ancoragem do grão à pasta, gerou grande quantidade de vazios e prejudicou  $A_d$ .

Apesar das variações, todas as curvas apresentaram resistência à aderência superior a 0,3 MPa, viabilizando a utilização das argamassas tanto para revestimento interno quanto externo (ABNT NBR 13281:2005). Além disso, a maioria das rupturas ocorreu na interface argamassa/bloco.

### 3.2.8 Resistência à tração na flexão – $f_t$

Na Figura 16 são apresentados os resultados médios para  $f_t$  ao longo da idade para as curvas analisadas.

Figura 16 – Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão em função das idades



Verifica-se que os melhores resultados foram obtidos com as curvas 1 e 2. Eles apresentam continuidade em sua distribuição, o que influenciou positivamente  $f_t$ , à medida que os espaços entre os grãos maiores foram ocupados por grãos menores, gerando menor índice de vazios e maior compacidade da densidade de empacotamento (SAHMARAN, 2009). A curva 1 possui o menor MF (2,55) de todas as curvas e as argamassas ficaram ásperas.

Na curva 3 a distribuição apresenta características de descontinuidade, o que piorou o arranjo dos grãos e causou redução, aos 28 dias, da  $f_t$  em 28% em relação à curva 1.

Na distribuição com tendência à uniformidade da curva 4, a ausência de alguns diâmetros gerou muito vazio e, conseqüentemente, propiciou os piores resultados de  $f_t$ .

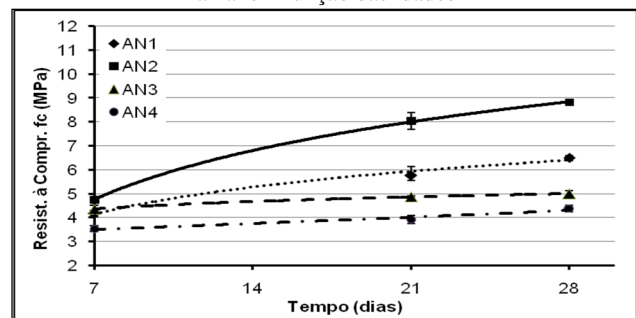
De acordo com a norma ABNT NBR 13281:2005, as curvas 1 e 2 são R4 e as curvas 3 e 4 são R2.

### 3.2.9 Resistência à compressão axial – $f_c$

Na Figura 17 são apresentados os resultados médios para  $f_c$  ao longo da idade para cada curva analisada.

As maiores resistências à compressão também foram obtidas com as curvas 1 e 2, cujas distribuições granulométricas apresentam continuidade na distribuição granular, favorecendo a compacidade e reduzindo os vazios (DE LARRARD, 2009). Os melhores resultados foram obtidos na curva 2, cuja granulometria se diferencia da curva 1, principalmente, pela maior porcentagem de grãos grosseiros e pela presença da fração fundo.

Figura 17 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial em função das idades



A maior quantidade de grãos grosseiros na curva 2 contribuiu para aumentar a densidade de massa no estado endurecido e, conseqüentemente,  $f_c$ . Além disso, a granulometria fundo preencheu os espaços entre os grãos maiores, melhorou o empacotamento dos grãos e conferiu maior densidade e menor teor de vazios quando comparada à curva 1 (CINCOTTO; ANGULO; CARNEIRO, 2012). A curva 2, cuja granulometria está mais próxima da zona ótima superior, apresentou melhores resultados do que a curva 1, mostrando que diâmetros maiores conferem maiores resistências.

Os resultados mais baixos foram obtidos com as curvas 3 e 4. A falta de alguns diâmetros na descontinuidade da curva 3 fragilizou a compacidade e reduziu a massa endurecida e a resistência à compressão, comparativamente às curvas 1 e 2. A curva 4 possui distribuição granulométrica mais uniforme. Os grãos com tamanhos bem parecidos enrijeceram o sistema, prejudicaram a trabalhabilidade, o rolamento grão a grão e o empacotamento, originando maiores quantidades de vazios e menor compacidade (ARNOLD, 2011). Além disso, a quantidade de grãos finos foi insuficiente para preencher os espaços entre os grãos mais grossos, gerando redução na densidade de massa no estado endurecido e aumento do teor de ar incorporado (piores resultados de todas as curvas).

Os resultados de  $f_t$ , ao longo das idades estão diretamente relacionados com  $f_c$ , de forma que um incremento no valor de  $f_c$  gerou também acréscimo de  $f_t$ . A



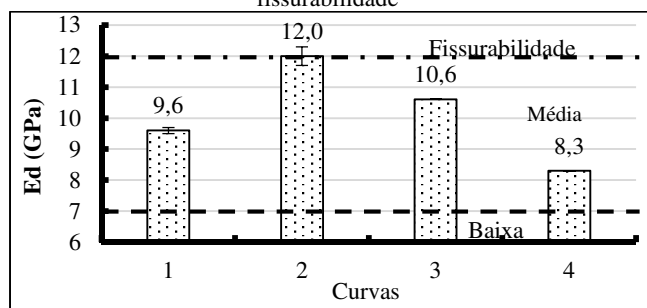
correlação entre as duas propriedades mostrou que a resistência à tração na flexão encontra-se a 19% de  $f_c$  corroborando as afirmações de Mehta e Monteiro (2014).

### 3.2.10 Módulo de elasticidade dinâmico – $E_d$

Na Figura 18 são apresentados os resultados médios de  $E_d$  para as curvas analisadas.

Os experimentos permitiram atestar que, no geral, há uma relação direta do  $E_d$  com a compressão axial e a massa específica no estado endurecido. O  $E_d$ , em função da densidade de massa no estado endurecido, garante rigidez à argamassa para resistir aos esforços de compressão. Os melhores resultados foram garantidos pela distribuição contínua das curvas 1 e 2, em função dos benefícios desse tipo de distribuição.

Figura 18 – Módulo de elasticidade dinâmico com os limites de fissurabilidade



O módulo de elasticidade apresentou, no geral, relação de proporcionalidade inversa com o teor de ar incorporado. As bolhas de ar aumentaram a capacidade de deformação da argamassa e reduziram sua rigidez.

A argamassa, ao absorver os esforços atuantes, tende a se deformar (SAHMARAN, 2009). O  $E_d$  deve possuir valor suficiente para resistir aos esforços sem o rompimento da argamassa. Entretanto, rigidez em excesso impede a absorção da deformação e pode causar fissuras. Portanto, a tendência à fissurabilidade de uma argamassa depende de valores do módulo de elasticidade dinâmico e as argamassas ensaiadas estão classificadas como média fissurabilidade ( $7\text{GPa} < E_d < 12\text{GPa}$ ).

## CONCLUSÕES

Foi possível concluir que esta pesquisa contribuiu para geração de produtos, aplicáveis à engenharia civil, que garantam melhores propriedades e desempenho técnico, maior durabilidade, menor custo e com utilização de insumos que reduzam a degradação da natureza a fim de manter a sustentabilidade ambiental.

A realização do programa experimental permitiu constatar que a utilização de distribuição granulométrica adequada garante a manutenção e melhoria da eficiência das propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido, repercutindo na ampliação da durabilidade desses elementos.

De forma geral, as granulometrias contínuas são mais adequadas e a presença de finos pode ajudar tanto na consistência e coesão (estado fresco) como na resistência

mecânica, fechando poros – ou reduzindo-os, melhorando o desempenho físico e a durabilidade das argamassas.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi possível graças ao apoio das agências: CAPES, CNPq, FAPEMIG, UFMG.

## REFERÊNCIAS

- ANKUSH, G.; RAJEEV, C.; KOSHTA, M. K. **Influence of Fine Aggregate Particle Size and Fly-ash on the Compressive Strength of Mortar for SCC**. International Journal of Scientific and Research Publications, v. 4, n. 1, Jan. 2014
- ARNOLD, D. C. M. **Análise da influência da forma dos grãos nas propriedades das argamassas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade do Vale do Rio do Sinos, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- \_\_\_\_\_. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005.
- \_\_\_\_\_. **NBR 13278**: Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.
- \_\_\_\_\_. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.
- \_\_\_\_\_. **NBR 13280**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.
- \_\_\_\_\_. **NBR 13281**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.
- \_\_\_\_\_. **NBR 15259**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro, 2005.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 45**: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 52**. Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009
- \_\_\_\_\_. **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, 2009.
- \_\_\_\_\_. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.
- \_\_\_\_\_. **NBR 13528**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2010.

- BAÍA, L. L. M.; SABBATINI, F. H. **Projeto e execução de revestimentos de argamassa**. 4. ed. São Paulo: Editora O Nome da Rosa, 2008.
- BAUER, E. **Revestimentos de Argamassa. Características e Peculiaridades**. 2. ed. Brasília: LEM-Unb; Sinduscon, 2005. 92 p.
- CARASEK, H. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto, 2007. 1 v. 795 p.
- CARNEIRO, A. M. P.; CINCOTTO, M. A. **Dosagem de argamassas através de curvas granulométricas**. IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas. São Paulo, ISSN 0103-9830, BT/PPCC/237, p. 1-18, 1999.
- CINCOTTO, M. A.; ANGULO, S. C.; CARNEIRO, A. M. P. Composições Granulométricas de argamassas e seus efeitos no estado fresco e endurecido. APFAC – Associação Portuguesa de Fabricantes de Argamassa de Construção, **4º Congresso Português de Argamassas e ETICS**. Documento 101, Portugal, 2012.
- CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. A. C.; CARASEK, H. C. **Argamassas de Revestimento: Características, propriedades e métodos de ensaio**. IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas. São Paulo, Boletim Técnico n° 68, 1995.
- DE LARRARD, F. **Concrete Mixture Proportioning**. Virtual Book, 1999. Disponível em: <[http://books.google.com.br/books?id=tXHjwTa0\\_tkC&printsec=frontcover&hl=pt-BR#v=onepage&q&f=false](http://books.google.com.br/books?id=tXHjwTa0_tkC&printsec=frontcover&hl=pt-BR#v=onepage&q&f=false)> Acesso em: 11 dez. 2015.
- DE LARRARD, F. Concrete optimisation with regard to packing density and rheology. **3<sup>rd</sup> International RILEM – Symposium on Rheology of Cement Suspensions such as Fresh Concrete**. France, v. 1, n. 215, p. 1-8, 2009.
- FORMAGINI, S. **Dosagem científica e caracterização mecânica de concreto de altíssimo desempenho**. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Engenharia – COPPE – UFRJ, Rio de Janeiro, 2005, 285 p.
- GOBLE, C. F.; COHEN, M. D. Influence of aggregate surface area on mechanical properties of mortar. **ACI Materials Journal**, v. 96, n. 6, p. 657-662, Nov.-Dec./1999. <http://dx.doi.org/10.14359/791>.
- GOMES, P. C. C.; BARROS, A. R. **Métodos de Dosagem em Concreto Autoadensável**, 1. ed., São Paulo: Editora Pini Ltda., 1 v., 2009, 164 p.
- GONÇALVES, J. P. **Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para a produção de concretos**. Porto Alegre, 2000. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 2000.
- KADRI, EL H.; DUVAL, R. Effect of ultrafine particles on heat of hydration of cement mortars. **ACI Materials Journal**, v. 99, n. 2, p. 138-142, Mar.-Apr., 2002. <http://dx.doi.org/10.14359/11705>.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**, 3. ed., São Paulo: Editora Ibracon, 1 v., 2014, 674 p.
- MENG, L.; LU, P.; LI, S.; ZHAO, J.; LI, T. Shape and size effects on the packing density of binary spherocylinders. **Powder Technology**, v. 228, p. 284-294, Sept. 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2012.05.033>.
- NENO, C. J. F. **Performance of mortar with incorporation of fine aggregate from crushed of concrete – Integration of CDW**. Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa. Dez, 2010.
- OLIVEIRA, M. E. D.; CABRAL, A. E. B. Argamassas de revestimento produzidas com agregados reciclados de Fortaleza, CE, Brasil. **Engenharia Civil**, UM, Braga, v. 41, n. 41, p. 21-34, 2011.
- PENG, Y.; HU, S.; DING, Q. Dense packing properties of mineral admixtures in cementitious material. **Particulate Science and Technology of Particles**, n. 7, p. 399-402, 2009.
- REED, J. S. **Principles of Ceramics Processing**. 2<sup>a</sup> ed. Nova York, EUA. John Wiley and Sons, Inc., 1995.
- SAHMARAN, M.; LACHEMI, M.; HOSSAIN, K. M. A.; RANADE, R.; LI, V. C. Influence of aggregates type and size on ductility and mechanical properties of engineered cementitious composites. **ACI Materials Journal**, v. 106, n. 3, p. 308-316, May.-Jun., 2009. <http://dx.doi.org/10.14359/56556>.
- SANTOS, W. J. **Metodologia de dosagem de argamassa de revestimento e assentamento**. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2014, 178 p.
- SANTOS, W. J. **Argamassa de alto desempenho**. Dissertação (Mestrado em Ambiente Construído), Universidade Federal de Juiz de Fora, 2011, 209 p.
- SILVA, A. P.; SEGADÃES, A. M.; DEVEZAS, T. C. Optimization of the packing density of alumina powder distributions using statistical techniques. **Cerâmica**, v. 50, n. 316, p. 345-354, 2004. <http://dx.doi.org/10.1590/S0366-69132004000400010>.
- SILVA, T. R. **Mechanical behavior of coating mortars with regranulated expanded cork**. Técnico Lisboa, julho, 2014.