

SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO POR FINOS DE BRITAGEM EM ARGAMASSA DE REVESTIMENTO

REPLACEMENT OF CEMENT BY CRUSHING FINES IN PLASTERING MORTAR

José Aparecido Canova

Doutor em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, PR, Brasil.

E-mail: jacanova@uem.br.

RESUMO

Consoante ao passivo ambiental gerado pelos subprodutos de pedra, este estudo teve como objetivo observar os efeitos dos finos de britagem com diâmetro inferior a 0,075 mm em substituição ao cimento, em propriedades da argamassa de revestimento. Para a mistura utilizou-se da cal virgem e areia natural no traço 1:6, em volume. A argamassa simples foi maturada para a hidratação da cal e recebeu o cimento compondo o traço 1:1,5:9, em volume, o qual teve como substituição 2,5%, 5%, 10%, 15% e 20%, respectivamente, em massa, dos finos de britagem. Avaliaram-se: massa específica, teor de ar incorporado, exsudação de água e retenção de água no estado plástico, a resistência à compressão axial e à tração na flexão, módulo de deformação estática, absorção de água por capilaridade e por imersão no estado endurecido. Como resultado, as argamassas com finos de britagem apresentaram redução no teor de ar incorporado e na retenção de água. As propriedades mecânicas aumentaram até os teores de 5%, mas voltou a reduzir no intervalo entre 5% e 10% de substituição. Porém, ocorreu aumento para as absorções de água. No geral, conclui-se que teores entre 5% e 10% de finos de britagem são viáveis à produção da argamassa.

Palavras-chaves: resíduo de pedreiras, argamassa mista, reaproveitamento de resíduo, materiais cimentícios.

ABSTRACT

According to the environmental liabilities generated by the quarry by-products, this study aimed to observe the effects of crushing fines with a diameter of less than 0.075 mm in replacement of the cement, in properties of the plastering mortar. For the mixture quicklime powder and natural sand were used in the proportion 1: 6 (by volume). The simple mortar was matured to hydrate the lime and received the cement, establishing the volumetric proportion of 1: 1.5: 9, which had as replacement 2.5%, 5%, 10%, 15% and 20% respectively (by mass) the crushing fines. There were evaluated: specific mass, air content, bleeding water retention in the plastic state, axial compressive and tensile flexural, static deformation modulus, water absorption by capillarity and immersion in hardened state. As a result, mortars with crushing fines showed reduction air content and water retention. The mechanical properties increased up to 5%, but decreased again in the range of 5% to 10% of substitution. However, there was increase in water absorption. In general, it is concluded that between 5% and 10% of the crushing are feasible to produce the mortar.

Keywords: quarry waste, mixed mortar, reuse of waste, cementations materials.

1 – INTRODUÇÃO

Um dos agregados mais utilizados no setor da construção civil no Brasil é a pedra britada. Porém, as empresas que desenvolvem essa atividade enfrentam um grande desafio que é conciliar a exploração e com a preservação do meio ambiente.

Segundo Calaes *et al.* (2008), a mineração em áreas urbanas e periurbanas é um dos fatores responsáveis pela degradação do subsolo. Com isso, é comum a existência de áreas degradadas junto às grandes cidades brasileiras, resultante das atividades de extração da pedra britada entre outros. Esta proximidade dos grandes centros é uma decorrência natural da forte influência do custo dos transportes no preço final do produto. O que provoca os transportes criados com o resultado da extração da brita é a quantidade dos resíduos de pedra gerados como o pó de pedra ou dos finos de britagem, os quais se aproximam dos 10% da produção. Em função da dificuldade em se comercializar estes subprodutos, os mesmos acabam sendo estocado em áreas adjacentes às pedreiras, trazendo problemas de impactos como: a poluição do ar; a poluição

das águas causadas por drenagem de materiais finos; e a poluição visual.

Seguido a esses fatores está o problema da disposição dos resíduos gerados por parte da extração da pedra britada, como o pó de pedra e dos finos de britagem, que tem baixa aplicabilidade no mercado produtivo. Portanto, buscam-se alternativas para suas utilizações em atividades, principalmente em setores da construção em materiais cimentícios.

O cimento *Portland* é o material de construção de mais extenso uso no mundo, segundo a ABCP (2002), sendo um dos insumos básicos utilizados na argamassa de revestimento e consistindo em partículas de tamanho comumente entre 1 e 50 μm (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Mas, para o seu processo produtivo, demanda um alto custo de consumo de energia e lança enormes quantidades de dióxido de carbono na atmosfera. Silva e Campiteli (2006) concluíram que é possível reduzir custos de produção dessas argamassas, sem perder o desempenho, substituindo-se o cimento por um teor de materiais pulverulento da areia de origem calcária, com proporções adequadas que otimizem suas propriedades. Para Westerholm, Langerbland e

Forssber (2008), ao se adicionar filler em uma argamassa com areia de britagem, o limite elástico da argamassa é aumentado, além de ocorrer uma ampliação em sua deformação plástica.

Em argamassas de areia de britagem granítica, Camarini e Ishikawa (2004) verificaram que uma maior quantidade de materiais abaixo da peneira 0,15 mm, bem como de materiais pulverulentos, contribuem para um maior empacotamento da mistura, bem como influem para a diminuição do teor de ar incorporado e no aumento da massa específica. Assim como Silva, Buest e Campitelli (2005) constataram uma grande influência do teor de finos da areia de britagem (material passante na peneira malha 0,075 mm) em várias propriedades da argamassa de revestimento, como: o módulo de deformação; resistência de aderência à tração; resistências à compressão e à flexão; além de provocarem, também, aumento no consumo de água da mistura. Entretanto, Kazmierczak, Rosa e Arnold (2016) afirmam que, na medida em que se adiciona filler de britagem, o teor de finos deve ser avaliado de modo a garantir a ausência de fissuração no revestimento de argamassa, e concluem que há uma tendência de acréscimo do teor de ar incorporado em função do teor de adição de finos. Por sua vez, Ishikawa e Oliveira (2012) concluíram que é possível utilizar a areia artificial com material fino passante pela peneira 0,075 mm, acima dos teores normalmente encontrados nas areias naturais de rio ou de jazidas.

Ao substituir o cimento por resíduos de pedra de rocha calcária, com diâmetro até 0,195 mm, Santos (2008) concluiu que houve redução no índice de consistência, no módulo de elasticidade, redução na resistência à flexão e à compressão, não apresentando alteração para a retenção de água e para o teor de ar incorporado. Porém, aumentou a absorção de água e a densidade de massa. No entanto, Silva, Buest e Campitelli (2005) detectaram redução na absorção de água por imersão e por capilaridade para argamassa de revestimento com filler de areia de britagem.

Na pesquisa desenvolvida por Guacelli, Risson e Carbonari (2015), ao substituírem a areia de extração pela areia de britagem de rochas basálticas em argamassa de revestimento, verificaram que houve redução na quantidade de água para se obter a mesma consistência e também ocorreu diminuição na exsudação de água, no índice de vazios e absorção de água, com aumento para as propriedades mecânicas. Da mesma forma, Rosa (2013) ao estudar a argamassa de revestimento com granulometria entre 2,4 mm e 0,075 mm, também verificou redução na quantidade de água da mistura e na exsudação de água, aumento na densidade e ganho na resistência à compressão, e para o módulo e queda na absorção de água até o teor de 20% de substituição com inversão a partir deste teor.

De acordo com Cincotto, Covelo e Cascudo (1995), quando decresce o consumo de aglomerante, a retenção de água da argamassa melhora com o aumento da relação cal/cimento. Ao fixar a relação cal/cimento, a retenção de água decresce com o aumento da relação agregado/aglomerante.

Outros autores realizaram estudos com o propósito de reduzir a quantidade de cimento, porém, em argamassa

resistente só de cimento e areia com outros resíduos e não em argamassa mista de cimento, cal e areia. Oliveira, Brito e Veiga (2012) adicionaram 20% de finos de vidro (partículas inferiores a 0,149 mm), num traço de referência 1:4 em volume, com variações para 1:5 e 1:6. Os resultados apresentaram aumento das propriedades mecânicas para o traço 1:5 e redução para o traço 1:6. Da mesma forma, os finos de concreto, com partículas inferiores a 0,149 mm, foram estudados por Braga, Brito e Veiga (2011) em substituição a 15% do cimento, também para os traços em volume 1:4, 1:5 e 1:6. Como resultado deste estudo, houve redução para resistência à compressão de 14% para o traço 1:5 e de 50% para o traço 1:6.

Ainda em estudo relacionado a resíduos de pedra, Maza, Abdelghani e Zitouni (2016) utilizaram areia triturada calcária com módulo de finura 3,16, em substituição ao agregado miúdo em argamassa resistente, com a utilização de superplastificante para a redução no consumo de água. Os resultados apresentaram aumento nas propriedades mecânicas com as substituições entre 30% e 50%.

Estudos como esses mencionados demonstram a preocupação e importância de se ampliar as pesquisas para uma melhor destinação final dos resíduos de pedra. Uma perspectiva que se vislumbra é a de se agregar esses subprodutos em materiais amplamente utilizados na construção civil, como é o caso da argamassa de revestimento, sem o prejuízo para as propriedades desses materiais. A proposta, então, para este estudo foi a de desenvolver uma pesquisa em que se buscou a utilização de finos de britagem como substituto de parte do cimento em argamassa de revestimento. Como limitante, utilizou-se somente o material passante na peneira 0,075 mm, resíduo este, na sua maioria, semelhante às partículas do cimento. Destaca-se que a relevância da pesquisa está no fato de que ao se reduzir o consumo do cimento levaria ao caminho da sustentabilidade, como uma forma consciente da utilização dos recursos naturais, além das questões econômicas.

2 – MATERIAIS E MÉTODOS

Para o estudo experimental foram desenvolvidos os ensaios de caracterização dos materiais e o preparo da argamassa simples de cal virgem e areia natural de rio no traço 1:6 (em volume). Inicialmente, essas argamassas foram submetidas à extinção e maturação da cal. Posteriormente, foram adicionados o cimento e as porcentagens de substituições por finos de britagem, com a finalidade de observar o seu comportamento por meio das propriedades físicas e mecânicas na sua condição de estado plástico e no estado endurecido.

2.1 Materiais

Para compor o traço das argamassas foi utilizada: a cal virgem em pó, tipo CV – C, Cal virgem comum, material este amplamente utilizado na região, devido a ser produzido no estado, areia natural de rio; cimento *Portland* comum classe 32, CP II Z – 32; e finos de britagem de rochas calcárias, que foram obtidos pelo peneiramento na malha

0,075 mm.

Os materiais foram caracterizados de acordo com os seguintes procedimentos:

- Massa unitária para o agregado miúdo (areia natural de rio) no estado solto e dos finos de britagem, bem como do cimento. Tais massas foram determinadas utilizando-se como referência o procedimento descrito pela ABNT NBR – NM 45:2006. As massas específicas da areia e dos finos de britagem foram determinadas pelo método do picnômetro.

- As massas específicas do cimento *Portland* e da cal foram determinadas pelo procedimento descrito na norma ABNT NBR-NM 23:1998, por meio do frasco de *Le*

Chatelier. A determinação da Finura da cal virgem foi realizada pelo procedimento recomendado pela ABNT NBR 9289:2000.

- Para a composição granulométrica do agregado miúdo (areia natural de rio), a determinação foi de acordo com a norma ABNT NBR NM 248:2003, por meio de ensaio manual, utilizando-se da série normal de peneiras. Para os finos de britagem, a granulometria foi determinada por sedimentação de acordo com a norma ABNT NBR 7181:2017.

Na Tabela 1 são expostos os traços, em volume, com transformação em massa para os teores de substituição estudados.

Tabela 1 – Traços unitários em massa

| Argamassas | Componentes | Traços em massa |
|------------|-----------------------------------------------------------|------------------------|
| A0 | cimento: cal virgem: areia | 1:1,13:11,04 |
| A2,5 | 97,5% cimento: cal virgem: areia: 2,5 % finos de britagem | 0,975:1,13:11,04:0,025 |
| A5 | 95% cimento: cal virgem: areia: 5 % finos de britagem | 0,95:1,13:11,04:0,05 |
| A10 | 90% cimento: cal virgem: areia: 10 % finos de britagem | 0,90:1,13:11,04:0,10 |
| A15 | 85 % cimento: cal virgem: areia: 15 % finos de britagem | 0,85:1,13:11,04:0,15 |

A metodologia constitui-se do preparo das argamassas e dos ensaios realizados para as propriedades, tanto no estado plástico como no estado endurecido.

2.2 Preparo da argamassa simples

A mistura da argamassa simples de cal virgem em pó e areia natural de rio, na proporção 1:6 (em volume), foi preparada a partir das massas unitárias desses materiais, os quais foram pesados e obedeceram à proporção estabelecida na conversão do traço de volume para massa. A quantidade de água adicionada foi de 2,5 dm³ para cada quilo de cal virgem. A argamassa foi produzida numa betoneira basculante de eixo inclinado com capacidade de 320 litros. O tempo de mistura foi de, aproximadamente, 5 minutos, conforme especificação da norma ABNT NBR 7200:1998.

A argamassa após ser preparada foi adicionada e adensada em recipientes metálicos, os quais foram tampados para evitar a perda da água por evaporação. Estes ficaram em repouso por um período de sete dias, tempo para se dar a hidratação da cal virgem, segundo especificação dada pela norma ABNT NBR 7200:1998.

Quando da realização dos ensaios, acrescentou-se o cimento *Portland* para compor o traço 1:1,5:9 em volume, para argamassa de referência que recebeu a denominação A0. Com as substituições das porcentagens de 2,5%, 5%, 10%, 15% e 20% do cimento por finos de britagem adotaram-se as denominações seguindo-se as respectivas porcentagens: A2,5, A5, A10, A15 e A20.

2.3 Ensaios realizados

As argamassas foram avaliadas por meio dos ensaios das propriedades no estado plástico e no estado endurecido.

2.3.1 Ensaios no estado plástico

O índice de consistência foi determinado de acordo com a norma ABNT NBR 13276:2005, na mesa de consistência.

A retenção de água seguiu o procedimento normalizado da ABNT NBR 13277:2005.

As determinações da massa específica e do teor de ar incorporado seguiram o procedimento recomendado pela norma ABNT NBR 13278:1995.

A exsudação de água baseou-se nos métodos RILEM (MR-6):1982, que consiste na separação de água da argamassa.

2.3.2 Ensaios no estado endurecido

Para os ensaios das argamassas no estado endurecido foram moldadas as séries com seis corpos de prova (CP) para cada ensaio desenvolvido, os quais foram avaliados com idade de 28 dias. As propriedades ensaiadas foram:

Resistência à tração na flexão, de acordo com o procedimento da norma ANBT NBR 13279:2005;

Resistência à compressão axial, de acordo com o procedimento da norma ABNT NBR 13279:2005;

Módulo de deformação estática a ser determinado conforme a norma ABNT NBR 8522:1984 (plano de carga tipo I);

Absorção de água por imersão, massa específica e índice de vazios, segundo a norma ABNT NBR 9778:2005;

Absorção de água por capilaridade, de acordo com o procedimento da norma ABNT NBR 15259:2005.

Na Tabela 2 são encontradas as diversas relações entre os materiais constituintes das misturas em massa das argamassas, com e sem substituição do cimento por finos de britagem, a saber: a) água /materiais secos – ou seja, a quantidade total de água da mistura em relação aos aglomerantes e aos agregados; b) água/cimento – ou seja, foram somadas a água adicionada para preparo da argamassa simples na mistura da cal virgem com a areia e a

água necessária para o preparo da argamassa composta ao ser acrescentado o cimento e o finos de britagem; c) água/aglomerante – ou seja, a água em relação à quantidade de cal virgem e cimento; d) agregado/aglomerante – isto é, o total de agregado em relação ao total de aglomerante; e) e, por fim, a consistência – que foi determinada para o

intervalo pré-estabelecido de 260 ± 5 mm. Porém, houve a necessidade de acréscimos na quantidade de água de amassamento com o aumento nos teores dos finos de britagem.

Tabela 2 – Parâmetros de proporção das argamassas

| Argamassa | Relação água/materiais secos (massa) | Relação água/cimento (massa) | Relação água/aglomerante (massa) | Relação agregado/aglomerante (massa) | consistência (mm) |
|-----------|--------------------------------------|------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|-------------------|
| A0 | 0,250 | 2,96 | 1,48 | 4,90 | 257 |
| A2,5 | 0,261 | 3,16 | 1,56 | 4,98 | 261 |
| A5 | 0,266 | 3,32 | 1,62 | 5,06 | 262 |
| A10 | 0,272 | 3,58 | 1,69 | 5,21 | 258 |
| A15 | 0,277 | 3,86 | 1,77 | 5,38 | 259 |
| A20 | 0,282 | 4,19 | 1,86 | 5,56 | 256 |

3 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

A apresentação dos resultados inicia-se com as caracterizações dos materiais, na sequência estão expostas individualmente as propriedades das argamassas.

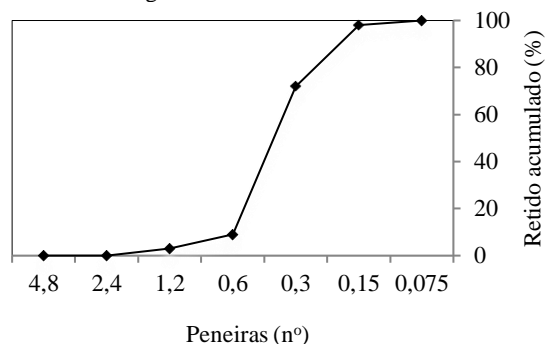
3.1 Resultados da caracterização dos materiais

Como resultado de caracterização dos materiais, tem-se a massa unitária do cimento *Portland* sem o ar que resultou em $1,29 \text{ kg/dm}^3$, e a massa específica $3,085 \text{ kg/dm}^3$, enquanto que os resultados para os demais componentes constam da Figura 1, Tabela 3 e Tabela 4.

Na Figura 1 são mostrados os resultados da granulometria da areia fina lavada de rio, que foi utilizada na mistura da argamassa. A massa unitária da areia fina determinada é $1,5813$

kg/dm^3 , a massa específica real $2,629 \text{ kg/dm}^3$, o diâmetro máximo $1,2 \text{ mm}$ e o módulo de finura $1,73$.

Figura 1 – Granulometria da areia fina



A caracterização da cal virgem comum (CVC) encontra-se na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados obtidos da caracterização da cal virgem comum

| Tipos de ensaios | ABNT NBR | Unidades | Resultados |
|----------------------------------------------|--------------|-----------------|------------|
| Massa unitária | NM – 45:2006 | g/cm^3 | 0,971 |
| Massa específica real | NM – 23:2001 | g/cm^3 | 3,1 |
| Finura (% retida) – Peneiras (nº 18 / nº 50) | 9289:2000 | % | 1/20 |
| Perda ao fogo | 6453:2003 | % | 5,6 |

A caracterização dos finos de britagem consta da Tabela 4. Ressalta-se que os finos de britagem utilizados são aqueles passantes na peneira de $0,075 \text{ mm}$.

Tabela 4 – Características dos finos de britagem

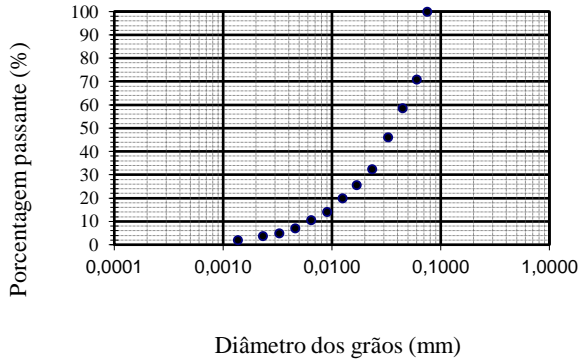
| Tipo de ensaios | ABNT NBR | Resultados |
|-------------------------------------------|-------------------|-------------------------|
| Massa unitária (g/cm^3) | NM – 45:2006 | $1,625 \text{ kg/dm}^3$ |
| Massa específica real (g/cm^3) | Método picnômetro | $2,90 \text{ kg/dm}^3$ |

Na Figura 2 é apresentado o resultado da granulometria por sedimentação dos finos de britagem que foram utilizados em substituição ao cimento.

Como o cimento consiste de partículas de tamanho comumente entre 1 e $50 \mu\text{m}$ (MEHTA; MONTEIRO, 2014),

ao analisar a curva da Figura 2 verifica-se que, até $50 \mu\text{m}$ ou $0,05 \text{ mm}$, existe, aproximadamente, 65% dos finos de britagem nesse intervalo, e 35% entre $0,05 \text{ mm}$ e $0,075 \text{ mm}$.

Figura 2 – Granulometria dos finos de britagem



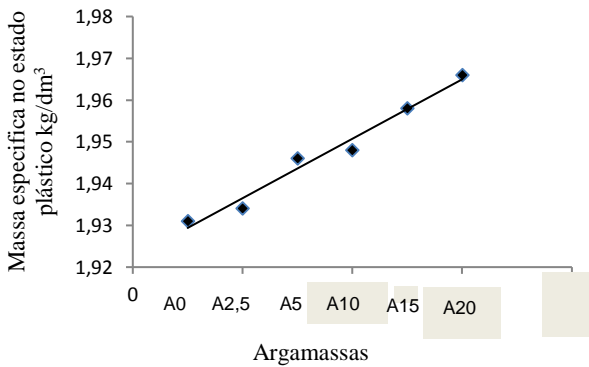
3.2 Resultados das propriedades no estado plástico

Nesta etapa estão apresentados os resultados obtidos para as argamassas com substituição de cimento por percentagens de finos de britagem no estado plástico.

3.2.1 Massa específica e teor de ar incorporado

A Figura 3 apresenta o gráfico da massa específica no estado plástico das argamassas, com e sem substituição de finos de britagem em substituição ao cimento.

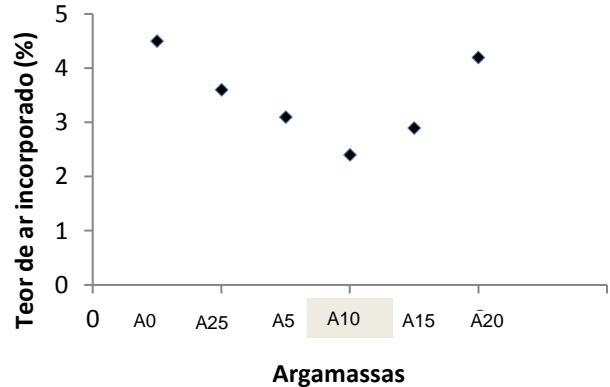
Figura 3 – Massa específica das argamassas no estado plástico



Ao analisar o gráfico da Figura 3 verifica-se que, com a substituição do cimento por finos de britagem, as argamassas apresentaram um ligeiro aumento na massa específica. Isto ocorreu em função de uma maior aproximação das partículas que levou ao fechamento do pacote granulométrico. Por existir uma parcela dos finos de britagem com partículas maiores que as do cimento, resultado que vai de encontro aos mencionados por Westerholm, Langerbland e Forssber (2008); Kazmierczck, Rosa e Arnold (2016); e Rosa (2013).

Na Figura 4 é apresentado o gráfico do teor de ar incorporado das argamassas, com e sem substituição do cimento por finos de pedraira.

Figura 4 – Teor de ar incorporado das argamassas



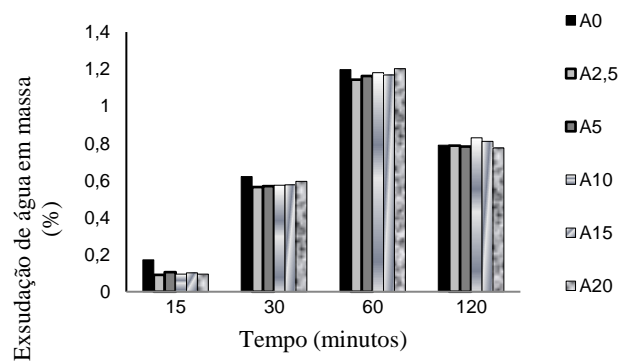
Ao observar a Figura 4 percebe-se que houve uma tendência de redução para o teor de ar incorporado das argamassas, até a substituição de 10% do cimento por finos de britagem. No entanto, a partir desse limite, voltou a aumentar. Com esse resultado percebe-se que houve uma maior aproximação das partículas e o fechamento do pacote granulométrico até a percentagem de 10%. Isto devido aos finos de britagem possuírem uma quantidade de, aproximadamente, 35% de partículas maiores que as partículas do cimento. Ou seja, com a redução na quantidade cimento e com o aumento do teor de finos de britagem acabou por gerar excesso dessas partículas maiores, o que levou à volta do aumento do teor de ar incorporado. Dessa forma, pode-se dizer que a argamassa se comporta bem até os 10% de substituição.

O comportamento de redução do teor de ar incorporado foi observado por Camarini e Ishikawa (2004), que afirmam que o teor de materiais abaixo de 0,150 mm e um teor maior de materiais pulverulentos influenciou para a diminuição do teor de ar incorporado. Kazmierczck, Rosa e Arnold (2016) também verificaram uma tendência no aumento no teor de ar incorporado com o aumento no teor de finos.

3.2.2 Exsudação de água

Na Figura 5 é apresentado o gráfico de exsudação de água para as argamassas, com e sem a substituição de finos de britagem

Figura 5 – Exsudação de água das argamassas

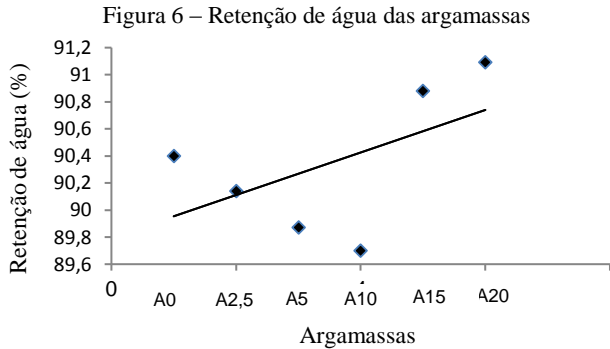


Ao verificar a Figura 5 percebe-se que praticamente não houve variação da exsudação de água para as argamassas com e sem as percentagens de substituições de cimento por finos de britagem. A leitura de 60 minutos foi a que apresentou o maior volume em massa de água exsudada

para as argamassas, mesmo tendo ocorrido aumento na adição de água da mistura. Resultado diferente dos encontrados por Guacelli, Risson e Carbonari (2015) e por Rosa (2013). Porém, em ambos os estudos houve redução na quantidade de água da mistura; mas trata-se de substituição do agregado e não do cimento.

3.2.3 Retenção de água

Na Figura 6 é apresentado o gráfico da retenção de água das argamassas, com e sem substituição do cimento pelos finos de britagem.



O comportamento apresentado pelo gráfico da Figura 6, embora não muito semelhante, manteve a tendência do obtido para o teor de ar incorporado, com ligeira queda na retenção de água até as substituições do cimento por finos de britagem até 10% e aumento para os valores acima de 15%. A partir deste valor, o aumento da substituição do cimento pelo teor de finos de britagem leva a uma maior retenção de água, embora a redução não tenha ultrapassado 1%. Isto vai ao encontro da afirmação feita por Cincotto, Covelo e Cascudo (1995) de que quando decresce o consumo de aglomerante, a retenção de água da argamassa melhora com o aumento da relação cal/cimento, o que se verificou a partir das substituições de 15% dos teores de finos de britagem. Porém, Santos (2008) não verificou alteração para retenção de água. Talvez por ter utilizado resíduos com partículas maiores.

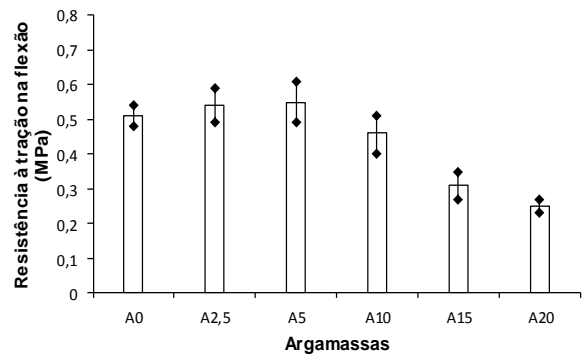
3.3 Resultados das propriedades no estado endurecido das argamassas

Os resultados das propriedades estudadas (resistência à tração na flexão, resistência à compressão axial, módulo de deformação estática, absorção de água por capilaridade, absorção de água por imersão) para as argamassas com e sem substituição de finos de britagem no estado endurecido encontram-se apresentados nas subseções a seguir.

3.3.1 Resistência à tração na flexão

Na Figura 7 são apresentados graficamente os resultados obtidos para a resistência à tração na flexão das argamassas, com e sem substituição de finos de britagem

Figura 7 – Resistência à tração na flexão

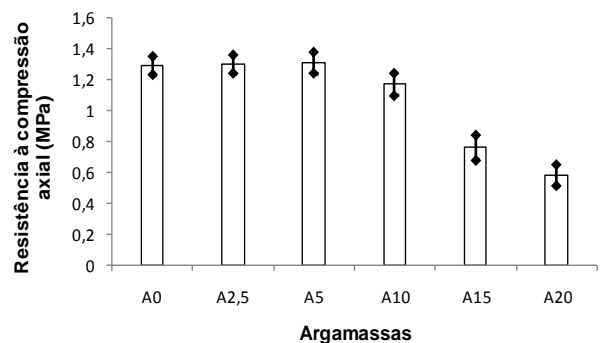


Ao observar a Figura 7 verifica-se um aumento da resistência à tração na flexão em relação à argamassa de referência, até a substituição de 5% do cimento pelo finos de britagem. Isto devido a uma maior aproximação das partículas, levando ao fechamento do pacote granulométrico. Com o aumento no teor de finos de britagem e a redução na quantidade do cimento ocorreram decrescimos nas resistências. Situação diferente foi encontrada por Santos (2008), embora com substituições do cimento por resíduos de pedra, mas com partículas maiores, ou seja, diâmetro até 0,195 mm, o que pode ter influenciado a redução da resistência para todos os teores. Guacelli, Risson e Carbonari (2015) verificaram aumento, embora com substituições do agregado natural pelo artificial.

3.3.2 Resistência à compressão axial

Na Figura 8 é apresentado o gráfico da resistência à compressão axial das argamassas, com e sem substituição do cimento por finos de britagem.

Figura 8 – Resistência à compressão axial para as argamassas

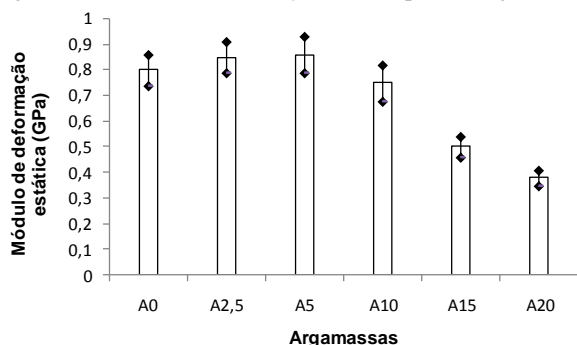


Como na resistência à tração na flexão, a resistência à compressão axial das argamassas (Figura 8) também apresentou comportamento semelhante. Obteve-se um ligeiro aumento até as substituições de 5%, devido ao fechamento do pacote granulométrico e queda na sequência, com o aumento nos teores de substituições e a redução na quantidade de cimento.

3.3.3 Módulo de deformação estática

Na Figura 9 é apresentado o gráfico do módulo de deformação estática das argamassas, com e sem substituição do cimento pelos finos de britagem.

Figura 9 – Módulo de deformação estática para as argamassas



Como nas demais propriedades mecânicas apresentadas, o módulo de deformação estática (Figura 9) também apresentou o mesmo comportamento de aumento até 5% de substituições do cimento por finos de britagem. Com substituições acima dessa porcentagem houve queda nesta propriedade, como ocorreu também para os valores de resistência à compressão axial. Pode-se concluir, então, que quanto maior for a substituição do cimento por finos de britagem, menor é a tensão que deve ser aplicada na argamassa para uma mesma deformação no material. Como a redução do módulo favorece a capacidade de deformação das argamassas, a substituição do cimento por finos de britagem para uma quantidade de até 10% se apresenta compatível em relação à argamassa de referência. Porém, Santos (2008) verificou que houve redução no módulo para todas as substituições utilizadas.

3.3.4 Absorção de água por imersão e por capilaridade

Na Tabela 5 é apresentada a classificação das argamassas em relação ao coeficiente de capilaridade, a qual mostra os valores mínimos e máximos encontrado para as argamassas.

Tabela 5 – Coeficiente de capilaridade para as argamassas

| Argamassas | Coeficiente de capilaridade (g/dm ² .min ^{0,5}) | | Classe ABNT NBR 13281:2005 |
|------------|----------------------------------------------------------------------|--------|----------------------------|
| | Mínimo | Máximo | |
| A0 | 1,397 | 1,478 | C1 |
| A2,5 | 1,460 | 2,315 | C2 |
| A5 | 1,443 | 1,581 | C2 |
| A10 | 1,215 | 1,560 | C2 |
| A15 | 1,005 | 1,240 | C1 |
| A20 | 1,454 | 1,551 | C1 |

A partir da Tabela 5 pode-se observar que todas as argamassas são da classe C1 ou C2, com valor máximo de coeficiente de capilaridade não ultrapassando 2,5.

Na Figura 10 é apresentado o gráfico da absorção de água por capilaridade e na Figura 11 o gráfico da absorção de água por imersão das argamassas. Ambas com e sem substituições do cimento por finos de britagem. Nota-se que

o comportamento das duas propriedades foi semelhante. Observa-se que houve aumento da absorção de água com as substituições do cimento por finos de britagem até 5%, reduzindo aos 15% e voltando a aumentar com 20%. Os resultados encontrados foram descontínuos e divergentes aos obtidos por Silva, Buest e Campitelli (2005) e por Guacelli, Risson e Carbonari (2015), que fizeram as substituições dos agregados naturais pelos artificiais. No entanto, os resultados de Santos (2008) também apresentaram aumento. Isto se explica pela redução na quantidade de cimento, o que ocorreu também para este estudo, com variações na média abaixo de 3%. Dessa forma, as substituições do cimento de 5% e 20% por finos de britagem foram as mais desfavoráveis. Ou seja, as que mais levaram à absorção de água tanto por imersão quanto por capilaridade.

Figura 10 – Absorção de água por capilaridade

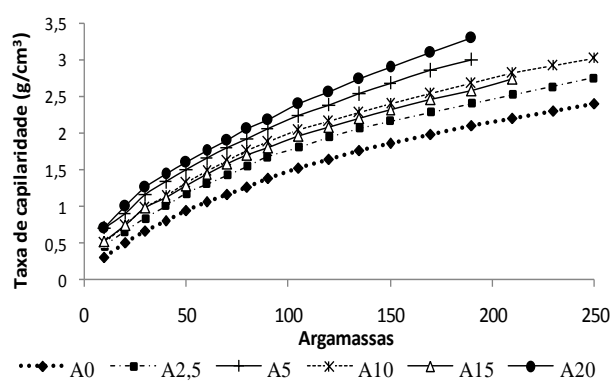
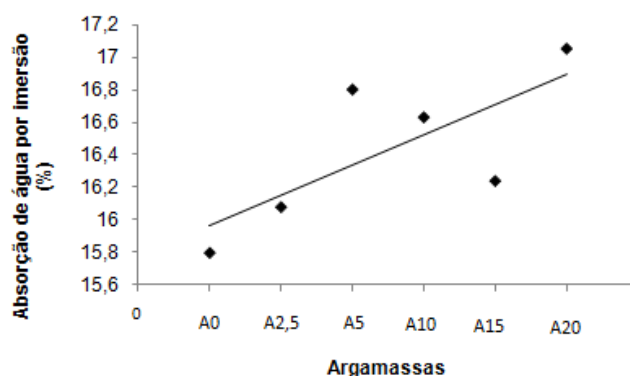


Figura 11 – Absorção de água por imersão



CONCLUSÃO

De acordo com as propriedades ensaiadas para as argamassas de revestimento com e sem substituição do cimento por finos de britagem, concluiu-se o que segue. Para atingir a consistência houve a necessidade de aumentar a quantidade de água de amassamento à medida que se aumentava o teor de finos de britagem.

Os finos de britagem, por possuírem uma porcentagem de partículas maiores que as do cimento, levaram ao fechamento do pacote granulométrico para as argamassas com as substituições dos teores um pouco acima de 5%. Com isso, a massa específica apresentou aumento e houve

redução no teor de ar incorporado. Para a retenção de água, houve tendência de redução, porém, não superior a 1%. Quanto à exsudação de água, praticamente não houve variação das argamassas com substituições em relação à argamassa de referência.

No estado endurecido, as propriedades mecânicas apresentaram aumento até os teores de 5% de substituições, embora, entre 5% e 10% apresentou uma ligeira queda. Isso é favorável, principalmente para o módulo de deformação, não interferindo na capacidade de absorver deformações na argamassa. Por sua vez, a absorção de água por imersão e a absorção de água por capilaridade apresentaram aumento com as substituições do cimento por finos de britagem. No entanto, as variações na média ficaram abaixo de 3%.

Ao considerar todas as propriedades estudadas pode se concluir que uma porcentagem de substituição entre 5% e 10% do cimento por finos de britagem contribui para a produção de argamassa de revestimento, além de reduzir o consumo deste material, o que pode trazer benefícios ao meio ambiente.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO

PORTLAND, **Guia básico de utilização do cimento**

Portland, 7 ed. São Paulo: ABCP, 2002

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS

TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa para assentamento de paredes e revestimentos de paredes e teto – Determinação da absorção de água por imersão índice de vazios e massa específica – Método de ensaio, 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 – Método de ensaio, Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13278**: Argamassa para assentamento de paredes e revestimentos de paredes e teto – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado – Método de ensaio, Rio de Janeiro, 1995.

_____. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento de paredes e revestimentos de paredes e teto – Determinação da resistência à compressão – Método de ensaio, Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13277**: Argamassa para assentamento de paredes e revestimentos de paredes e teto – Determinação da retenção de água – argamassa de revestimento – Método de ensaio, Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento de paredes e revestimentos de paredes e teto – Determinação do teor de água para obtenção do índice de consistência-padrão – Método de ensaio, Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 7181**: Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio, Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 9289**: Cal hidratada para argamassas - Determinação da finura – Método de ensaio, Rio de Janeiro, 2000.

_____. **NBR 6453**: Cal virgem para construção civil – Especificação, Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 8522**: Concreto - Determinação do módulo de deformação estática – Método de ensaio, Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 7200**: Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Procedimento, Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR NM 45**: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios – Método de ensaio, Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 23**: Cimento *Portland* – Determinação da massa específica – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio, Rio de Janeiro, 2003.

BRAGA, M.; BRITO, J.; VEIGA, M. R. Redução do teor de cimento em argamassas com agregados finos de betão incorporados. **Revista Teoria e Prática na Engenharia Civil** – UM, v. 41, p. 5-20, 2011.

CALAES, G. D.; CARNEIRO NETO, B. P.; MARGUERON, C.; AMARAL, J. A. G. Bases para o desenvolvimento sustentável e competitivo da indústria de agregados nas regiões metropolitanas do país (Parte 2). **Revista da Escola de Minas**, v. 61, n. 1, p. 47-56, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0370-44672008000100009>.

CAMARINI, G.; ISHIKAWA, P. Propriedade de argamassas de assentamento produzidas com areia artificial para alvenaria estrutural. **Anais... Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, 10, 2009, São Paulo, 2004.

CINCOTTO, M. A.; COVELO, S. M. A.; CASCUDO, H. C. **Argamassa de revestimento: Características, propriedades e métodos de ensaio**. Publicação IPT 2378, 1 ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1995, 118 p.

GUACELLI, P. A. G.; RISSON, K. D. B. S.; CARBONARI, B. M. T. Substituição de areia de extração por areia de britagem para argamassa de revestimento. **Anais... Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas**, 11, 2015, Porto Alegre, 2015.

ISHIKAWA, P. H.; PEREIRA de OLIVEIRA, L. P. Propriedades da argamassa com areia artificial para revestimento de alvenaria. **Anais... 4º Congresso Português de Argamassas e Etics**, APFAC, 11, 2012, Coimbra, 2012.

KAZMIERCZAK, C. S.; ROSA, M.; ARNOLD, D. C. M. Influência da adição de filer de areia de britagem nas propriedades de argamassas de revestimento. **Ambiente Construído**, v. 16, n. 2, p. 7-19, 2016. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212016000200076>.

MAZA, M.; ABDELGHANI, N.; ZITOUNI, S. Physico-mechanical properties of mortar made with binary natural fine aggregates (dune sand and crushed sand) with and

without chemical admixture. **Asian Journal of Civil Engineering**, v. 17, n. 5, p. 663-682, 2016.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2014, 751 p.

OLIVEIRA, R.; BRITO, J.; VEIGA, M. R. Redução do teor de cimento em argamassas com incorporação de agregados finos de vidro. **Revista Teoria e Prática na Engenharia Civil** – UM, v. 44, p. 5-29, 2012.

RILEM – International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures. **MR-6**. Tendency of water to separate from mortars (bleeding). 1st ed. France, 1982.

ROSA, M. **Análise do efeito do teor de microfinos nas propriedades das argamassas de revestimento com utilização de areia de britagem basáltica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2013.

SANTOS, M. L. O. **Aproveitamento de resíduos minerais na formulação de argamassas para a construção civil**. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

SILVA, N. G.; BUEST, G.; CAMPITELI, V. C. A influência do fíler de areia britada de rocha calcária nas propriedades da argamassa de revestimento. **Anais... Seminário o Uso da Fração Fina da Britagem**, 2 ,2005, São Paulo, 2005.

SILVA, N. G.; CAMPITELI, V. C. Influência dos finos e da cal nas propriedades das argamassas. **Anais... Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, 11, 2006, Florianópolis, 2006.

WESTERHOLM, M.; LANGERBLAND, B; FORSSBERG, E. Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, n. 4, p. 274-282, 2008.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.08.008>.