

AVALIAÇÃO DA ADERÊNCIA DE ARGAMASSAS DE REABILITAÇÃO DE REVESTIMENTOS EM AZULEJO

Pammila Japiassú ⁽¹⁾; Nayara Gracyelle Dias ⁽²⁾; Helena Carasek ⁽³⁾; Oswaldo Cascudo ⁽⁴⁾

(1) PPG-GECON, Universidade Federal de Goiás – UFG, e-mail: pammilajapiassu@gmail.com

(2) EEC, Universidade Federal de Goiás – UFG, e-mail: nagradi@hotmail.com

(3) PPG-GECON, Universidade Federal de Goiás – UFG, e-mail: hcarasek@gmail.com

(4) PPG-GECON, Universidade Federal de Goiás – UFG, e-mail: ocascudo@gmail.com

Resumo

Além da expressão artística e cultural, o revestimento cerâmico de fachada exerce a função de proteção das vedações contra os agentes agressivos externos. Devido à deterioração de revestimento de azulejo, é necessário estabelecer medidas para preservar e conservar esta riqueza cultural. Durante a recuperação dos revestimentos históricos, é importante buscar a similaridade entre o material novo e o antigo. Portanto, a argamassa de reabilitação deve ser compatível com o revestimento antigo. Nesta pesquisa, buscou-se avaliar quanto à aderência novas argamassas à base de cal aérea e metacaolim, para serem utilizadas na reabilitação de revestimentos de azulejos de edificações históricas. Foram confeccionados corpos de prova constituídos de azulejos assentados com argamassa de reabilitação. Estes foram elaborados buscando representar uma situação similar ao revestimento cerâmico aplicado, sendo constituído, portanto, pelo azulejo, a argamassa de assentamento e a argamassa de regularização. As argamassas foram obtidas empregando cal aérea hidratada (tipo CH-I), metacaolim e areia de rio lavada, com traço 1:3, em volume. Foram estudados quatro teores de metacaolim em substituição parcial à cal: 0%, 5%, 10% e 15%. No total, foram moldados 192 corpos de prova, sendo 48 por tipo de argamassa. Esses corpos de prova foram ensaiados quanto à resistência de aderência à tração, aos 45 dias e 90 dias de idade. Realizou-se ainda o estudo da microestrutura da argamassa no microscópio eletrônico de varredura (MEV). Nos resultados obtidos de resistência de aderência, observou-se um aumento da resistência à medida que se aumentou o teor de metacaolim nas argamassas de reabilitação, sendo também observado um crescimento da resistência com o aumento da idade. Pelas análises no MEV, foi possível observar a morfologia de produtos de carbonatação e de possíveis reações pozolânicas, os quais conferem resistência a essas argamassas.

Palavras-chave: Aderência, Azulejo, Argamassa, Cal, Reabilitação.

Abstract

Besides the artistic and cultural expressivity, the ceramic coating of facade serves as protection of seals against the external aggressive agents. Due to deterioration of glazed tile coating, is necessary to establish measures to preserve and conserve this cultural richness. During the recuperation of the historical coatings, is important to pursue the similarity between the new and old materials. Therefore, the mortar of rehabilitation must be compatible with the ancient coating. In this research, we sought to evaluate the bond of new mortars lime-based non-hydraulic and metakaolin, to be utilized in rehabilitation of glazed tile coatings of historical buildings. Specimens were made up of glazed tiles installation with rehabilitation mortar. This specimens was elaborated seeking to represent a similar situation to the ceramic coating applied, having been constructed, thus, by the glazed tile, the laying mortar and the regularization mortar. The mortar was obtained using hydrated lime (type CH-I), metakaolin and river sand, with design mix 1:3, by volume. We studied 4 percentages of metakaolin in partial replacement of lime: 0%, 5%, 10% and 15%. In total, were molded

192 specimens, 48 by type of mortar. These specimens were tested the tensile bond strength at 45 days and 90 days old. We carried out further study the microstructure of the mortar in a scanning electron microscope (SEM). In the results of tensile bond strength was observed an increase in resistance is increased as the concentration of metakaolin in the rehabilitation mortar, it was also observed an increase in resistance between the ages. For the SEM analyzes, it was possible to observe the morphology of products of carbonation and pozzolanic reactions possible, which confer resistance to these mortars.

Keywords: Bond, Glazed tile, Mortar, Lime, Rehabilitation.

1. INTRODUÇÃO

O uso de azulejos em fachadas é uma forte expressão cultural luso-brasileira. Várias cidades brasileiras e portuguesas possuem uma vasta quantidade de edificações revestidas em azulejos entre o final do século XIX e início do século XX. A constante exposição desse revestimento aos agentes de agressividade externos tende a desgastar e a deteriorar esse importante componente do patrimônio edificado histórico. A perda de aderência do azulejo à base é uma das manifestações patológicas mais graves que ocorrem nesse tipo de revestimento, pois, além de perder suas funções, deixa desprotegida a base do revestimento, a qual fica sujeita a ação dos diversos agentes de degradação externos (ABREU, 2005), como pode ser observado na Figura 1a. Nesse sentido, é necessário que sejam estabelecidas medidas de reabilitação visando à preservação e a conservação desses importantes exemplares da azulejaria.

Figura 1 – Fachada em azulejos históricos da cidade de Ovar, Portugal: (a) regiões com destacamento de azulejos; e (b) uso inadequado de argamassa de cimento para restauração



(a)



(b)

Durante o processo de reabilitação dos revestimentos históricos, deve-se almejar a compatibilidade entre o material novo e o antigo. Martínez e Carro (2007) mostram que, de modo geral, as argamassas de reabilitação aplicadas aos substratos antigos devem possuir: baixa resistência à compressão, baixo módulo de elasticidade, alta permeabilidade ao vapor de água e ausência de sais solúveis.

As argamassas contendo cimento Portland não tem se mostrado adequada para o uso em restauração, pois apresentam, de modo geral, baixa porosidade e permeabilidade, podendo provocar maior retenção de umidade nas paredes; além de apresentar resistência superior aos materiais antigos, podendo causar danos aos sistemas construtivos, seja em casos que tenha que ser retirada ou simplesmente pela sua permanência no local de aplicação (VEIGA, 2003; ALVAREZ; SEQUEIRA; COSTA, 2005; KANAN, 2008; FERREIRA, 2009). Por outro lado, a argamassa à base de cal tem se mostrado adequada, uma vez que possui predominância de volume de poros grandes, não retendo umidade e permitindo a parede respirar; resistência

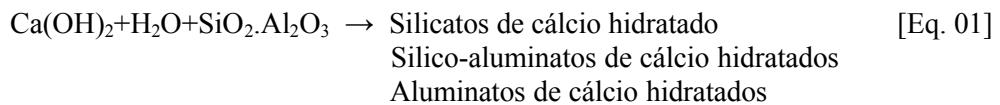
mecânica adequada e processo de cura mais lento adequando-se a vários tipos de alvenaria histórica (KANAN, 2008). A Figura 1b ilustra o uso inadequado de argamassa à base de cimento em fachada de azulejo histórica.

Segundo Carasek (2010), os principais requisitos e propriedades que deve possuir uma argamassa de assentamento de placas cerâmicas no sistema de revestimento cerâmico atual são: trabalhabilidade; aderência e capacidade de absorver deformações, ou seja, ser flexível, principalmente no caso de fachadas. Esses mesmos requisitos e propriedades podem ser extrapolados para as argamassas de assentamento em revestimento de azulejo histórico.

No caso de reabilitação em revestimentos antigos, Ferreira (2009) recomenda o uso de argamassa de assentamento de azulejos com proporção volumétrica de 1 parte de cal área hidratada em pó (ligante) para 3 partes de areia de rio com granulometria média (agregado). A argamassa à base de cal ganha resistência mecânica pelo processo de carbonatação do hidróxido de cálcio, que ocorre na presença de CO_2 . Durbin (2005) mostra que, no revestimento cerâmico, a fixação da placa cerâmica na argamassa de assentamento dificulta a penetração de CO_2 nesta, desfavorecendo, assim, o processo de carbonatação. Nesse sentido, é interessante que as argamassas de assentamento de azulejos tenham características hidráulicas, tais como as constituídas por cal áerea e pozolana.

Teixeira (2008), ao estudar argamassas de reabilitação para serem utilizadas em intervenções de conservação de fachadas azulejadas, conclui que a adição de metacaulim em argamassas de cal pode ser uma boa solução para o assentamento de azulejos nessas fachadas, uma vez que tais argamassas possuem compatibilidade química, em relação ao tipo de ligante e ao comportamento mecânico, entre as argamassas antigas e as novas.

De modo geral, o metacaulim, que consiste numa fase não-cristalina (amorfa) de alumino silicato (Si-Al-O), reage na presença de água com o hidróxido de cálcio, obtido pela hidratação da cal áerea, formando compostos aglomerantes, conforme exposto a seguir:



Segundo Ashurst (2007), não é indicado acrescentar metacaulim na produção de argamassas de cal áerea em quantidades superiores a 10% da pasta de cal. Em pesquisas recentes sobre argamassas constituídas por cal áerea e metacaulim (FORTES-REVILLA, MARTÍNEZ-RAMÍREZ, BLANCO-VARELA, 2006; VELOSA, 2006; VEIGA, VELOSA, MAGALHÃES, 2007; VELOSA, VEIGA, 2007; TEIXEIRA, 2008; VALENTE, 2008; MAGALHÃES, VEIGA, 2009; VEIGA, VELOSA, MAGALHÃES, 2009; VELOSA, ROCHA, VEIGA, 2009; VELOSA, VEIGA, ROCHA, 2009; COELHO, JALALI, TORGAL, 2010; NÓBREGA *et al.*, 2010; SEPULCRE-AGUILAR, HERNÁNDEZ- OLIVARES, 2010) foram identificadas as relações aglomerante/agregado, em massa, entre 1:1,2 e 1:4; já a porcentagem de metacaulim em relação aos materiais secos encontradas foi, em média, de 13%.

Neste trabalho, que é parte da pesquisa de mestrado de Japiassú (2011), buscou-se avaliar a aderência de argamassas de reabilitação à base de cal áerea com adição de metacaulim. Para tanto, foram estudadas argamassas de traço 1:3 (cal e areia, em volume), variando-se os teores metacaulim em substituição parcial à cal. Almeja-se que argamassas propostas sejam similares as argamassas antigas, visando, assim, sua utilização na recuperação de fachadas azulejadas históricas.

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é avaliar a aderência de revestimentos cerâmicos aplicados com argamassas de cal, com diferentes teores de metacaulim, visando contribuir com o desenvolvimento de argamassas de reabilitação para serem utilizadas na restauração de fachadas azulejadas históricas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a avaliação da aderência entre o azulejo e as argamassas de assentamento, foram elaborados corpos de prova constituídos de azulejos assentados com argamassa de reabilitação. A variável estudada foi o teor metacaulim no proporcionamento das argamassas de assentamento, já os demais materiais foram padronizados.

Foram avaliados 4 tipos de argamassas de assentamento a base de cal aérea com diferentes teores de metacaulim. As argamassas foram constituídas pelos mesmos materiais e mantiveram a relação em volume de 1: 3 (aglomerante: agregado). Os teores de metacaulim definidos foram de 0%, 5%, 10% e 15%, em substituição à cal em volume, como mostrado na Tabela 1. Foi padronizado também o teor de 24% de água em relação aos materiais secos da argamassa.

Tabela 1 – Traços das argamassas de reabilitação, em volume e em massa

Código da Argamassa	Proporcionamento volumétrico			Proporcionamento em massa		
	Cal	Metacaulim	Areia	Cal	Metacaulim	Areia
A	1	0	3	1	0	7,45
B	1	0,05	3,16	1	0,05	7,84
C	1	0,10	3,33	1	0,11	8,27
D	1	0,15	3,53	1	0,18	8,76

Foram realizados dois ensaios principais: o de resistência de aderência à tração e análise em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), cujos métodos são explicados a seguir.

3.1. Materiais

Na confecção dos corpos de prova de aderência procurou-se representar as camadas do revestimento cerâmico: o azulejo (acabamento), a argamassa de assentamento e a argamassa de regularização. Foram ainda utilizados blocos cerâmicos de 14 cm x 29 cm x 9 cm como substrato para a camada de regularização.

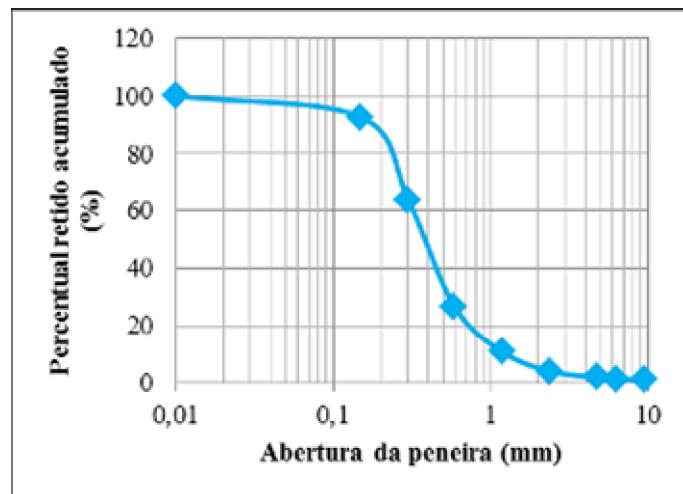
Os azulejos de reposição utilizados, de 15 cm x 15 cm, da marca Incepa, fabricados em 1979, possuíam porosidade total de 38%. Buscou-se selecionar durante a compra placa cerâmica, no mercado local de vendas de azulejos antigos, o que possuísse maior porosidade visando a similaridade com os azulejos históricos.

Na produção das argamassas foram utilizados: cal aérea hidratada (tipo CH-I), metacaulim e areia de rio lavada obtida no mercado nacional. Estes materiais se destinaram à produção de argamassas tanto de regularização da base quanto de assentamento de azulejos.

A área superficial (determinada pelo modelo matemático B.E.T.) do metacaulim foi de 29,09 m²/g e a da cal foi de 10,47 m²/g, que é aproximadamente três vezes inferior ao do metacaulim.

A areia caracterizou-se por ser média (grãos entre 1,2 mm a 0,42 mm), com módulo de finura 2,0, com dimensão máxima característica de 2,38 mm e com grãos predominantes entre 0,15 mm a 1,20 mm. A curva granulométrica da areia utilizada na produção das argamassas é mostrada na Figura 2.

Figura 2 – Curva granulométrica da areia



3.2. Moldagem dos corpos de prova

Para o ensaio de resistência de aderência à tração, foram moldados 192 corpos de prova, como apresentado na Figura 3, sendo 48 corpos de prova por tipo de argamassa. Várias etapas foram desenvolvidas para a produção desses espécimes, as quais estão descritas resumidamente a seguir.

Figura 3 – (a) Disposição de dois corpos de prova de revestimento cerâmico sobre a camada de regularização; e (b) visão geral de todos os corpos de prova moldados



2.2.1. Preparo dos blocos cerâmicos

De acordo com suas cores e dimensões, os blocos cerâmicos de 14 cm x 29 cm x 9 cm de seis furos foram pré-selecionados e armazenados em ambiente de laboratório por sete dias antes da moldagem da camada de regularização com objetivo de homogeneizar a umidade.

2.2.2. Preparo das argamassas

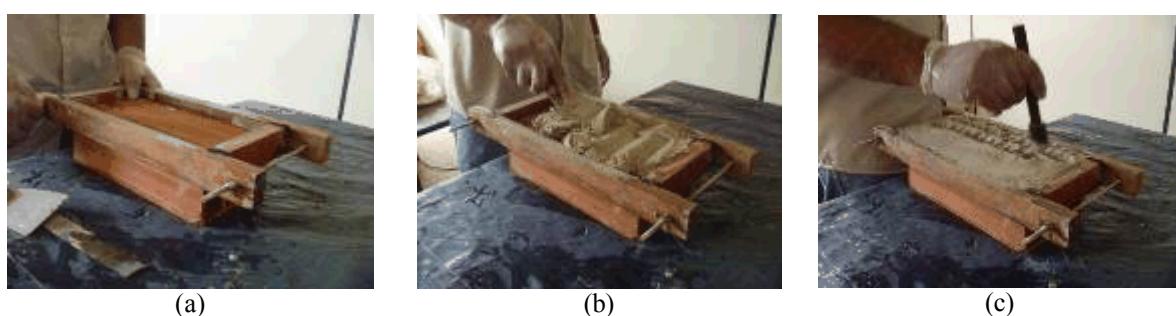
Para a produção da argamassa de regularização foi utilizado o proporcionamento da argamassa C (1:0,10:3,33, em volume), por se tratar de uma argamassa intermediária em relação ao teor de metacaulim. Já as argamassas de assentamento dos azulejos foram preparadas de acordo com seus traços pré-determinados, conforme apresentado na Tabela 1.

As argamassas foram preparadas em argamassadeira de eixo vertical, com cuba de capacidade de 20 l. Os materiais foram previamente misturados a seco e colocados na cuba umedecida. A água de amassamento foi adicionada durante os primeiros 30 segundos de funcionamento da argamassadeira. O tempo de mistura total foi de 4 minutos.

2.2.3. Moldagem da camada de regularização

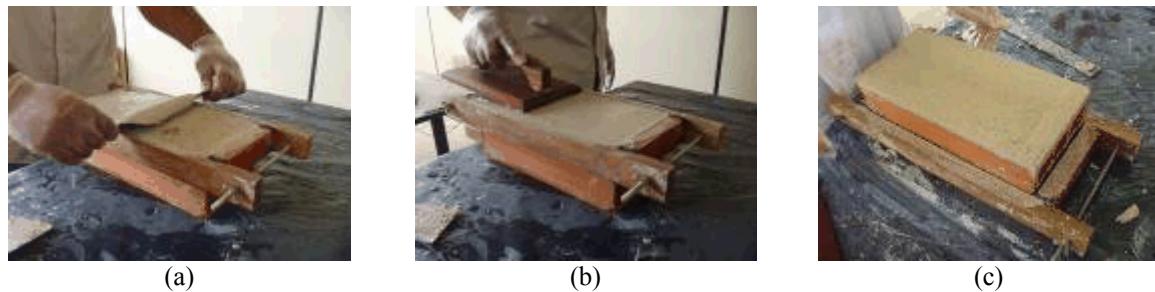
Para auxiliar na padronização da espessura da camada de regularização ao longo da extensão do bloco cerâmico, foram confeccionadas fôrmas, que pudessem ser ajustadas às laterais do bloco cerâmico. Tal fôrma foi previamente untada com óleo e ajustada às laterais da superfície horizontal do bloco cerâmico umedecido. Foram colocadas sobre a superfície do bloco cantoneiras metálicas em forma de L de 15 mm de altura para que a fôrma fosse devidamente posicionada, garantindo a espessura de 15 mm da camada de regularização, conforme Figura 4a. Após a regulagem da fôrma, as cantoneiras foram retiradas e deu-se início a aplicação da argamassa com espátula até atingir a altura determinada (Figura 4b). Posteriormente, a argamassa foi adensada de forma padronizada, dando 75 golpes com soquete em movimentos verticais de sobe e desce ao longo de toda a superfície (Figura 4c).

Figura 4 – (a) Posicionamento da fôrma no bloco cerâmico; (b) aplicação da argamassa de regularização; e (c) adensamento da argamassa



Após o adensamento da argamassa, realizava-se a regularização da superfície com uma régua metálica (Figura 5a) e, na sequência, alisava-se o revestimento com desempenadeira de madeira umedecida (Figura 5b). Por fim, as fôrmas eram removidas (Figura 5c).

Figura 5 – (a) Regularização com régua metálica e (b) desempeno da camada de regularização; e (c) retirada da fôrma



2.2.4. Preparação dos azulejos de reposição

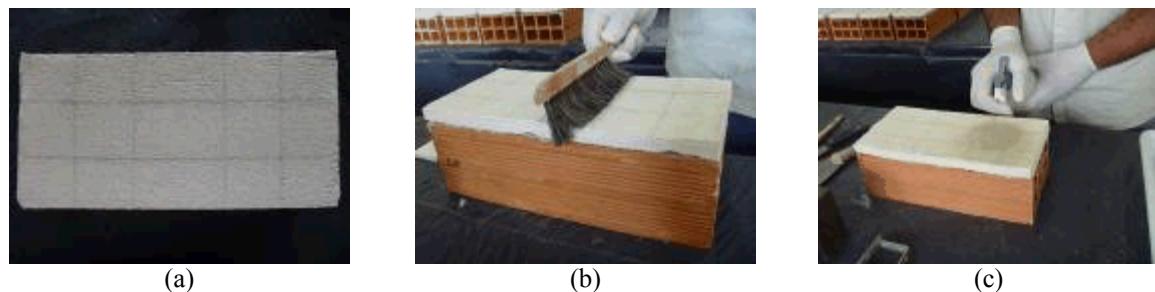
As placas cerâmicas foram inicialmente lavadas e, posteriormente, colocadas na estufa à 100°C durante 48 horas. Após o período de secagem, cada placa de 15 cm x 15 cm foi dividida em 9 partes iguais empregando-se uma riscadeira, obtendo-se, portanto, placas quadradas de 5 cm de lado.

2.2.5. Assentamento dos azulejos de reposição

Após uma semana da moldagem da camada de regularização, iniciou-se o processo de assentamento dos azulejos de reposição.

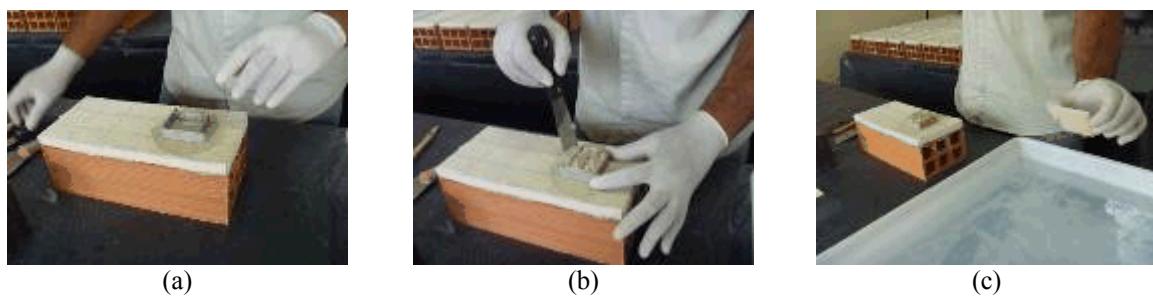
Primeiramente, foi realizada a marcação na camada de regularização dos locais de assentamento das placas cerâmicas sendo estes localizados a 4,5 cm das extremidades da maior dimensão e 5 cm em relação a menor dimensão do bloco, conforme ilustrado na Figura 6a. Na sequência, a camada de regularização foi limpa e umedecida (Figura 6b e 6c).

Figura 6 – (a) Marcação dos eixos; (b) limpeza; e (c) umedecimento da camada de regularização



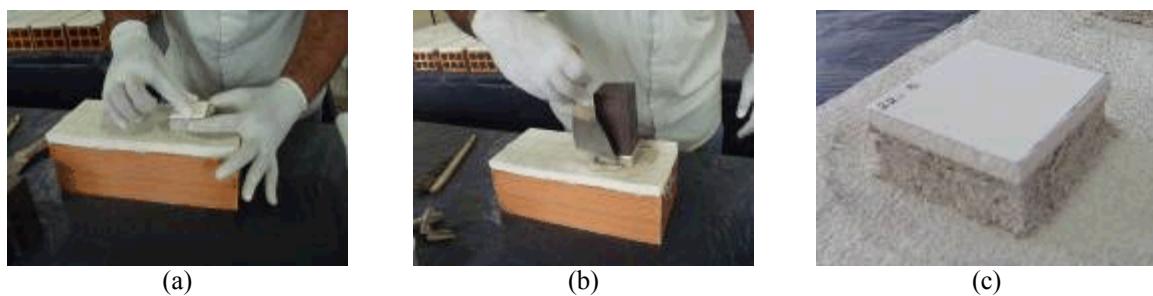
Após a realização desses procedimentos preliminares, fôrmas metálicas quadradas de 1,5 cm de altura e 5 cm de lado foram, então, utilizadas para padronizar tanto a espessura das argamassas de assentamento como as dimensões do corpo de prova (Figura 7a). Em seguida, a argamassa foi colocada com uma espátula dentro da fôrma metálica até ultrapassar a altura desta (Figura 7b). Após a realização desses procedimentos, o azulejo foi mergulhado na água e retirado rapidamente desta, absorvendo em média 6% de água (Figura 7c).

Figura 7 – (a) Posiconamento da fôrma; (b) preenchimento da fôrma com argamassa; e (c) umedecimento do azulejo



Após o umedecimento do azulejo, esse era assentado, vibrando e pressionando até atingir a altura da fôrma (Figura 8a). Um peso de 2 kg era colocado sobre a placa assentada por 1 minuto, enquanto removiam-se as fôrmas e retiravam-se os excessos de argamassa das laterais (Figura 8b). Concluída esta etapa, o corpo de prova estava pronto (Figura 8c).

Figura 8 – (a) Assentamento do azulejo; (b) retirada do excesso de argamassa das laterais durante a permanência do peso de 2 kg sobre o revestimento cerâmico; e (c) corpo de prova pronto



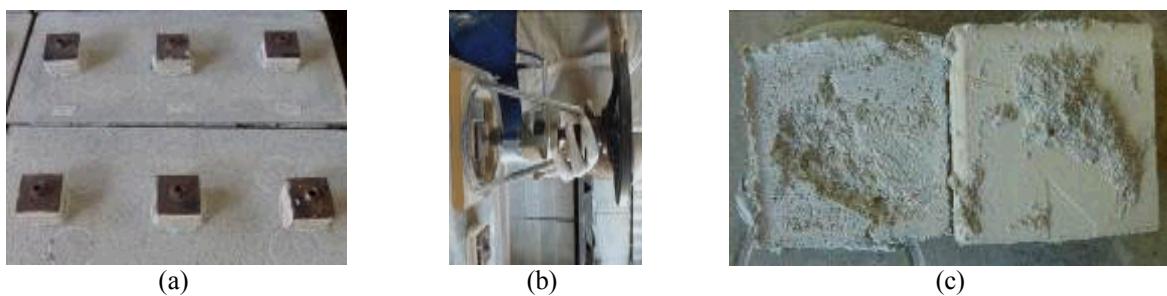
3.3. Ensaio de resistência de aderência à tração

A determinação de resistência de aderência à tração baseou-se na NBR 14084 (ABNT, 2005). Foram ensaiados 10 corpos de prova para cada tipo de argamassa aos 45 ± 3 dias e 90 ± 3 dias, totalizando 80 corpos de prova.

Antes, no entanto, da realização do ensaio nessas idades, foi realizado um ensaio piloto aos 28 dias de idades para avaliar a viabilidade do método proposto. Neste ensaio, observou-se que a argamassa de regularização estava sendo ensaiada. Como é interesse desta pesquisa estudar apenas a interface entre a placa cerâmica e a argamassa de assentamento, optou-se por remover os corpos de prova da camada de regularização com leves golpes de talhadeira e marreta e, posteriormente, colá-los em um substrato-padrão de concreto com cola plástica.

Depois de concluída esta etapa, nas idades estabelecidas, as superfícies tanto das pastilhas metálicas como das placas cerâmicas foram limpas e, posteriormente, foram coladas, conforme ilustrado na Figura 9a. Após este procedimento, aferia-se o nível dos corpos de prova, no intuito de que as cargas fossem aplicadas ortogonalmente, eliminando-se, assim, possíveis cargas excêntricas durante a execução do arrancamento. Alguns cuidados ainda foram realizados: a regulagem do eixo do equipamento e a verificação de possíveis flutuações no dispositivo de leitura.

Figura 9 – (a) Configuração dos corpos de prova após a colagem da pastilha metálica sobre a superfície esmaltada do azulejo; (b) aplicação do esforço de tração; e (c) corpo de prova após ruptura



Concluída estas etapas, aplicava-se, por fim, o esforço de tração até a ruptura do corpo de prova (Figura 9b e 9c). Em seguida, eram anotadas as cargas de ruptura, o tipo e porcentagem de ruptura e calculava-se a tensão de aderência à tração.

Na análise de resultados foram considerados apenas os 3 maiores valores para cada caso analisado, correspondentes à resistência potencial. Dessa forma, nesta etapa de análise de resultados foram selecionados 24 valores de um total de 80 obtidos na execução desse ensaio. O uso da resistência potencial, ou seja, os maiores valores obtidos, é justificado pela premissa de que não há no procedimento de execução do ensaio nenhuma ação que vá aumentar os valores de resistência e, ao contrário, o que comumente ocorre são falhas nesse procedimento que reduzem esses valores. A fragilidade da argamassa e algumas operações durante a execução do ensaio ocasionam uma alta variabilidade dos resultados (CARASEK, 1996).

3.4. Análise no microscópio eletrônico de varredura (MEV)

O objetivo da análise ao MEV é identificar e observar a morfologia dos produtos existentes na argamassa. Nesta etapa foram avaliadas as argamassas de assentamento A e C, aos 40 dias.

Para a análise das amostras ao MEV foi utilizado o equipamento Jeol JSM-6610, o qual possui capacidade máxima de magnificação de 300.000 vezes. As imagens utilizadas para avaliação da morfologia do material foram obtidas através de sinais de elétrons secundários (SE). Essas imagens foram processadas no programa *Jeol Scanning Electron Microscope*, versão 2.2.4. Além da obtenção de imagens de microestrutura da argamassa, foram realizadas microanálises químicas, com a adoção ao microscópico do detector de Raios X por espectrômetro de dispersão de energia (EDS). Para esta finalidade, utilizou-se o programa Nss 2.3 da *ThermoScientific*.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Resistência de Aderência à Tração

Os resultados do ensaio de resistência de aderência à tração potenciais tanto aos 45 dias como aos 90 dias estão apresentados na Tabela 2, já os resultados médios potenciais estão apresentados na Tabela 3 e Tabela 4. Na Figura 10 é apresentada a relação entre a resistência de aderência à tração e o teor de metacaulim das argamassas estudadas tanto aos 45 dias como aos 90 dias de idade.

Tabela 2 – Resultados de resistência de aderência à tração potenciais dos corpos de prova de revestimento cerâmico das argamassas de assentamento aos 45 e 90 dias

Argamassa	Idade	Corpo de prova	Tensão ruptura (MPa)	Forma de ruptura (%)	
				Argamassa	Interface argamassa/tardoz
A	45	2	0,013	4	96
		3	0,012	7	93
		6	0,016	11	89
	90	1	0,006	2	98
		4	0,009	4	96
		6	0,023	2	98
B	45	1	0,028	14	86
		9	0,008	0,2	99,8
		10	0,018	8	92
	90	3	0,062	3	97
		7	0,024	2	98
		8	0,020	3	97
C	45	1	0,084	10	90
		8	0,021	1	99
		9	0,040	26	74
	90	1	0,066	3	97
		9	0,031	6	94
		10	0,045	4	96
D	45	1	0,027	5	95
		2	0,074	21	79
		5	0,051	14	86
	90	1	0,093	8	92
		4	0,103	10	90
		7	0,200	3	97

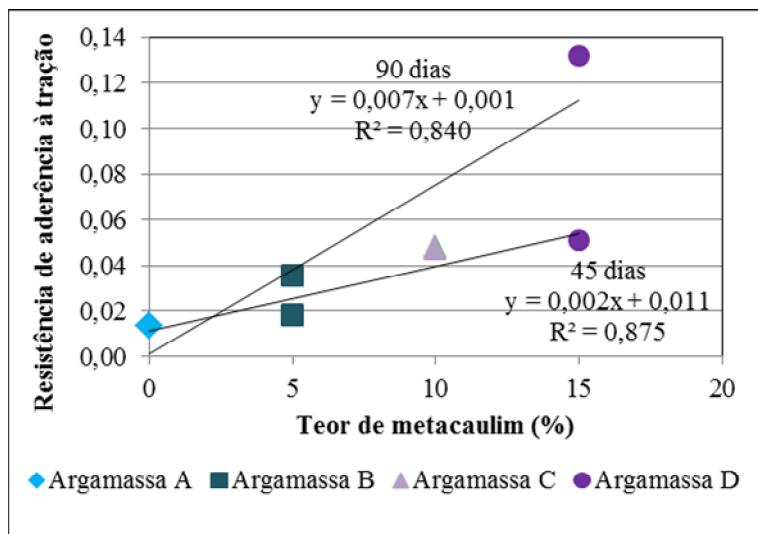
Tabela 3 – Resultados médios de resistência de aderência à tração potenciais e tipos de rupturas dos corpos de prova de revestimento cerâmico por argamassa aos 45 dias

Argamassa	Resistência à aderência média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coeficiente de variação	Forma de ruptura (%)	
				Argamassa	Interface argamassa/tardoz
A	0,014	0,002	16	7	93
B	0,018	0,010	56	7	93
C	0,048	0,032	67	12	88
D	0,051	0,024	46	13	87

Tabela 4 – Resultados médios de resistência de aderência à tração potenciais e tipos de rupturas dos corpos-de-prova de revestimento cerâmico por argamassa aos 90 dias

Argamassa	Resistência à aderência média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coeficiente de variação	Forma de ruptura (%)	
				Argamassa	Interface argamassa/tardoz
A	0,013	0,009	70	3	97
B	0,035	0,024	67	3	97
C	0,048	0,018	38	4	96
D	0,132	0,059	45	7	93

Figura 10 – Relação entre a resistência de aderência à tração e o teor de metacaulim das argamassas nas idades de 45 dias e 90 dias



Os resultados obtidos mostram um crescimento da resistência de aderência à tração nos traços B e D entre as idades de 45 dias e de 90 dias. Já nos traços A e C, a resistência se manteve constante. A falta de crescimento esperado nos valores de resistência de aderência nos traços A e C entre as idades analisadas deve-se à alta variabilidade típica desse ensaio. A tendência de acréscimo nas resistências mecânicas à medida que se aumentam as idades das argamassas está relacionada com o processo de carbonatação das argamassas, onde o hidróxido de cálcio na presença de CO_2 é transformado em carbonato de cálcio, que é um produto mais resistente que o primeiro; e está relacionado também com o processo de reação pozolânica, onde o metacaulim na presença de água reage com o hidróxido de cálcio formando compostos aglomerantes, tais como, os silicatos, silico-aluminatos e aluminatos de cálcio hidratados.

O coeficiente de determinação entre a resistência de aderência à tração e o teor de metacaulim é forte tanto aos 45 dias como aos 90 dias. Assim, percebe-se uma influência positiva do acréscimo de metacaulim nas argamassas no aumento de resistência de aderência. Por possuir uma área superficial maior que a cal, o metacaulim é capaz de ocupar vazios da argamassa (efeito físico do empacotamento), além de apresentar aumento de resistência mecânica devido aos produtos obtidos pelas reações pozolânicas (efeito químico).

Todos os conjuntos de azulejo/argamassa ensaiados à resistência de aderência, tanto aos 45 dias como aos 90 dias, apresentaram porcentagem de ruptura na interface argamassa/tardoz igual ou superior a 87% e na argamassa de assentamento igual ou inferior a 13%. Essas elevadas porcentagens de ruptura na interface argamassa/tardoz indicam uma baixa aderência entre a argamassa de assentamento à superfície do tardoz. Esses valores de aderência baixos podem estar relacionados a uma série de fatores, tais como, a porosidade inferior dos azulejos de reposição em relação aos históricos e a incompletude das reações de carbonatação e das reações pozolânicas (as quais contribuem para a resistência de aderência) devido às baixas idades de teste.

4.2. Análise no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)

Na sequência são analisados aspectos microestruturais tanto da argamassa de cal quanto da interface desta com o agregado das argamassas A e C.

A argamassa A é constituída basicamente por cal e agregado silicoso. Na Figura 11 é apresentada uma micrografia de uma região de superfície de um agregado coberta por cristais de calcita. Já na Figura 12 é apresentada a análise de EDS de dois pontos distintos da argamassa A, os quais estão indicados na Figura 11.

Figura 11 – Micrografia de uma região de superfície de um agregado coberta pela pasta de cal da argamassa A

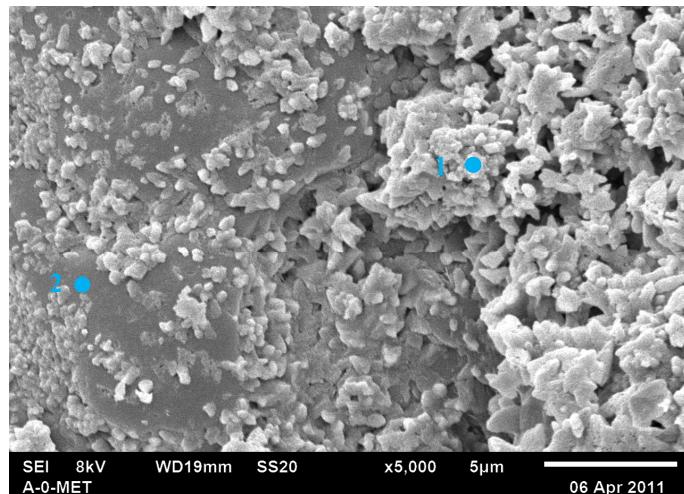
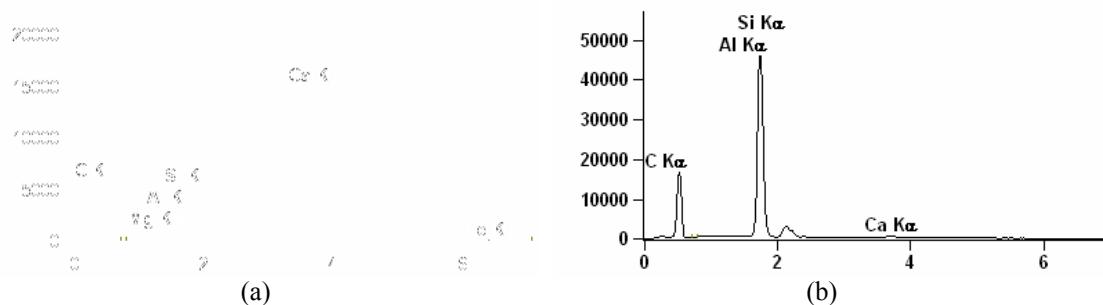


Figura 12 – (a) Espectro EDS do ponto 1 e (b) do ponto 2 da argamassa A



A partir das análises de EDS do ponto 1 da argamassa A é possível concluir que os compostos representados são cristais de calcita, com presença de pequenos teores de Mg, Al, Si e Fe, provenientes do agregado que está em segundo plano. Já a composição química da superfície indicada pelo ponto 2, caracterizada pelo alto teor de sílica, é típica do agregado.

A maioria dos compostos da argamassa C observados durante a análise no microscópio eletrônico de varredura caracterizava-se pelos produtos empilhados, como ilustrado na Figura 13. O espectro EDS do ponto 1, apresentado na Figura 14, representa a composição típica dos compostos observados na região analisada. Esses compostos apresentam alto teor de Ca na sua composição, o que indica serem cristais de calcita.

Figura 13 – Micrografia de uma região da argamassa C com predominância de calcita

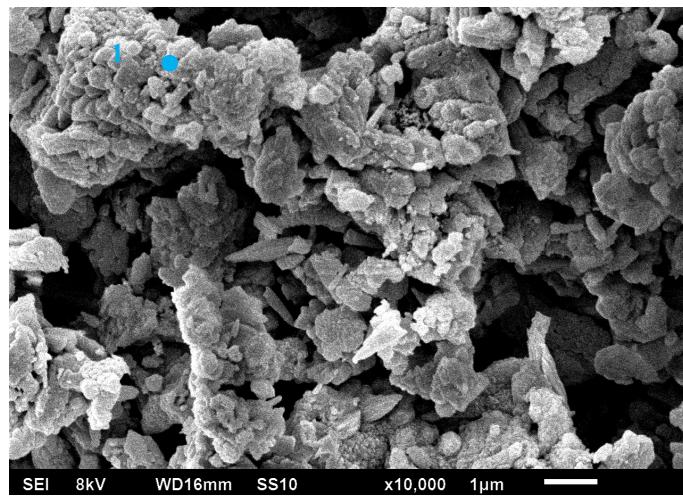
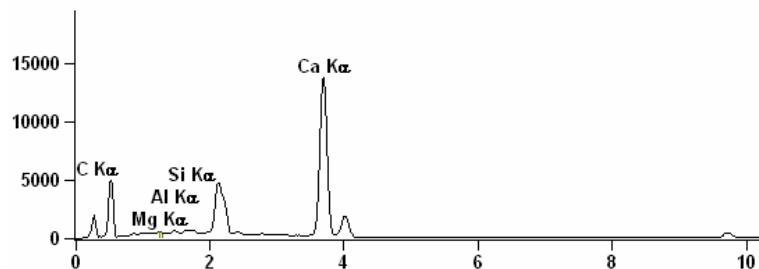
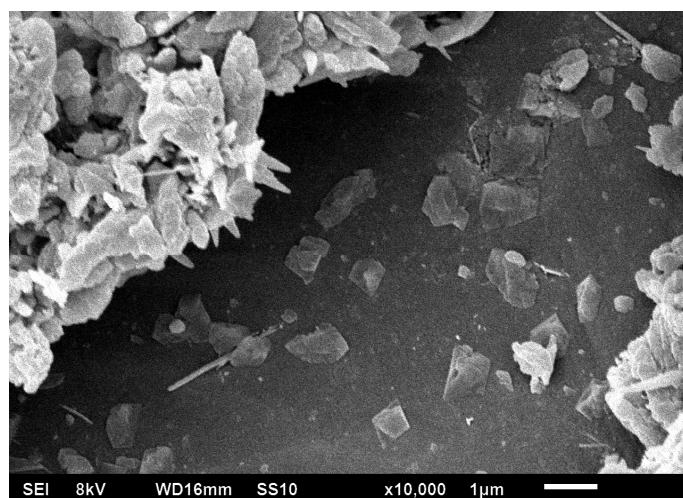


Figura 14 – Espectro EDS do ponto 1 da argamassa C



Além da morfologia de cristais de calcita, em uma região de superfície de agregado foram identificadas morfologias em forma de agulha, possivelmente vestígios de reação pozolânica. Uma micrografia dessa região é ilustrada na Figura 15. Entretanto, não foi possível realizar uma microanálise dos compostos em forma de agulha, pois sua forma esguia e de pouco espessura dificultam a leitura de sua composição química.

Figura 15 – Micrografia de uma região de superfície de um agregado recoberta pela pasta da argamassa C



A presença desses produtos de reação pozolânica ajuda a explicar os melhores resultados de resistência mecânica, bem como de aderência, quando se empregou metacaulim nas argamassas.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nos revestimentos cerâmicos aplicados em laboratório observou-se uma tendência de acréscimo da resistência de aderência à medida que se aumentou o teor de metacaulim nas argamassas de reabilitação estudadas. Essa tendência também foi observada entre as idades analisadas de 45 dias e 90 dias. O efeito físico (empacotamento) e o efeito químico (produtos da reação pozolânica) obtidos pela adição de metacaulim nas argamassas contribuíram para o ganho de resistência observado.

A morfologia de produtos de carbonatação, compostos ricos em cálcio, e de possíveis reações pozolânicas, compostos ricos em silício e alumínio, além do cálcio, foram identificados nas argamassas de reabilitação a partir das análises no MEV e são esses compostos possivelmente os principais responsáveis pela resistência de aderência das argamassas.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 14084**: Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas – Determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2005. 5p.
- ASHURST, J. **Conservation of ruins**. Burlington: Elsevier, 2007. 344p.
- CARASEK, H. **Aderência de argamassas à base de cimento Portland a substratos porosos**: avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo de ligação. 1996. 285 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.
- CARASEK, H. **Argamassas**. In: ISAIA, G.C. (Org.). Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. São Paulo: IBRACON, 2010. p. 892-944.
- COELHO, A. Z.; JALALI, S.; TORGAL, F. P. **Desempenho comparado entre argamassas comerciais para a reabilitação e argamassas de cal áerea e metacaulino**. In: 3 CONGRESSO PORTUGUES DE ARGAMASSAS DE CONSTRUÇÃO, 2010, LISBOA. ANAIS DO 3 APFAC2010. Lisboa: APFAC, 2010. v. 1. p 1-10.
- DURBIN, L. **Architectural tiles: conservation and restoration**. Oxford: Elsevier, 2005.
- FERREIRA, M. I. M. **Azulejos tradicionais de fachada, em Ovar**: contributos para uma metodologia de conservação e restauro. Câmara Municipal de Ovar/ ACRA – Atelier de Conservação e Restauro do Azulejo, 2009.
- FORTES-REVILLA, C., MARTÍNEZ-RAMÍREZ, S.; BLANCO-VARELA, M. T. *Modelling of slaked lime-metakaolin mortar engineering characteristics in terms of process variables*. **Cement and Concrete Composites**, [s.l.], v. 28, nº 5, p. 458-467, 2006.
- JAPIASSÚ, P. **Estudo do mecanismo de aderência de azulejos e argamassas de cal em revestimentos históricos**. 2011. 283 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2011.
- MAGALHÃES, A; VEIGA, R. *Physical and mechanical characterisation of historic mortars: application to the evaluation of the state of conservation*. **Journal: Materiales de Construcción**, v 59, n. 295, p. 61-77, 2009.
- MARTÍNEZ, M. C. I.; CARRO, G. A. *Ancient building requirements and the evaluation of different lime cement mortars compositions*. In: CONGRESSO NACIONAL DE ARGAMASSAS DE CONSTRUÇÃO, Lisboa, 2007. **Anais...** Lisboa: APFAC, 2007.
- NÓBREGA, A. F.; SOUSA, J.; MARINHO, M.; CARNEIRO, A. **Estudo das propriedades de argamassas de cal e pozolana**: influência do tipo de metacaulim. In: 3 CONGRESSO PORTUGUÊS DE ARGAMASSAS DE

CONSTRUÇÃO, 2010, LISBOA. ANAIS DO 3 APFAC2010. Lisboa: APFAC, 2010. v. 1. p. 1-15.

SEPULCRE-AGUILAR, A.; HERNÁNDEZ-OLIVARES, F. *Assessment of phase formation in lime-based mortars with added metakaolin, Portland cement and sepiolite, for grouting of historic masonry*. **Cement and Concrete Research**. [s.l.], nº 40, 66 –76, 2010.

TEIXEIRA, B. M. G. F. **Conservação de fachadas azulejadas em Ovar**: comportamento mecânico. Aveiro: Universidade de Aveiro, 2008. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, Aveiro, 2008.

VALENTE, C. S. S. **Conservação de fachadas azulejadas em Ovar**: comportamento face à água. Aveiro: Universidade de Aveiro, 2008. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, Aveiro, 2008.

VEIGA, M. R.; VELOSA, A.; MAGALHÃES, A. C. *Experimental applications of mortars with pozzolanic additions: Characterization and performance evaluation*. **Construction and Building Materials**, 23 (2009), p. 318-327, 2008.

VEIGA, M. R.; VELOSA, A. L.; MAGALHÃES, A. C. *Evaluation of mechanical compatibility of renders to apply on old walls based on a restrained shrinkage test*. **Materials and Structures**, nº 40, p. 1115 - 1126, 2007.

VELOSA, A. L. P. L. **Argamassas de cal com pozolanas para revestimento de paredes antigas**. 2006. 250f. Tese (Doutor em Engenharia Civil), Universidade de Aveiro, Aveiro, 2006.

VELOSA, A. L.; ROCHA, F.; VEIGA, R. *Influence of chemical and mineralogical composition of metakaolin on mortar characteristics*. **Acta Geodyn Geomater**. v 6, nº 1 (153), p. 121 - 126, 2009.

VELOSA, A.; VEIGA, M. R. *Lime - metakaolin mortars – properties and applications*. In: CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL, MATERIAIS E PRÁTICAS - UM DESAFIO PARA A INDÚSTRIA NO NOVO MILÉNIO. 2007. Disponível em: <<http://www.irbdirekt.de/daten/iconda/CIB11755.pdf>> Acesso em: 15 nov. 2010.

VELOSA, A. L.; VEIGA, M. R.; ROCHA, F. Utilização de metacaulim em argamassas para conservação de edifícios. In: VIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 2009, Curitiba. **Anais...** VIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 2009. v. 1. p. 1-16.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à [Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior](#) (CAPES), pelo apoio financeiro a esta pesquisa, bem como aos laboratórios Carlos Campos e Laboratório Multiusuário de Microscopia de Alta Resolução (LabMic) – UFG.