

O uso de adições em argamassas de cal para restauro

Magalhães, A. C.^{1,a}, Muñoz, R.^{2,b}

¹ Universidade Federal da Bahia, Rua Caetano Moura, Federação, Salvador, Bahia, Brasil

² Universidade Federal da Bahia, Rua Caetano Moura, Federação, Salvador, Bahia, Brasil
^aanacristian@hotmail.com, ^bmunoz.rosana@gmail.com

Palavras chave: argamassa, cal, metacaulim, pó cerâmico, restauro

RESUMO

A utilização de adições em argamassas de cal e areia é antiga e está registrada nos livros de Vitruvius (séc. I a.C.), que destacou o uso de fragmentos e de pó cerâmico em suas composições, e nas publicações de vários outros investigadores que lhe seguiram, tais como Alberti (séc. XV), Cataneo (séc. XVI), D' Aviler e Scamozzi (séc. XVII), Belidor e Lorient (séc. XVIII), entre outros. O emprego destes materiais em argamassas estava associado à obtenção de melhor desempenho, principalmente em locais em contato constante com água, como cisternas, reservatórios, canais, entre outros, onde eram requeridas propriedades de estanqueidade e durabilidade. Mais recentemente, outras incorporações vêm sendo analisadas, com destaque para o metacaulim. Visando estudar argamassas de revestimento de paredes de edifícios antigos, para substituição das originais, este trabalho objetiva avaliar características mecânicas e de comportamento à água de argamassas de cal hidratada e areia com adições de pó cerâmico e também de metacaulim. Para alcançar o objetivo proposto, foi realizada uma campanha experimental, com a execução de ensaios nos estados fresco, tais como *Squeeze Flow* e *Flow Table*, e endurecido, a 28 e 90 dias. Nesta última condição, serão executados ensaios de resistência à tração e à compressão, módulo de elasticidade, absorção capilar e porosidade. Adicionalmente, serão apresentados dados das caracterizações mineralógica, física, química e mecânica das adições, com destaque para a atividade pozolânica. Os resultados serão analisados por meio de comparações com valores de formulações de referência (composições sem adições) e com o estabelecido pela literatura internacional para argamassas destinadas a intervenções restaurativas. Ressalta-se a importância deste estudo para a tecnologia de produção de argamassas a serem utilizadas em restaurações atuais de edifícios antigos e para a Ciência da Conservação e do Restauro.

INTRODUÇÃO

O uso de aditivos e adições nas argamassas de cal foi muito comum no passado, de acordo com registros existentes desde o século I. Os aditivos agem diretamente na dinâmica das reações químicas de hidratação do ligante, não alterando a composição química dos principais produtos resultantes. As adições minerais são materiais extremamente refinados que contêm em sua composição grande quantidade de sílica amorfa - reativa, portanto, adicionados a concretos ou argamassas alteram os produtos químicos resultantes da hidratação do ligante. Compostos orgânicos tais como claras e gemas de ovos, sangue, leite de figo, caseína, cola animal, cerveja, sucos vegetais, entre

outros, atuavam como plastificantes e reguladores do tempo de pega [1]. A incorporação de alguns destes compostos em argamassas foi investigada por Ventolà et al. [2] que observaram aumento de resistência e da velocidade de carbonatação, esta última importante para impedir o destacamento do revestimento após aplicação. Estes autores ressaltaram também acréscimo na capacidade de impermeabilização, fator relevante quando é necessária proteção adicional contra a água. Vários exemplos de compostos adicionados às argamassas destacam-se, tais como: açúcar, suco de frutas, arroz, carvão, sangue, leite, queijo, palha, pêlo de animal, cerveja, resinas, óleos, sebo, vinho, urina, algodão, amido, excremento, fibras, entre outros [3].

As adições de maior relevância em argamassas são as pozolanas. O seu uso em edificações é conhecido desde a antiguidade, sobretudo, pelos povos romanos, que demonstraram conhecimento bastante aprofundado sobre as propriedades dos materiais construtivos. Visando melhor desempenho das formulações de cal em contato com água, acrescentavam-se adições minerais à mistura, a exemplo da argila calcinada, sob a forma de fragmentos cerâmicos ou de cerâmica moída. As argamassas assim produzidas evidenciavam maior impermeabilidade e durabilidade superior às de cal e areia sem adições [4, 5, 6].

Alusões ao emprego de cerâmica moída ou de pó cerâmico na confecção de argamassas de cal, especialmente em locais onde características de hidraulicidade eram requeridas, são encontradas na bibliografia que permaneceu como referência básica sobre a arte de construir desde a época vitruviana (séc. I a.C.) [7] até o século XIX.

Alberti [8] mencionou o uso do pó cerâmico para pavimentações. Com o mesmo objetivo, Cataneo [9] propôs formulação de cal com pó de telha e limalha de ferro; sendo essa mesma mistura apresentada por Martini [10] para estuque a ser aplicado em reservatório. Ainda visando estanqueidade, D'Aviler [11] recomendou o uso de material cerâmico pulverizado, além da cal viva, quando a intenção fosse conferir hidraulicidade à argamassa. Outro investigador que mencionou o uso do pó cerâmico para atribuir maior durabilidade e resistência à ação da água foi Lorient [12], que também propôs metodologia de confecção de argamassas a partir do uso das cal viva e extinta, areia e pó cerâmico. Milizia [13], baseado no método de Lorient, propôs argamassa impermeável para revestir bacias, canais e construções submersas. Adicionalmente, Belidor [14] e Scamozzi [15] apresentaram formulações com utilização de pó cerâmico, cal e areia para pontes, aquedutos, cisternas e obras sem fins estruturais.

De forma geral, apesar da grande diversidade de origens e características dos materiais, os investigadores antigos estabeleceram princípios gerais que permitiam aos construtores o conhecimento da qualidade dos constituintes das argamassas e fizeram recomendações sobre sua adequação para obtenção de características de desempenho adequadas. Embora divergissem quanto à procedência do pó cerâmico, por exemplo, se de telha ou de tijolo, havia consenso que tal material deveria ser finamente moído.

Mais recentemente, diferentes adições começaram a ser investigadas no intuito de conferir certas propriedades a concretos e argamassas à base de cimento. Dentre elas, destacam-se metacaulim, sílica ativa, cinzas volantes, escória de ferro, cinzas da casca de arroz, entre outras, que constituem também possíveis alternativas a serem incorporadas em argamassas de cal. É comprovado que o seu uso dá origem a argamassas com propriedades intermediárias entre aquelas compostas somente de cal ou só de cimento, melhorando características de desempenho, uma vez que a reação desses materiais com a cal resulta na formação de silicatos e aluminatos de cálcio hidratado.

Assim, a utilização de adições nas argamassas de cal aérea na conservação de edifícios é promissora, sobretudo em casos específicos, como por exemplo, em locais com presença de água ou dificuldade de acesso de dióxido de carbono. Nestas situações, as misturas de cal aérea sem adições e as soluções com argamassas de cimento (devido ao elevado módulo de elasticidade e ao seu conteúdo em sais solúveis) não são as mais adequadas.

Visando estudar argamassas de revestimento de paredes de edificações antigas, para substituição das originais, este trabalho objetiva avaliar características mecânicas e de

comportamento à água de argamassas de cal hidratada e areia com adições de pó cerâmico e também de metacaulim.

O metacaulim é um material obtido da calcinação de argilas cauliniticas e caulins a uma temperatura entre 600°C e 900°C e tem sido extensivamente aplicado em composições cimentícias. No Brasil, o emprego da argila calcinada iniciou-se com a construção da barragem de Jupia na década de 60 [16], passando posteriormente a ser usada na produção de cimentos pozolânicos [17]. Nos últimos anos, tiveram lugar várias pesquisas sobre o potencial e a influência do metacaulim em concretos e argamassas [18,19, 20, 21, 22, 23].

Diversos trabalhos foram efetuados no Brasil sobre a incorporação de materiais com características pozolânicas. No entanto, especificamente, nas argamassas de cal destinadas à reabilitação de edifícios históricos, notam-se ainda lacunas sobre o estudo do seu comportamento, quer no estado fresco, quer ao longo do tempo, principalmente no que se refere à compatibilidade com o suporte antigo.

Para atingir o objetivo proposto neste trabalho, foi desenvolvida uma campanha experimental na Universidade Federal da Bahia, contemplando elaboração e ensaios de argamassas de cal e areia (de referência) e outras com adições de pó cerâmico e também de metacaulim, confeccionadas com base na literatura científica. Avaliaram-se características nos estados fresco e endurecido aos 28 e 90 dias, cujos resultados foram comparados com os dados de referência e os propostos pela literatura internacional.

Espera-se obter argamassas com características de desempenho adequadas, aplicáveis às intervenções de restauração do patrimônio histórico e cultural brasileiro. Destaca-se, assim, a importância desta pesquisa na sistematização do conhecimento sobre a composição de argamassas de cal com adições, bem como na contribuição para a tecnologia de produção de argamassas a serem utilizadas em restaurações atuais de edifícios antigos e para a Ciência da Conservação e do Restauro.

ASPECTOS TEÓRICOS DE ARGAMASSAS DE RESTAURO

As argamassas de cal para serem utilizadas em paredes de edifícios devem ser similar ou o mais próximo possível das antigas, e cumprir determinadas características químicas, físicas e mecânicas [24] para garantir as funções que lhe estão destinadas. Alguns desses requisitos, estabelecidos no âmbito de estudos do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), em Portugal, são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1: Requisitos mínimos de argamassas de revestimento para edifícios antigos

Tipo de argamassa	Comportamento à água		Características mecânicas aos 90 dias (MPa)			
	Permeância ao vapor de água (m)	Coeficiente de capilaridade C (Kg/m ² .min ^{1/2})	Resistência		Módulo de Elasticidade e (E)	Aderência ao suporte (Ra)
			Tração (Rt)	Compressão (Rc)		
Reboco exterior	< 0,08	1,0 - 1,5	0,2-0,7	0,4-2,5	2000 - 5000	0,1 - 0,3 ou com ruptura coesiva pelo reboco
Reboco interior	< 0,10	-	0,2-0,7	0,4-2,5	2000 - 5000	0,1 - 0,3 ou com ruptura coesiva pelo reboco

Fonte: Adaptado de Veiga e Carvalho, p. 50 [24].

Em algumas situações nas quais se faça necessário que as argamassas de cal para restauro cumpram requisitos mais específicos, poderá ser útil a introdução de adições que melhorem as suas características, por exemplo, em termos de permeabilidade, resistência ou porosidade. Um caminho que vem sendo adotado em centros de pesquisas europeus refere-se ao uso de adições que confirmam alguma hidraulicidade sem prejudicar a capacidade de secagem do suporte. Neste sentido, Veiga [25] menciona o uso de

argamassas de revestimento com cal hidráulica ou cal aérea e pozolanas nas intervenções de edifícios antigos. Ao estudar a incorporação de metacaulim, a autora destaca que a reação pozolânica entre esta adição e a cal aérea é lenta e exige presença de água durante um longo período de tempo, muito superior ao requerido pela hidratação dos ligantes hidráulicos, como o cimento e a cal hidráulica. Essa reação “entra em competição” com a carbonatação da cal; assim, se as condições ambientais forem mais favoráveis à carbonatação, toda a cal se transforma em carbonato de cálcio antes de ter oportunidade de reagir com o metacaulim; e este, sem hidróxido de cálcio livre, deixa de funcionar como ligante, passando a atuar como filler (agregado) [25]. A referida autora destaca a importância de se ter em conta as condições de exposição e de cura no comportamento das argamassas de cal e metacaulim, uma vez que o bom desempenho destas está associado à garantia de umidade por um período inicial prolongado, de modo a possibilitar a reação pozolânica antes da carbonatação total da cal aérea. Veiga [25] ainda indica os locais de adequada aplicação destas argamassas: paredes sujeitas ao respingo contínuo da água do mar; paredes com capilaridade ascendente e também ambientes muito úmidos. Conclui sobre o potencial de uso das argamassas de cal e metacaulim em conservação de edifícios antigos, desde que resolvidos vários aspectos detectados, tais como fissuração decorrente de retração, que deve ser cuidadosamente analisada.

Cerny et al. [26], em seus estudos sobre o uso de metacaulim em argamassas de cal aérea, constataram aumento significativo tanto da resistência à compressão, como de tração por flexão. Neste mesmo sentido, Fortes-Revilla et al. [27] combinaram metacaulim com cal hidratada, concluindo que a utilização desta mistura como argamassas de substituição, para reboco de alvenarias antigas, é muito promissora, uma vez que as suas resistências mecânicas são superiores à das argamassas só com cal aérea e adequadas à adesão ao suporte.

A avaliação de diversas propriedades de rebocos à base de cal aérea indica que a adição do metacaulim em substituição da cal aérea em 20 % de massa permite otimizar suas características [28]. No que concerne à evolução das resistências mecânicas a idades recentes de argamassa de cal com metacaulim, os autores constataram aumento até os 28 dias e estabilização a partir desta idade, sugerindo o término da reação pozolânica. A explicação fundamenta-se na finura das partículas de metacaulim, as quais reagem totalmente até esta idade. No caso da argamassa de cal aérea sem adições, o incremento das resistências aconteceu até os 90 dias; porém, o valor da resistência à compressão, nessa idade, foi cerca de cinco vezes inferior àquele obtido nas argamassas com adição de metacaulim. A resistência à tração por flexão das argamassas com metacaulim, quando comparada à das argamassas sem adição, aos 90 dias, apresenta-se duas a três vezes superior.

Aggelakopoulou et al. [29], ao estudar argamassas de cal aérea com metacaulim, em traços ponderais de metacaulim/cal ≤ 1 , obteve valores máximos de resistência mecânica nos primeiros três meses, notando, posteriormente, diminuição de valores até um ano, período em que estabilizaram. Os autores associaram a perda de resistência mecânica ao aparecimento de microfissuras nos corpos de prova, devido a fenômenos de retração, principalmente, nos casos com maior proporção de metacaulim/cal.

Faria [30], ao analisar argamassas com pozolanas, com três traços volumétricos distintos de cal: metacaulim: areia de rio (1:0,5:3; 1:1:4; 1:1,5:5) obteve melhores resultados para o traço volumétrico (1:1:4) ou traço ponderal pozolana/cal de 1:0,8. Os valores máximos de resistência foram obtidos para a idade de 60 dias. Aos 90 dias os valores médios de resistência à tração e compressão foram, respectivamente, 0,48 e 2,2 MPa.

Em sua tese intitulada *Argamassas de cal com pozolanas para revestimentos de paredes antigas*, Velosa [31] avaliou argamassas de cal aérea de traço volumétrico 1:3 (ligante:agregado) com substituição parcial da massa do ligante por metacaulim nas percentagens de 10% e 20 %. A autora observou um aumento dos valores de resistência dos 28 para os 90 dias, e concluiu que, embora a adição de maior quantidade de metacaulim parece ter tido um ligeiro efeito no aumento da resistência à compressão, o mesmo não aconteceu para a resistência à tração.

Em relação ao uso do pó cerâmico em argamassas de cal, diversos trabalhos têm sido efetuados. Velosa [31] estudou argamassas com incorporação de pó de tijolo na proporção volumétrica de 1:1:4 (cal:pó de tijolo:areia), cujos resultados de resistência são apresentados no Quadro 2. Magalhães e Muñoz [32], ao reproduzir argamassas confeccionadas com pó de tijolo e cal viva, segundo metodologia estabelecida por Loriot [12], que propunha a mistura de uma porção de pó de tijolo bem moído, a mesma quantidade de cal viva, duas de areia de rio e uma de cal extinta há algum tempo, obtiveram os seguintes resultados, dispostos no Quadro 2.

Quadro 2: Comportamento mecânico e à ação da água de argamassas com adição de pó cerâmico

Autor	Comportamento mecânico (MPa)				Comportamento à água
	Resistência à tração na flexão (Rt)		Resistência à compressão (Rc)		Coefficiente de capilaridade (kg/m ² .h ^{1/2})
	28 d	90 d	28 d	90 d	90 d
Velosa p. 194-195 [31]	0,22	0,19	0,6	0,7	13
Magalhães e Muñoz p. 9 [32]	0,13	0,17	1,7	2,5	14

Para o desenvolvimento desta pesquisa foi realizada uma campanha experimental no Núcleo de Tecnologia da Preservação e da Restauração, laboratório vinculado à Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, apresentada na seção a seguir.

CAMPANHA EXPERIMENTAL

Inicialmente foram feitos ensaios de caracterização dos materiais usados na confecção das argamassas: areia, cal, metacaulim e pó cerâmico. Para a areia, determinaram-se o módulo de finura, a dimensão máxima característica e a curva de distribuição granulométrica, conforme estabelece a NBR 7211 [33], além da massa específica [34]. Este último ensaio também foi realizado para os materiais finos (cal, metacaulim e pó cerâmico), por meio da NM23 [35].

Adicionalmente, foi determinada a área superficial específica do metacaulim e do pó cerâmico, por meio do método de B.E.T. (Brunauer, Emmett, Teller). O conhecimento da área superficial específica das partículas é importante porque esta é uma das características que potencializa a atividade pozolânica: quanto maior a área superficial do material, maior será a facilidade de ele reagir com o hidróxido de cálcio devido a uma disponibilidade de área de contato entre os reagentes, principalmente nas primeiras idades. A NBR 15894-1 [36] indica que a área específica do metacaulim deve ser igual ou superior a 15 m²/g.

Foram preparadas argamassas de cal hidratada e areia, com traço volumétrico 1:3, fundamentado na obra de Vitruvius e usado como referência para comparação das argamassas à base de cal destinadas ao restauro. Adicionalmente, elaboraram-se misturas com adições de metacaulim e de pó cerâmico, com relação adição/ligante de 0,5 em volume, de acordo com estudos sobre argamassas de restauro [25, 30, 37]. O material pozolânico por si só não é aglutinante, mas atua como ligante quando reage com o hidróxido de cálcio. Foram moldados corpos de prova (Figura 1) na proporção 1:0,5:3 (cal:adição:areia) e acondicionados em ambiente com 20±2 °C e 65±5% de UR.

Para avaliar o comportamento no estado fresco, foram realizados ensaios para determinação da consistência por meio de *Flow Table* [38] e das características reológicas por *Squeeze Flow* [39].



Figura 1: Corpos de prova moldados em laboratório: (a) com adição de metacaulim; (b) com adição de pó cerâmico

No Quadro 3, são apresentados os valores médios obtidos de consistência por espalhamento para as diferentes argamassas. Ressalta-se que as quantidades de água foram as mínimas possíveis para obtenção de argamassas trabalháveis e de forma a não comprometer a retração, de acordo com o estabelecido por Veiga [25] para revestimentos destinados às intervenções de restauro. A relação água/ligante foi ligeiramente superior para a argamassa com metacaulim, provavelmente, pelas partículas possuírem maior superfície específica.

Quadro 3: Consistência por espalhamento

Argamassa	Traço (cal:adição:agregado)	Relação ponderal água/ligante	Consistência por espalhamento (mm)
	Em volume		
Referência	1:3	1,90	207
Metacaulim	1:0,5:3	2,00	200
Pó cerâmico	1:0,5:3	1,93	205

Embora o parâmetro adotado para a fixação do teor de água tenha sido a trabalhabilidade, determinada por índice de consistência por espalhamento, esta característica também foi analisada por meio do ensaio de *Squeeze Flow*, que permite a avaliação do comportamento reológico das argamassas.

Em sua pesquisa, Metz [40] avalia o comportamento reológico de argamassas com cimento, cal e diversos tipos de areia e estabelece quatro faixas de possibilidades de aplicação em termos de resultados de deslocamento da curva tensão x deslocamento. Segundo a autora, a aplicação é possível quando a curva está compreendida entre 2,5 a 4,0 mm. Para valores entre 1,8 e 2,5 mm, as argamassas são de difícil aplicação; e de impossível aplicação abaixo de 1,8 mm e acima de 4,0 mm.

Os perfis reológicos para argamassas de referência (CA-1/3) e com adições (50M-1/3 e 50PC-1/3, identificações relativas às argamassas com metacaulim e com pó cerâmico, respectivamente) da presente pesquisa são apresentados na Figura 2.

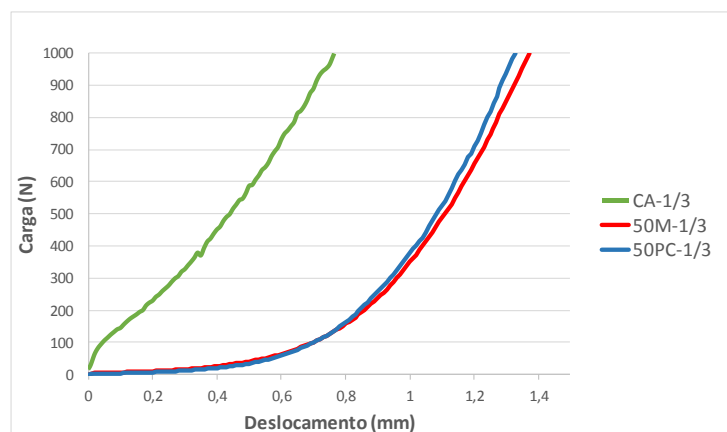


Figura 2: Perfil reológico das argamassas de estudo ($v = 0,1 \text{ mm/s}$)

De acordo com o estabelecido por Metz [40], as argamassas estudadas são de impossível aplicação, pois o intervalo de deslocamento das curvas de estudo encontra-se inferior a 1,8 mm. No entanto, salienta-se que as argamassas apresentadas possuem formulações e índices de consistência diferentes. A Figura 2 mostra ainda que as argamassas com adições, em termos de trabalhabilidade, apresentam comportamento similar entre si e melhor resultado do que as de referência.

Aos 28 e 90 dias de idade, os corpos de prova foram submetidos a testes de caracterização sob o ponto de vista da ação da água e da resistência mecânica. Em relação ao comportamento à água, os ensaios realizados nesta etapa foram: absorção de água por capilaridade [41] e índice de vazios [42]. Os ensaios de avaliação do comportamento mecânico realizados no período foram: determinação da resistência à tração na flexão e à compressão em corpos de prova prismáticos de 40 mm x 40 mm x 160 mm [43] e o ensaio de módulo de elasticidade por meio de ultrassom, conforme NBR 15630 [44].

Adicionalmente, foi realizado ensaio de avaliação de índice atividade pozolânica com uso o cimento Portland (Figuras 3a e 3b), conforme estabelecido nas normas correntes [45, 46] e com a cal [47]. Outro ensaio importante para determinação da atividade pozolânica refere-se ao Método de Chapelle [48], que permite a avaliação do teor de hidróxido de cálcio fixado à sílica e à alumina, componentes presentes nos materiais pozolânicos (Figuras 4a e 4b).



(a)



(b)

Figura 3: Determinação do índice de atividade pozolânica: (a) cura de corpos de prova em água de cal e (b) ensaio de resistência à compressão



(a)



(b)

Figura 4: Ensaio de Chapelle: (a) solução de cal e pó cerâmico e (b) titulação

Ainda para avaliar a atividade pozolânica, foi efetuada a determinação de perda ao fogo, segundo a NM 18 [49], por meio de calcinação do material em mufla, a 1000°C, por 50 minutos até obter massa constante.

Com o intuito de conhecer melhor as composições do metacaulim e do pó cerâmico, foram realizadas análises de Fluorescência de Raios X (FRX) e de Difractometria de Raios X (DRX). Foi efetuada ainda a análise visual da microestrutura, por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), cujos resultados foram complementados Espectrometria de Difração de Elétrons (EDS).

Na seção a seguir são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais utilizados na confecção de argamassas, de avaliação da atividade pozolânica das adições, além de dados de comportamento físico e mecânico das formulações.

RESULTADOS E ANÁLISES

Em relação à caracterização dos materiais, a areia utilizada apresenta dimensão máxima característica de 2,36 mm e módulo de finura de 2,76. O valor de módulo de finura obtido encontra-se dentro dos limites classificados pela NBR 7211 [33] como zona ótima (2,2 a 2,9). A Figura 5 mostra que a curva granulométrica da areia se encontra dentro limites de distribuição granulométrica classificados, pela NBR 7211 [33] como zona utilizável. As massas específicas dos materiais usados na presente pesquisa estão apresentadas no Quadro 4.

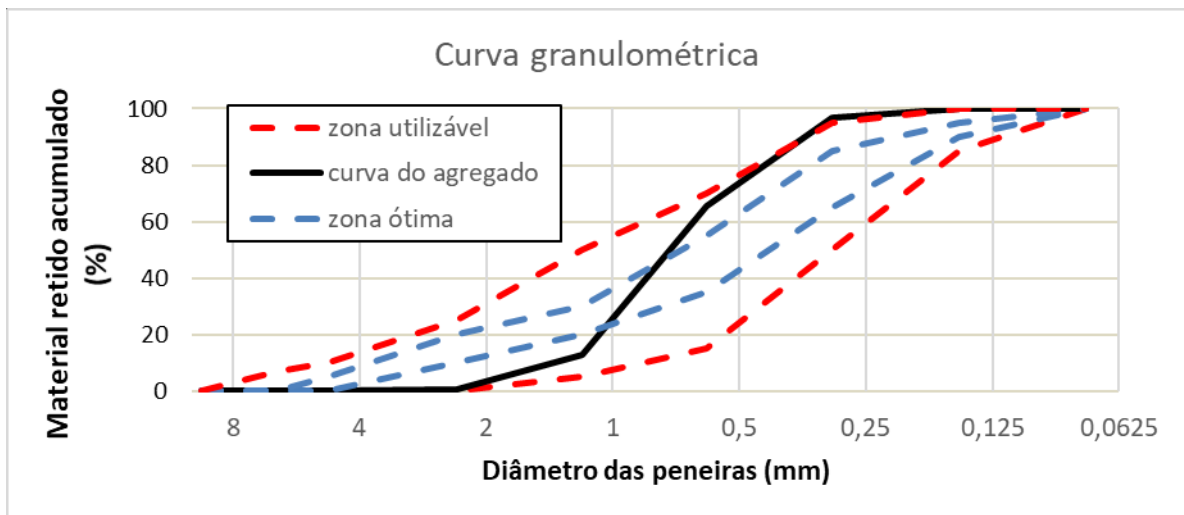


Figura 5: Curva de distribuição granulométrica da areia

Quadro 4: Massa específica dos materiais de estudo

Material	Massa específica (g/cm ³)
Areia	2,64
Cal (CH-I da marca Trevo)	2,33
Pó cerâmico	2,76
Metacaulim	2,62

As composições químicas do metacaulim e do pó cerâmico são apresentadas no Quadro 5, no qual é possível observar a predominância de sílica (SiO₂) e óxido de alumínio (Al₂O₃) como principais constituintes. O metacaulim é mais rico nestes compostos. Os resultados obtidos estão de acordo com os encontrados na literatura no que diz respeito aos materiais com características pozolânicas.

Quadro 5: Composição química das adições, obtida por FRX

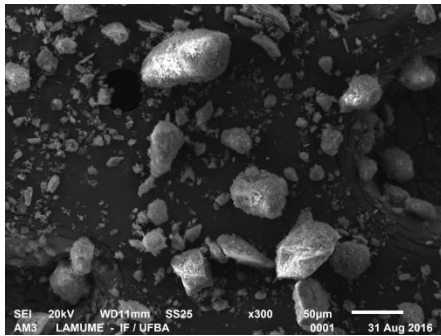
Adições	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	TiO ₂	Na ₂ O
Pó Cerâmico	53,39	20,39	8,29	9,82	1,81	1,36	2,81	1,26	0,24
Metacaulim	56,38	33,94	3,51	0,08	0,88	0,04	3,02	1,91	0,04

Para verificar os resultados obtidos com o FRX, foram realizados ensaios de MEV, EDS e DRX. O Quadro 6 apresenta os elementos constituintes das adições, identificados por meio do EDS. Os valores encontrados estão expressos em porcentagem. Destaca-se, nas adições analisadas, a predominância de oxigênio, alumínio e silício seguidos por ferro e potássio, o que confirma os resultados obtidos por FRX dispostos no Quadro 5.

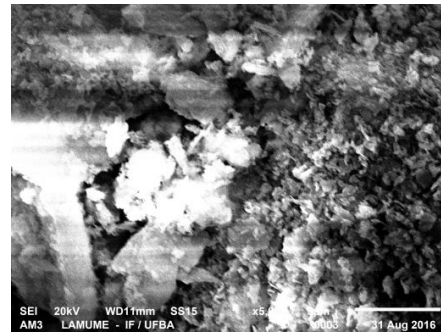
Quadro 6: Caracterização química obtida por Espectrometria de Difração de Elétrons (EDS)

Adições	O	Al	Si	Fe	K	Mg	Ti	Ca
Pó Cerâmico	46,50	14,51	25,07	7,02	3,68	1,3	0,54	0,91
Metacaulim	56,67	15,29	24,41	1,35	1,43	-	1,3	-

As Figuras 6 e 7 ilustram as imagens obtidas no MEV. Na amostra de metacaulim é visível a heterogeneidade dimensional da microestrutura, sendo este constituído por partículas muito finas que se aglomeram (Figura 6). Em relação ao pó cerâmico, verifica-se grande diversidade dimensional e morfológica das partículas constituintes, conforme visualização geral da amostra (Figura 7).

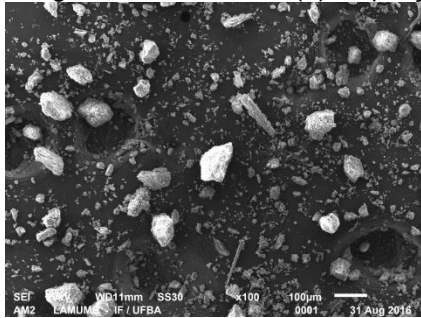


(a)

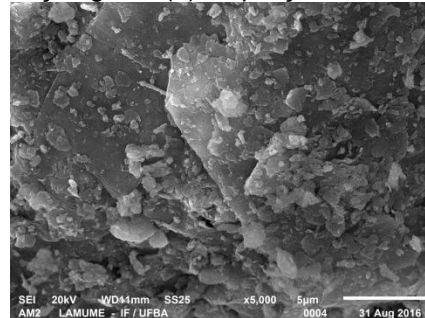


(b)

Figura 6: Metacaulim: (a) ampliação 300x - visualização geral; (b) ampliação 5000x



(a)

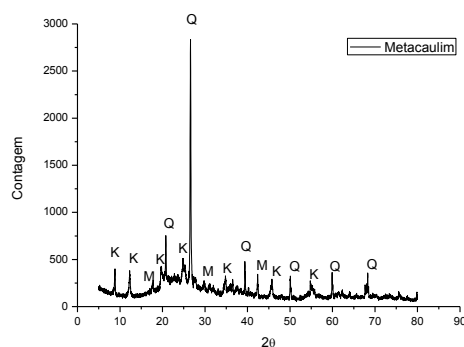


(b)

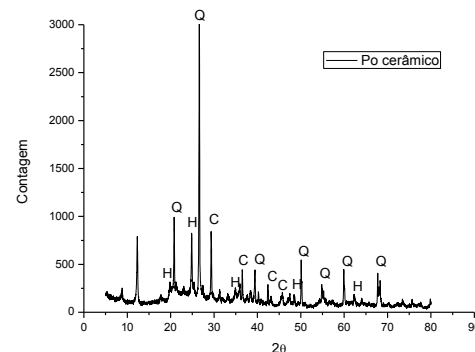
Figura 7: Pó cerâmico: (a) ampliação 500x - visualização geral; (b) ampliação 5000x

As amostras foram caracterizadas por Difração de Raios X a fim de obter informações sobre a estrutura cristalina. Nos difratogramas apresentados (Figura 8), é possível identificar o arranjo dos elementos que compõem as adições na formação das fases cristalográficas. A banda indicativa de material amorfo é pouco mais perceptível para o metacaulim (Figura 8a). Esta adição é composta majoritariamente por quartzo (Q), caulinita (K) e muscovita (M). O pó cerâmico (Figura 8b) é constituído principalmente por quartzo (Q), calcite (C) e vestígios de hematita (H). Este material exibe menor banda indicadora de material amorfo.

A técnica de difração de raios X (DRX) foi utilizada para verificar se a sílica presente nas adições se encontrava em sua fase amorfa ou cristalina. Sua importância se dá pelo fato de que quanto mais amorfo o material, maior sua reatividade.



(a)



(b)

Figura 8: Difratogramas:(a) metacaulim; (b) pó cerâmico

Em relação à caracterização da atividade pozolânica, os resultados dos ensaios apresentam-se no Quadro 7, que também mostra os valores de referência preconizados nas normativas, além da conformidade dos valores obtidos.

Quadro 7: Resumo dos resultados de caracterização dos materiais

Adições	Índice de desempenho com o cimento Portland aos 28 dias (%)		Atividade pozolânica com a cal aos 7 dias (MPa)		Área superficial específica (m ² /g)		Perda ao fogo (%)	
	Obtido	Referência	Obtido	Referência	Obtido	Referência	Obtido	Referência
Metacaulim	124,64 (3,8) *	≥ 105/ Conforme/ NBR15894-1 [36]	10,20 (0,4) *	≥ 6 Conforme/ NBR12653 [50]	32,74	≥ 15/ Conforme/ NBR15894-1 [46]	4,30 (6,9) **	≤ 4 Não conforme/ NBR15894-1 [46]
Pó cerâmico	101,74 (4,0) *	≥ 90/ Conforme/ NBR12653 [50]	4,10 (0,1) *	≥ 6 Não conforme/ NBR12653 [50]	27,36	Não especificado	10,44 (3,7) **	≤ 10 Não conforme/ NBR12653 [50]

* Desvio relativo máximo em (%); ** Coeficiente de variação em (%).

As massas específicas do metacaulim e do pó cerâmico têm valores muito próximos, sendo a do pó cerâmico pouco mais elevada que a do metacaulim. Em relação ao índice de desempenho com cimento Portland, para que o material possa ser considerado pozolânico, a NBR 12653 [50] preconiza que o valor obtido seja igual ou superior a 90%. Especificamente para o metacaulim, a norma NBR 15894-1 [46] orienta que este índice seja igual ou superior a 105%. Ambas as normas referidas estabelecem que o desvio máximo relativo, tomando como base a NBR 7215 [43], seja inferior a 6%. O ensaio de atividade pozolânica com a cal foi efetuado conforme a NBR 5751 [47] e os resultados foram comparados com o estabelecido na NBR12653 [50], que preconiza os requisitos dos materiais pozolânicos. Novos ensaios serão realizados com base na NBR 15894-2 [51], específica para a adição de metacaulim, que determina o índice de desempenho com cimento aos sete dias.

No que tange ao ensaio de área superficial específica por B.E.T., a NBR15894-1 [46] determina para o metacaulim valor igual ou superior a 15m²/g. Não foi identificado parâmetro de referência para o pó cerâmico.

Em relação aos valores de perda ao fogo, a NBR 12653 (ABNT, 2014) [50] determina para o pó cerâmico (como argilas calcinadas, materiais da classe N), valores iguais ou inferiores a 10%; para o metacaulim, a NBR15894-1 [46] preconiza valores iguais ou inferiores a 4%. Somente nestes dois casos observou-se a não conformidade de acordo com as referências, apesar dos valores ficarem próximos dos limites.

Os resultados dos ensaios relacionados ao desempenho das argamassas de estudo são apresentados no Quadro 8. Na Figura 12 apresentam-se as curvas que ilustram o comportamento em relação à absorção de água por capilaridade das argamassas estudadas.

Da análise dos resultados expressos no Quadro 8 e comparados ao estabelecido por Veiga e Carvalho [24], disposto no Quadro 1 (Reboco exterior), é possível extrair as seguintes conclusões:

i) no que se refere ao comportamento mecânico, as argamassas com adições apresentam valores de resistência à tração, à compressão e de módulo de elasticidade dentro dos limites estabelecidos por estas autoras [24], quer aos 28 ou aos 90 dias. Em termos de deformabilidade, característica avaliada pelo módulo de elasticidade, que constitui fator determinante para melhorar a resistência à fissuração [24], as argamassas cumprem com os requisitos e mostram-se adequadas. Observa-se que as resistências à tração e à compressão das argamassas com adição de pó cerâmico, aos 28 dias, encontram-se bem próximas das observáveis nas argamassas de referência e com tendência de incremento ao longo do tempo, diferentemente daquelas com adição de metacaulim, que mostram

decréscimo das resistências ao atingir a idade de 90 dias. O módulo de elasticidade das formulações com adições é superior às de referência aos 28 dias, mas inferior aos 90 dias.

ii) com relação ao comportamento à água, os coeficientes de capilaridade das argamassas com adições são superiores aos da argamassa de referência e àqueles estabelecidos no Quadro 1, pois encontram-se fora dos limites aceitáveis para uso em rebocos exteriores de edificações antigas. Apenas as argamassas de referência enquadram-se na faixa estabelecida por estas pesquisadoras.

Quadro 8: Resultados de comportamento à ação da água e mecânico das argamassas de estudo

Argamassa	Comportamento à ação da água				Comportamento mecânico (MPa)					
	Coeficiente de absorção capilar, entre 10 e 90 min ($\text{kg/m}^2\text{min}^{1/2}$)		Índice de vazios ou porosidade aberta (%)		Resistência à tração na flexão (R_t)		Resistência à compressão (R_c)		Módulo de Elasticidade (E)	
	28 d	90 d	28d	90 d	28 d	90 d	28 d	90 d	28 d	90 d
CA-1/3 Referência	1,2	1,1	22	19	0,2 (0,0)	0,8 (29,7)	0,5 (0,9)	1,2 (4,6)	1263 (3,2)	5008 (4,9)
50M - 1/3	1,7	2,0	27	26	0,5 (9,4)	0,4 (7,1)	2,2 (7,8)	1,2 (11,0)	2761 (8,6)	2000 (6,7)
50PC -1/3	2,2	2,2	23	24	0,2 (20,2)	0,4 (10,0)	0,5 (0,4)	0,7 (10,8)	3228 (14,9)	3356 (2,4)

As curvas de absorção capilar das argamassas estudadas são ilustradas na Figura 9. Observa-se que as argamassas com adições absorvem maiores quantidades de água no mesmo espaço de tempo em relação àquelas de referência, o que resulta em coeficientes de absorção capilar superiores. As formulações com metacaulim são mais porosas que as argamassas de cal, o que pode explicar as maiores quantidades de água absorvidas.

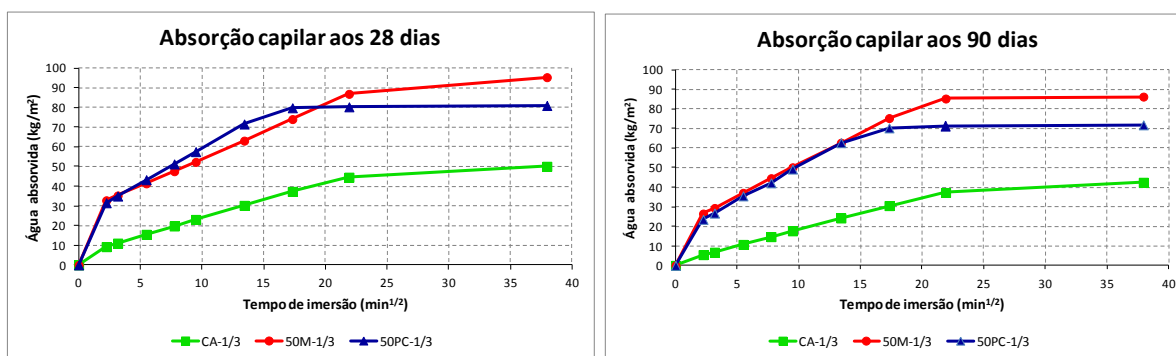


Figura 9: Absorção de água por capilaridade aos 28 e 90 dias

Diante do exposto, observa-se que as argamassas com adições apresentam melhor desempenho no que se refere às características mecânicas em relação às sem adição e este aspecto parece indicia-las como aptas para as intervenções de restauro em paredes antigas. No entanto, o mesmo não é observado em relação ao comportamento à ação da água. Neste caso, será importante obter dados em idades mais avançadas, em simultâneo com a avaliação da estrutura porosa das argamassas, uma vez que a formação de produtos de reação (silicatos, aluminatos e aluminosilicatos de cálcio hidratados) poderá introduzir alterações nas suas características.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As argamassas com adições apresentaram resultados de resistência mecânica compatíveis aos estabelecidos para intervenções restaurativas. No entanto, observou-se sua não adequação aos requisitos de comportamento à água. Embora a pesquisa efetuada tenha sido restrita para avaliar todos os aspectos relevantes de desempenho das argamassas objeto de estudo, forneceu informações importantes sobre as características físicas e pozolânicas das adições utilizadas e a influência destas nas composições de estudo.

Verificou-se que as formulações com adição de metacaulim e de pó cerâmico carecem ainda de análises para serem consideradas aptas à utilização em paredes antigas, uma vez que apresentam características de comportamento à ação da água que precisam ser ainda mais bem compreendidas para serem melhoradas.

A percentagem de adições e as condições de exposição das argamassas constituem alguns dos aspectos que poderão ter influência no desempenho, sendo importante a sua avaliação. Assim, sugere-se ajustar as formulações das argamassas estudadas, variando as proporções das adições. Devem ainda ser avaliados parâmetros a longo prazo e aspectos como coesão, permeabilidade ao vapor de água, aderência, retração e teor de sais solúveis, de modo a aferir a viabilidade de seu emprego ao fim a que se destinam, como uso em intervenções restaurativas.

O presente trabalho integra-se na pesquisa que está sendo desenvolvida no âmbito de tese de doutoramento sobre argamassas com adições pozolânicas destinadas ao uso no restauro, no qual está sendo feita avaliação do desempenho de composições a partir de experimentos práticos em laboratório e *in situ*.

REFERENCIAS

- [1] Moropoulou, A., Bakolas, A. y Anagnostopoulou, S., (2005), "Composite materials in ancient structures". *Cement and Concrete Composites*, 27, pp.295-300.
- [2] Ventolà, L.; Vendrell, M.; Giraldez, P.; Merino (2011), L. "Traditional organic additives improve lime mortars: New old materials for restoration and building natural stone fabrics". *Construction and Building Materials*, v. 25, n. 8, p. 3313-3318.
- [3] Santiago, C.C. (2007), "Argamassas históricas de cal". Salvador: Editora da Universidade Federal da Bahia (EDUFBA).
- [4] Malinowski, R. (1982), "Ancient mortars and concretes: aspects of their durability". In: *History of technology*. 7th Annual Volume, Marsell, UK. pp 89-101.
- [5] Papadakis, M.; Venuat, M. (1968), "Empleo en los cementos y hormigones". In: *Fabricacion, características y aplicaciones de los diversos tipos de cemento*. Barcelona: Técnicos Asociados, pp.170-171.
- [6] Velosa, A. (2006), "Argamassas de cal com pozolanas para revestimentos de paredes antigas". Tese de Doutorado apresentada na Universidade de Aveiro, Aveiro, jul.
- [7] Vitruvius. M.L. (1998), "Os dez livros de arquitetura". Tradução de Helena Rua. Lisboa: Instituto Superior Técnico.
- [8] Alberti, L.B. (2009), "Da Arquitetura". Organização e tradução de Sergio Romanelli (publicação original 1485). São Paulo: Hedra.
- [9] Cataneo, P. (1554). "I quattro primi libri di architettura". Venesa: Figliuoli di Aldo.
- [10] Martini, F.G. (1861). "Trattati di architettura civil militare di Francesco di Giorgio Martini architetto senese del secolo XV". Transcrição de Cavaliere Cesare Saluzzo (publicação original 1456). Torino, Italia: Tipografia Chirio e Mina.
- [11] D'Aviler, A.C. (1738), "Cours d'architecture: qui comprend les orders de Vignole, avec les commentaires, les figures & descriptions de ses plus beaux bâtimens, & ceux de Michel-Ange". (Publicação original 1699). Paris: Jean Mariette.
- [12] Lorient, Antoine-Joseph. (1774), "Mémoire sur une découverte importante dans l'art de bâtir faite par le Sr. Lorient, mécanicien dans lequel l'on rend publique, par ordre de sa majesté, la méthode de composer un ciment ou mortier propre à une infinité d'ouvrages, tant pour la construction que pour la decoration. Paris: L'Imprimerie Michel Lambert.

- [13] Milizia, F. (1785), "Principj di architettura civile". Tomo I e III. (Publicação original 1781). Bassano: Remondini di Venezia.
- [14] Belidor, B.F. (1832), "La scienza degli ingegneri nella direzione delle opere di fortificazione e d'architettura civile di Belidor". Tradução de Luigi Masiere (publicação original 1739). Mantova: Presso Fratelli Negretti.
- [15] Scamozzi, V. (1838), "L'idea della architettura universal". Tradução de Stefano Tisozi e Luigi Masieri (publicação original 1615). Milano: Borroni e Scotti.
- [16] Silva, V.S. (1999), "Argamassas de revestimento com o emprego de materiais pozolânicos". Dissertação de mestrado apresentada na Universidade de São Paulo, São Carlos.
- [17] Saad, M.N.A., Andrade, W.P., Paulon, V.A. (1983), "Propriedades do concreto massa contendo pozolana de argila". In: Colóquio Sobre Concreto Massa, São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 16 p.
- [18] Murat, M. (1983), "Hydration reaction and hardening of calcined clays and related minerals. Preliminary investigation on metakaolinite". Cement and Concrete Research, V. 13, pp. 259-266.
- [19] Caldarone, M. A., Gruber, K. A., Burg, R. G. (1994), "High-reactivity metakaolin: a new generation mineral admixture". Concrete International, V. 16, N. 11, November, pp. 37 – 40.
- [20] Zhang, M.H., Malhotra, V. M. (1995), "Characteristics of a thermally activated alumino-silicate pozzolanic material and its use in concrete". Cement and Concrete Research, V. 25, N. 8, pp. 1713-1725.
- [21] Souza, J.S.C. (2013), "Estudo de argamassa à base de cal e metacaulim para intervenções em revestimento das edificações históricas". Dissertação de mestrado apresentada na Universidade Federal de Pernambuco.
- [22] Japiassú, P. (2011), "Estudo do mecanismo de aderência de azulejos e argamassas de cal em revestimentos históricos". Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de Goiás.
- [23] Japiassú, P.; Carvalho, P. E. F.; Carasek, H.; Cascudo, O. (2013), "Argamassas com cal e metacaulim para a reabilitação de revestimentos de azulejo histórico". In: X Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas - X SBTA, 2013, Fortaleza: ANTAC - Associação Nacional do Ambiente Construído, v.1. pp. 1-16.
- [24] Veiga, M. R.; Carvalho, F. (2002), "Argamassas de Reboco para paredes de edifícios antigos: requisitos e características a respeitar". Lisboa: LNEC - Cadernos de Edifícios nº2 (p 39 - 54), outubro de 2002.
- [25] Veiga, M.(2013), "Argamassas de cal e metacaulino para revestimento de paredes antigas: características do revestimento aplicado". Seminário: Metacaulino em Portugal: Produção, Aplicação e Sustentabilidade. Universidade de Aveiro. Pg. 115.
- [26] Cerny, R., Kunca, A., Tydlitát, V., Drchalova, J., Rovnanikova, P. (2006), "Effect of pozzolanic admixtures on mechanical, thermal and hygric properties of lime plasters". Construction and Building Materials, 20(10), 849-857.
- [27] Fortes-Revilla, C., Martinez-Ramirez, S., Blanco-Varela, M. (2006), "Modelling of slaked lime-metakaolin mortar engineering characteristics in terms of process variables". Cement & Concrete Composites, 28(5), 458-467.
- [28] Vejmelkova, E., Keppert, M., Kerner, Z., Rovnanikova, P., Cerny, R. (2012), "Mechanical, fracture-mechanical, hydric, thermal, and durability properties of lime-metakaolin plasters for renovation of historical buildings". Construction and Building Materials, 31, 22-28.
- [29] Aggelakopoulou, E., Bakolas, A., Moropoulou, A. (2011), "Properties of lime-metakolin mortars for the restoration of historic masonries". Applied Clay Science, 53(1), 15-19.
- [30] Faria, P. (2004), "Argamassas de revestimentos para alvenarias antigas". Contribuição para o estudo da influência dos ligantes (Tese de Doutorado em Engenharia Civil). FCT-UNL. Almada.
- [31] VELOSA, A. (2006), "Argamassas de cal com pozolanas para revestimentos de paredes antigas". Universidade de Aveiro (Doutorado em Engenharia Civil), Aveiro, 2006.
- [32] Magalhães, A.C.; Muñoz, R.; Oliveira, M.M. (2013), "O uso da mistura de cal viva e cal extinta nas argamassas antigas: o método Lorient." I Congresso Internacional de História da Construção Luso-brasileira, Vitória do Espírito Santo, Brasil.
- [33] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. (2009), "NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação", Rio de Janeiro, 2009.
- [34] _____. (1987), "NBR 9776: Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman", Rio de Janeiro, 1987.
- [35] _____. (2001), "NM 23: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica", Norma Mercosul.

- [36] _____. (2010), "NBR 15894-1: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Parte 1: Requisitos", Rio de Janeiro.
- [37] Velosa, A., Rocha, F., Veiga, R. (2009), "Influence of chemical and mineralogical composition of metakaolin on mortar characteristics". *Acta Geodynamica Et Geomaterialia*, 6(1), 121-126.
- [38] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. (2016), "NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência". Rio de Janeiro.
- [39] _____. (2010), "NBR 15839: Argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos – Caracterização reológica pelo método squeeze-flow". Rio de Janeiro.
- [40] METZ, D. (2011), "Análise da influência da forma dos grãos nas propriedades das argamassas". São Leopoldo. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo.
- [41] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. (2005), "NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação de absorção de água por capilaridade", Rio de Janeiro.
- [42] _____. (2005), "NBR 9778: Argamassa e concretos endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica", Rio de Janeiro.
- [43] _____. (1997), "NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão", Rio de Janeiro.
- [44] _____. (2008), "NBR 15630: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica", Rio de Janeiro.
- [45] _____. (2014), "NBR 5752: Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias", Rio de Janeiro.
- [46] _____. (2010), "NBR 15894-1: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Parte 1: Requisitos", Rio de Janeiro.
- [47] _____. (1992), "NBR 5751: Materiais pozolânicos - Determinação de atividade pozolânica - Índice de atividade pozolânica com cal", Rio de Janeiro.
- [48] _____. (2010), "NBR 15895: Materiais Pozolânicos – determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado - Método Chappelle Modificado", Rio de Janeiro.
- [49] _____. (2012), "NBR NM18: Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo", Rio de Janeiro.
- [50] _____. (2014), "NBR 12653: Materiais Pozolânicos – Requisitos", Rio de Janeiro.
- [51] _____. (2010), "NBR 15894-2: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Parte 2: Determinação do índice de desempenho com cimento aos sete dias", Rio de Janeiro.