

Durabilidade de argamassas com adição de metacaulim para reforço de alvenaria

Durability of mortar with addition metakaolin of reinforcement for masonry

João Manoel Freitas Mota¹, Romilde Almeida de Oliveira²,
Arnaldo Manuel Pereira Carneiro³

¹Professor Doutor do IFPE, Rua Zenóbio Lins, 50 – CEP: 50711-300, (081) 996062907, Recife, PE
e-mail: mota.joaomanoel@gmail.com; ²Professor Doutor da UNICAP, Caio Pereira, 226, CEP: 52041-045, Recife, PE
e-mail: romildealmeida@gmail.com; ³Professor Doutor da UFPE, mpc@ufpe.br

RESUMO

Esta pesquisa tem como objetivo apresentar a contribuição da pozolana na durabilidade de argamassas armadas com adição de metacaulim utilizadas para reforço de alvenaria resistente. Sabe-se que, a partir da década de 1960, cerca de 6.000 edifícios foram erguidos com alvenaria de vedação tendo função estrutural na Região Metropolitana do Recife. Essas edificações populares são conhecidas como “prédio caixão” por ter formato de caixa devido ao posicionamento dos apartamentos nos quatro pavimentos, bem como mostram elevados índices de patologias e até acidentes com vítimas fatais. Em que pese o colapso das alvenarias de embasamento ser a causa principal, as alvenarias de elevação da superestrutura não apresentam fundamentação acerca da estabilidade, particularmente pelos blocos serem de vedação, o que conduz à insuficiência de suporte das cargas atuantes e ruptura brusca. Então, buscou-se estabelecer critérios para reforço com argamassa armada dentro da matriz que atendesse três condições imprescindíveis: (i) capacidade de suporte; (ii) ductilidade e (iii) durabilidade. Neste trabalho, são apresentadas conclusões sobre durabilidade, onde o arranjo experimental englobou a especificação de dois traços [(1:1:6:1,5 e 1:0,5:4,5:1,5) – cimento, cal, areia e relação água/cimento], com dois teores de adição (8% e 15%), sendo duas formas de adição (por substituição de parte de cimento e por adição pura). Foram realizados ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade, velocidade de propagação da onda ultrassônica, absorção de água por imersão e métodos acelerados de envelhecimento para avaliação de desempenho frente à carbonatação e cloretos, em corpos de prova de argamassas. Os resultados indicam que o metacaulim pode mitigar substancialmente a ação de agentes deletérios, especialmente nas amostras com adição pura de 15% e traço forte (1:0,5,4,5,1,5).

Palavras-chave: Alvenaria Resistente; Argamassa armada; Metacaulim.

ABSTRACT

The goal of this study was to discuss the contribution of pozzolan to the durability of reinforced mortars with addition of metakaolin used to strengthen non-load bearing walls. It is known that, from the 1960s, around 6,000 buildings have been erected with masonry sealing having structural function in the metropolitan region of Recife. These popular buildings are known as "box-type buildings" because they have the shape of a box due to the positioning of the apartments on four floors. They have high rates of pathologies and even fatal accidents. Despite the collapse of foundation walls, structural masonry has no substantiation regarding stability, particularly because the sealing blocks, which leads to insufficient support of the acting loads and sudden rupture. This way, we sought to establish criteria for strengthening with reinforced mortar within the matrix that meets three essential conditions: (i) support capacity; (ii) ductility and (iii) durability. In this work, we draw conclusions on durability, in which the experimental arrangement encompassed the specification of two proportions [(1:1:6:1.5 and 1:0.5:4.5:1.5)-cement, lime, sand, and water/cement ratio], with two contents of addition (8 and 15%) and two ways of addition (replacing part of the cement and with

no cement replacement). Tests of compressive strength, elasticity modulus, velocity of ultrasonic wave propagation, absorption of water by immersion, and accelerated aging methods were conducted to assess the performance regarding carbonation and chlorides in mortar specimens. The results indicate that the metakaolin can substantially mitigate the action of deleterious agents, especially the samples with no cement replacement and 15% whit proportions (1:0.5:4.5:1.5).

Keywords: Non-structural masonry; Reinforced mortar; Metakaolin.

1. INTRODUÇÃO

Diversos edifícios tipo “caixão” construídos na Região Metropolitana do Recife têm como estrutura as alvenarias de vedação. Esses prédios, cerca de seis mil catalogados, possuem paredes executadas com blocos de vedação, predominantemente cerâmicos, com furos na horizontal. Em poucos casos foram usados blocos de concreto, sendo ambos com espessura média de 9,0 cm e resistência à compressão na ordem de 2,0 MPa. Sabendo-se que a esbeltez para pé direito padrão 2,60 m é próxima de 30, implica numa redução adicional da capacidade de suporte das paredes, visto ser bem superior à aceitável em alvenaria estrutural, 20 [1].

Avaliando a relação entre o número de acidentes e o número de edificações existentes, estima-se a probabilidade de falha em aproximadamente 1:500, ou seja, bem acima do aceitável socialmente quando envolve a segurança de vidas humanas que é no máximo 1:10.000. Entretanto, vale destacar que construções com essas características, em sua maioria estão em serviço, sendo algumas com idade superior a 40 anos [2].

Portanto, foi desenvolvido um modelo de reforço com argamassa armada e adição de metacaulim (MC) para atender à necessidade de suporte de carga, ductilidade e durabilidade das paredes análogas às dos edifícios tipo “caixão”. Contudo, esse trabalho objetiva avaliar a influência do metacaulim na durabilidade das argamassas armadas usadas no reforço, fundamentalmente na mitigação da ação de agentes deletérios sobre as armaduras empregadas no interior da capa da argamassa. Pode-se dizer que a durabilidade desse reforço deriva da condição de empacotamento das argamassas (densificação e refinamento dos poros, devido reações pozolânicas), na medida em que as armaduras posicionadas em seu interior exercem ação fundamental na ductilidade, necessitando, por conseguinte, receber maior proteção possível dos agentes deletérios.

Diversos trabalhos científicos foram desenvolvidos para fundamentar exclusivamente o reforço de estruturas para elevar a capacidade de suporte, todavia, deve-se ressaltar a importância de se avaliar a durabilidade do reforço adotado. Assim, salienta-se a contribuição do metacaulim na durabilidade das argamassas empregadas no reforço, devido mitigarem a contaminação pela ação de cloretos em ambientes marinhos e o microclima de áreas urbanas (sulfato, CO₂ e outros).

Pozolana é definida como materiais silicosos ou silicoaluminosos que possuem pouca atividade aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença da água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente formando compostos com propriedades aglomerantes [3]. Quando é proveniente do caulim de alto índice de pureza, após o processo de calcinação e moagem das partículas, é gerada pozolana metacaulim com alta reatividade – MCAR [4].

Na formação química do metacaulim, as argilas caulínicas e o caulim quando submetidos a tratamento térmico, têm o seu arranjo atômico destruído devido à retirada dos íons de hidroxilas (Al₂O₃.2SiO₂). Esse processo químico pode ser representado da seguinte maneira [5]:



Os minerais do metacaulim consistem de placas contínuas em plano, sendo empilhadas na direção perpendicular, cujas espessuras das unidades são de aproximadamente 7,2 Å. Essas unidades são mantidas unidas por pontes de hidrogênio entre as camadas, de modo que o mineral não é disperso em água. Suas partículas são muito pequenas, com dimensões máximas laterais entre 0,3 µm e 4,0 µm e espessura entre 0,05 µm e 2 µm [6]. O metacaulim possui tamanho das partículas entre 0,2 a 15 µm e sua área específica encontra-se em valores maiores que 12.000 m²/Kg [7]. Já o MCAR apresenta área específica com valores até 60.000 m²/kg e suas partículas são lamelares. As figuras 1 (a) e 1 (b) apresentam aspectos morfológicos de uma partícula de metacaulim.

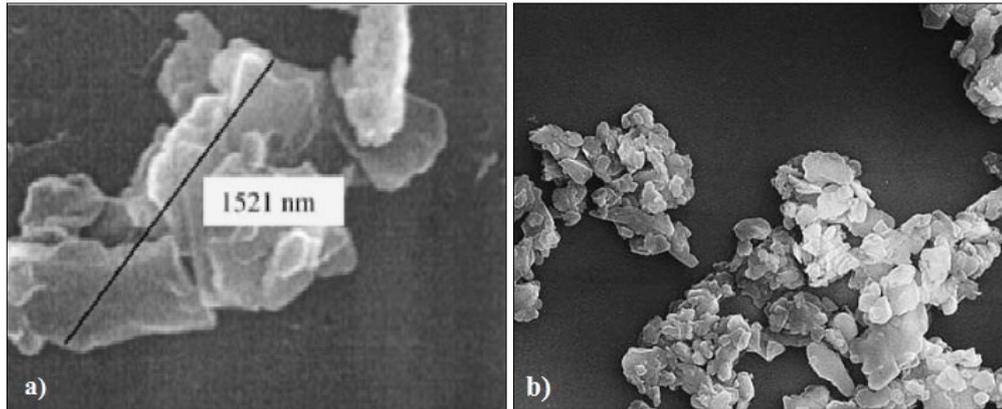


Figura 1: Micrografia: (a) partícula de metacaulim com 1521 nm e (b) partículas de metacaulim empilhadas [7].

Portanto, estruturas lamelares do MC têm forte ligação ao longo das camadas, todavia, as ligações entre camadas são brandas, gerando facilidade no escorregamento.

O uso criterioso do metacaulim e MCAR aumenta a resistência mecânica de materiais cuja matriz é cimentícia (argamassas e concretos). A dosagem ideal destas pozolanas, visando à máxima resistência mecânica, situa-se entre 6% e 15% em relação à quantidade em massa de cimento, entretanto, podem chegar até 50% em casos especiais, dependendo da aplicação e dos demais materiais utilizados na mistura [8].

A vida útil das argamassas e concretos depende da estrutura dos poros, fundamentalmente quando estão conectados (permeabilidade), que por sua vez pode mitigar a entrada de umidade, oxigênio, CO₂, sulfatos e cloretos (agentes nocivos), elevando a durabilidade do material [9].

Pesquisa avaliando propriedade mecânica em argamassas com e sem adição de pozolana, apresentou incremento na resistência de aderência à tração na família com substituição de 20% de cimento por sílica ativa (traço 1:1:6 - cimento, cal e areia em volume) em 45% aos 180 dias [10].

Argamassas para reforço com traço em massa 1:2,2 (cimento e areia) com adição de 15% de metacaulim em substituição de parte do cimento, apresentaram melhores resultados na proteção contra íons cloretos e carbonatação, bem como maior resistências à compressão, módulo de elasticidade e tração por compressão diametral, superando amostras sem adição e com sílica ativa na mesma proporção. Todavia, quanto à absorção por imersão, não se identificou diferenças significativas em relação às amostras sem adição [11].

Argamassas com metacaulim em substituição do cimento nas proporções de 0% (referência), 5%, 10% e 15%, sendo todas as famílias com traço 1:1:6:1,5 (cimento, cal, areia e relação água/cimento), apresentaram teor ideal 15%, uma vez que se verificaram melhores resultados mecânicos (resistência à compressão, tração por compressão diametral e resistência de aderência à tração) e os ensaios relacionados à durabilidade (absorção total e capilaridade) [12].

Estudo com quatro diferentes tipos de metacaulim e sílica ativa, em substituição de 15% da massa de cimento em argamassas de alto desempenho, revelaram a influência da finura da adição na resistência à compressão. Na Figura 2 verifica-se que nas idades iniciais, as argamassas contendo metacaulim com elevada superfície específica (1, 2 e 3), apresentaram valores de resistências superiores aos obtidos nas argamassas de referência e com sílica ativa. Entretanto, nas idades avançadas, as amostras com metacaulim e sílica ativa apresentaram valores de resistência similares [13].

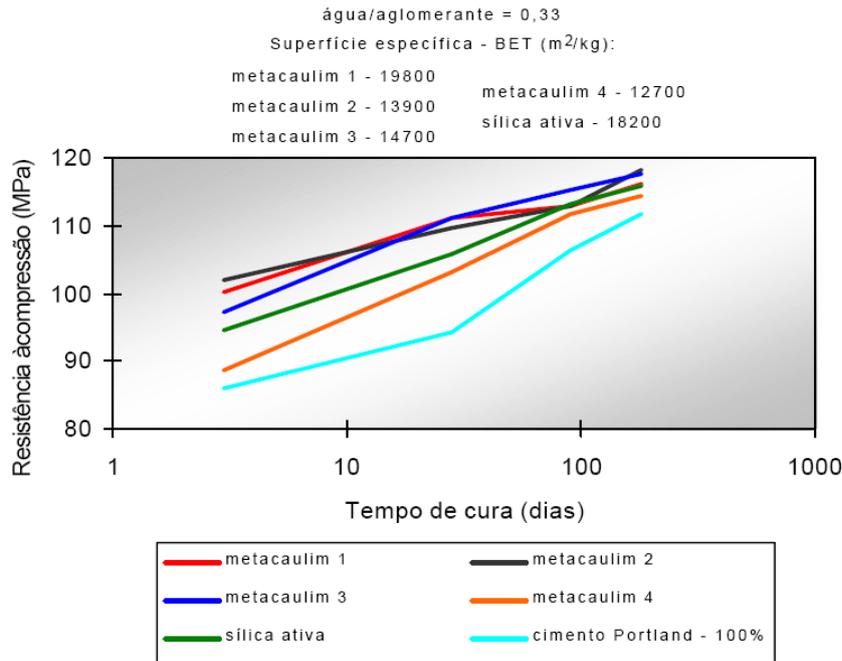


Figura 2: Resistência à compressão de argamassas com metacaulim e sílica ativa [13].

Concretos com adição por substituição de cimento nos teores de 8% de sílica e metacaulim, apresentaram elevação do módulo de elasticidade em até 15% na família com metacaulim. Pode-se atribuir esse fato às reações pozolânicas reduzirem a porosidade sensivelmente, tornando a matriz desses compósitos mais densos [14]. Sabe-se que o transporte de massa em materiais cimentícios (lixiviação, carbonatação, corrosão) reduz a vida útil, donde o tamanho, volume e continuidade dos poros implicam no maior ou menor meio para transporte de materiais na microestrutura.

Adição de pozolanas em materiais cimentícios (concretos e argamassas) provoca um maior adensamento da mistura devido refinamento dos poros (fenômeno físico), desde a interface devido ao efeito parede até a superfície [15]. Além desta condição, as adições, seja substituindo parte da massa de cimento ou como adição pura, contribuem com as argamassas e concretos devido ao hidróxido de cálcio do cimento reagir com a sílica da pozolana formando produtos como os silicatos de cálcio hidratados (fenômeno químico). Portanto, além de preencher vazios capilares, esses silicatos (C-S-H) favorecem a resistência da matriz cimentícia, dificultando ações de sulfatos, cloretos e reação álcali-agregado [16].

Verificou-se em concretos que a relação água/cimento com adição de metacaulim de alta reatividade (MCAR), influenciou na resistência à compressão em todos os teores de adição estudados (5%, 10%, 15% e 20%). Os resultados mais relevantes foram da família com relação a/c 0,25, com substituição do cimento em 20% aos 91 dias e traço 1:1,13:1,89 (cimento, areia e brita) [4]. O metacaulim da jazida do Norte do Vietnã mostrou maiores resultados nas resistências das argamassas com teores entre 20% e 25% por substituição de cimento aos 90 dias. Também ficou constatado que para famílias com maior relação água/aglomerantes, as maiores resistências só foram possíveis com maiores teores de adição [17]. Por sua vez, ainda avaliando ação da água em concretos, concluiu-se que, famílias com relação água/cimento 0,3 e 0,4 e substituição de cimento em massa por MCAR nos teores de 8% e 12%, foi reduzido o coeficiente de difusão de cloretos em 50% e 60%, respectivamente [18].

Estudo analisando absorção de água por imersão e capilaridade de concreto aos 28 dias com adição por substituição de parte do cimento por sílica e metacaulim, mostrou melhores resultados quando se utilizou na absorção por imersão 7% de sílica e 5% de sílica para absorção por capilaridade [19].

Argamassas com adição de metacaulim por substituição de cimento em teores de 10% e 15% apresentaram melhores resultados com relação à difusão de cloretos e degradação por sulfatos. Entretanto, avaliando a absorção por imersão, não foram verificados resultados satisfatórios das amostras com adição, identificando à argamassa de referência sem adição menor absorção, porém em valores similares [20].

Ademais, mesmo não sendo foco dessa pesquisa, vale citar concisamente alguns modelos de reforço

em alvenarias, a saber: (i) alvenaria de blocos cerâmicos estruturais danificados e reforçados com argamassa (2,5 cm de espessura) e tela de aço (cada 20 cm), elevou a resistência à compressão 2,9 vezes [21]; (ii) prismas de alvenaria reforçados de revestimento com 3,0 cm de espessura de argamassa armada (tela de aço), aumentaram a resistência à compressão em 335% quando comparados com prismas sem revestimento [22]; (iii) alvenarias de blocos cerâmicos reforçados com argamassa armada e adição de metacaulim, tiveram incremento na resistência mecânica em até 261%, bem como a armadura proporcionou ductilidade [23].

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Os materiais utilizados foram cimento CP II Z – 32 (massa específica 3,02 g/cm³; superfície específica blaine 3.640 cm²/g), cal tipo CH-I (densidade aparente 0,52 g/cm³), pozolana metacaulim HP ULTRA (51,57% de SiO₂; 40,5% de Al₂O₃; diâmetro médio das partículas 12,4 µm; massa unitária 600 kg/m³ e superfície específica – método BET 327.000 cm²/g [24]). O agregado miúdo foi areia natural de natureza quartzosa (módulo de finura 2,52, diâmetro máximo característico 2,4 mm e massa unitária 1,48 g/cm³).

2.2 Métodos

A Tabela 1 apresenta as argamassas utilizadas nesta pesquisa. Adotaram-se proporções {"N" - (1:1:6:1,5) e "S" - (1:0,5:4,5:1,5), cimento, cal, areia e relação água/cimento 1,5 [25]. Os teores de metacaulim foram 8% e 15%, nas condições de adição por substituição de parte do cimento e adição pura (sem retirar cimento).

Tabela 1: Amostra estudadas nos ensaios

TRAÇO MÉDIO – 1:1:6:1,5	TRAÇO FORTE – 1:0,5:4,5:1,5
0% Metacaulim	0 % Metacaulim
8% Substituição de parte do cimento	8% Substituição de parte do cimento
15% Substituição de parte do cimento	15% Substituição de parte do cimento
8% Adição em relação ao cimento	8% Adição em relação ao cimento
15% Adição em relação ao cimento	15% Adição em relação ao cimento

A relação água/cimento foi definida diante de várias tentativas, com a finalidade de se identificar a melhor trabalhabilidade, onde se estabeleceu uma matriz de consistência (espalhamento) 200 mm ± 20 mm como ideal para aplicação dos revestimentos argamassados estudados. Não houve a necessidade de aditivo tensoativo em nenhuma amostra. Moldaram-se corpos de prova de argamassa cilíndricos de 5 cm x 10 cm [26] para ensaiar: (a) resistência à compressão [27]; (b) módulo de elasticidade dinâmico [28]; (c) absorção de água por imersão [29]; (d) velocidade de propagação da onda ultrassônica [30] e métodos acelerados de envelhecimento para avaliação de desempenho - (e) carbonatação [31]; e (f) cloretos solúveis [32].

Os ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade e absorção ocorreram aos 90 (noventa) dias e demais ensaios aos 300 (trezentos) dias, sendo utilizados 12 réplicas por amostras para resistência à compressão, 6 para absorção total e módulo de elasticidade dinâmico, e, 3 para carbonatação e cloretos. O módulo de elasticidade dinâmico [28, 30], através do ultrassom alimentou a equação:

$$E_d = \rho \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} v^2 \quad (1)$$

Onde: E_d - módulo de elasticidade dinâmico; v - velocidade de propagação da onda (mm/µs); ρ - densidade de massa aparente (Kg/m³); ν - coeficiente de Poisson, este valor foi presumido constante para os diferentes tipos de argamassas e igual a 0,20.

A velocidade da onda indica para vazios internos, fissuras e falhas de adensamento, onde para concreto bem empacotado a velocidade é superior a 2.500 m/s. Contudo, a velocidade da propagação da onda em concreto armado devido ao aço é da ordem de 6.000 m/s [33].

Os corpos de prova de argamassas tiveram as seguintes condições de exposição à carbonatação: (a) maturação no interior do laboratório (10 meses, com média da temperatura 25,6 °C e umidade 81,5%); (b) condição anterior, acrescido de 24 horas de exposição em câmara de carbonatação; (c) condição anterior, acrescido de 72 horas de exposição em câmara. As leituras foram realizadas logo após aspersão de fenolftaleína.

Os corpos de prova de argamassas foram submetidos ao ataque de CO₂ em câmara de carbonatação com umidade, temperatura e concentração de CO₂ (66 ± 5)%; (25 ± 3)°C e (10 ± 2)%, respectivamente. Para determinação da frente de carbonatação seguiu-se o procedimento CPC-18, Rilem [31]. Foram medidas as profundidades de carbonatação com paquímetro, após a aspersão da solução de fenolftaleína sobre a superfície recém cortada com disco e máquina apropriada.

As figuras 3 (a) e 3 (b) apresentam, respectivamente, o corte e os corpos de prova após a retirada da câmara de carbonatação com aspersão de solução com fenolftaleína, sendo que os posicionados na parte superior referem-se ao traço 1:1:6 e na parte inferior ao traço 1:0,5:4,5. As figuras 4 (a) e 4 (b) apresentam a câmara de carbonatação e uma das leituras, respectivamente.



Figura 3(a): Corte do corpo de prova; (b) Corpos de prova depois de retirado da câmara de carbonatação com aspersão da solução de fenolftaleína [condição de exposição (c)].

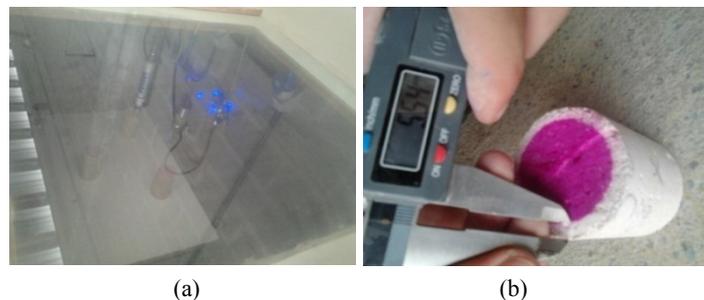


Figura 4(a): Câmara de carbonatação; (b): Leitura do corpo de prova do traço forte com 8% de substituição de parte do cimento [condição de exposição (b)].

Os cloretos apresentam-se de três formas em concretos e argamassas: (i) cloretos quimicamente ligados ao aluminato tricálcico (sal de Friedel); (ii) adsorvido na superfície dos poros; (iii) cloretos livres. Os cloretos livres são de fato deletérios, pois despavim as armaduras [34].

Adições minerais exercem papel fundamental na proteção contra ação de cloretos no interior dos poros, onde se pode dizer que a determinação dos teores de cloretos é importante por indicar a real condição de seu transporte no interior da argamassa [15].

As amostras das argamassas foram submetidas à câmara de cloretos por 192 horas. Utilizou-se cloreto de sódio PA (para análise, puríssimo) e água destilada no equipamento. A umidade, temperatura e concentração de cloretos (teor em relação à água destilada) foram (95 ± 4)%; (55 ± 5)°C e 5%, respectivamente. Essa operação teve injeção de pressão (1 bar) de ar comprimido para formação da névoa salina.

Após a retirada dos corpos de prova, utilizou-se nitrato prata para verificar a presença de cloretos livres, sendo identificada uma cor escurecida indicativa de cloretos. Posteriormente, efetuou-se coleta de pó em quantidade de 50 g com profundidade aproximada entre 1 cm e 2 cm em cada amostra, tendo em vista ser

esta região em que se encontram as armaduras no reforço estrutural das paredes. As figuras 5 (a) e (b) mostram, respectivamente, corpos de prova com nitrato de prata e em câmara de cloretos (foto durante o ensaio com a névoa salina). Por fim, determinou-se o teor de cloretos solúveis, em laboratório específico, por titulação potenciométrica usando eletrodo seletivo para cloretos [32].



Figura 5 (a): Corpos de prova no ensaio posterior a câmara de cloretos com aspersão de nitrato de prata (traço 1:1:6); (b): Câmara de cloretos com corpos de prova (aberta só para registro fotográfico).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 2 mostram os valores médios e desvio padrão da resistência à compressão dos corpos de prova das argamassas usadas para reforço.

Tabela 2: Resistência à compressão das argamassas para reforço

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO – [MÉDIA / SD - (MPa)]			
TRAÇO MÉDIO – 1:1:6:1,5		TRAÇO FORTE – 1:0,5:4,5:1,5	
0% metacaulim	7,53 / 0,24	0 % metacaulim	12,80 / 0,43
8% substituição de parte do cimento	7,31 / 0,31	8% substituição de parte do cimento	13,1 / 0,42
15% substituição de parte do cimento	8,70 / 0,26	15% substituição de parte do cimento	13,87 / 0,45
8% adição pura	8,97 / 0,29	8% adição pura	16,6 / 0,50
15% adição pura	10,43 / 0,34	15% adição pura	17,57 / 0,44

Verifica-se que a amostra com traço forte e adição pura de 8% e 15% de metacaulim apresentaram maiores resistências, indicando menor porosidade. Entretanto, o menor desempenho foi da amostra com substituição de 8% de parte do cimento por metacaulim no traço médio. Um aspecto importante identificado, foi a supremacia da amostra com adição pura frente à amostra com substituição de parte do cimento, para os dois traços estudados.

A Tabela 3 apresenta à média e desvio padrão dos módulos de elasticidade das argamassas usadas para reforço.

Tabela 3: Módulo de elasticidade dinâmico das argamassas para reforço

MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO [MÉDIA / SD - (GPa)]			
TRAÇO MÉDIO– 1:1:6:1,5		TRAÇO FORTE – 1:0,5:4,5:1,5	
0% metacaulim	10,22 / 0,44	0% metacaulim	13,03 / 0,48
8% substituição de parte do cimento	10,27 / 0,30	8% substituição de parte do cimento	12,75 / 0,49
15% substituição de parte do cimento	9,91 / 0,39	15% substituição de parte do cimento	11,99 / 0,47
8 % adição pura	11,89 / 0,41	8% adição pura	14,52 / 0,58
15% adição pura	12,58 / 0,39	15% adição pura	15,09 / 0,43

As amostras com adição pura tiveram resultados com tendência superior em relação às amostras sem adição e com adição por substituição de parte do cimento. A amostra com traço forte e 15% de adição pura apresentou maior resultado entre as argamassas estudadas. Assim, pode-se inferir acerca da relevância do refinamento dos poros, em vista do maior empacotamento da mistura propiciado pelo metacaulim.

A Figura 6 apresenta a velocidade de propagação linear da onda do ultrassom, onde seu crescimento aponta para a condição compacta do material. Identifica-se o crescimento em função do enriquecimento do traço e na direção da adição pura de 15%. Verifica-se que a argamassa com traço forte e adição pura com 15% de metacaulim pode ser classificada como “bom” por estar no intervalo de 3000 a 3500 m/s [35], sendo essa amostra com melhor resultado. As demais foram classificadas como “regulares” por estarem no intervalo 2000 a 3000 m/s.

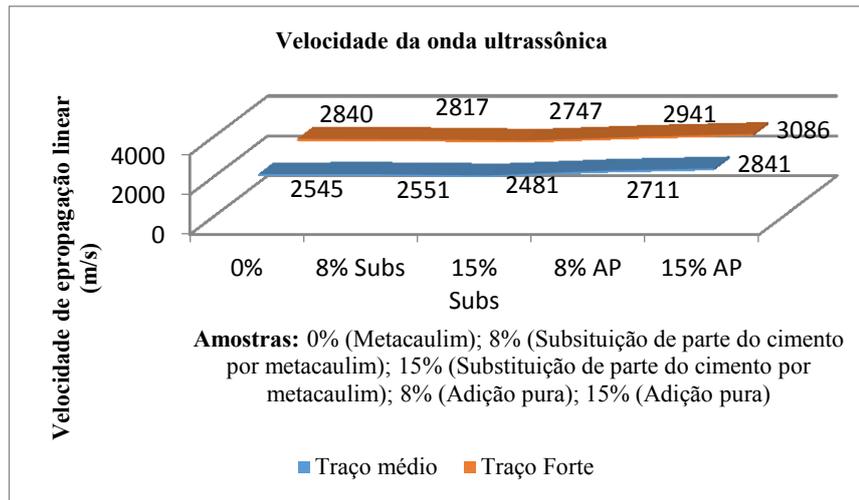


Figura 6: Velocidade da onda ultrassônica das argamassas para reforço.

Submeteram-se corpos de prova cilíndricos ao ensaio de absorção, onde os resultados de absorção por imersão mostraram que não existe um efeito considerável das adições (Tabela 4). Contudo, as amostras com adição pura de metacaulim mostram uma tênue melhora frente às amostras com metacaulim por substituição de parte do cimento e amostras de referência, denotando possivelmente uma tendência devido a relevância do cimento e o refinamento dos poros pelas reações pozolânicas.

Tabela 4: Absorção de água por imersão das amostras utilizadas para reforço

Absorção (%) – média / SD			
Traço – 1:1:6:1,5		Traço – 1:0,5:4,5:1:5	
0% metacaulim	10,46 / 0,18	0% metacaulim	9,86 / 0,13
8% substituição de parte do cimento	11,36 / 0,23	8% substituição de parte do cimento	10,86 / 0,16
15% substituição de parte do cimento	12,42 / 0,19	15% substituição de parte do cimento	11,07 / 0,14
8% adição	10,01 / 0,14	8% adição	9,67 / 0,13
15% adição	10,06 / 0,13	15% adição	9,58 / 0,13

As figuras 5 (a) e 5 (b) apresentam resultados de carbonatação das argamassas para reforço nos traços médio e forte, respectivamente, nas três condições de maturação.

Tabela 5 (a): Carbonatação das argamassas (traço médio) nas três condições de maturação

AMOSTRAS – TRAÇO MÉDIO (1:1:6:1,5)	CORTE DA SECCÃO TRANSVERSAL A SECO	CONDIÇÃO (A): Exposição natural de 10	CONDIÇÃO (B): Condição (A) +	CONDIÇÃO (C): Condição (B) +

		meses	exposição de 24h em câmara	exposição de 72h em câmara
		ESPESSURA CARBONATADA (mm) / SD		
0% Metacaulim	15 mm, 30 mm, 45 mm – do topo	5,48	7,00	14,00 / 1,08
8% Substituição de parte do cimento	15 mm, 30 mm, 45 mm – do topo	6,41	7,12	14,30 / 1,10
15% Substituição de parte do cimento	15 mm, 30 mm, 45 mm – do topo	8,45	9,53	14,20 / 1,10
8% Adição pura	15 mm, 30 mm, 45 mm – do topo	1,83	4,04	10,53 / 0,80
15% Adição pura	15 mm, 30 mm, 45 mm – do topo	1,6	3,89	9,82 / 0,75

Tabela 5 (b): Carbonatação das argamassas (traço forte) nas três condições de maturação

AMOSTRAS - TRAÇO FORTE (1:0.5:4,5:1.5)	CORTE DA SECCÃO TRANSVERSAL A SECO	CONDIÇÃO (A): Exposição natural de 10 meses	CONDIÇÃO (B): Condição (A) + exposição de 24h em câmara	CONDIÇÃO (C): Condição (B) + exposição de 72h em câmara
		ESPESSURA CARBONATADA (mm) / SD		
0% Metacaulim	15 mm, 30 mm, 45 mm – do topo	2,7	4,08	9,49 / 0,74
8% Substituição de parte do cimento	15 mm, 30 mm, 45 mm – do topo	4,85	5,54	9,64 / 0,74
15% Substituição de parte do cimento	15 mm, 30 mm, 45 mm – do topo	7,56	8,17	13,40 / 1,0
8% Adição pura	15 mm, 30 mm, 45 mm – do topo	4,45	4,94	9,08 / 0,70
15% Adição pura	15 mm, 30 mm, 45 mm – do topo	1,26	3,04	7,55 / 0,50

No traço forte a amostra com adição pura de 15% de metacaulim apresentou melhores resultados nas três condições de maturação em relação às outras argamassas estudadas. Contudo, amostras com substituição de parte do cimento e adição pura de 8 %, tiveram resultados de profundidade da frente de carbonatação similares e até inferior à da amostra sem adição, mostrando que para determinados teores, as adições minerais podem não reduzir a carbonatação.

Não se pode desconsiderar a elevada importância do cimento, todavia, a substituição de parte do cimento por pozolanas poderá incrementar propriedades mecânicas, mas não necessariamente as relacionadas com a durabilidade, mesmo sabendo que existe uma relação íntima entre elas.

Por sua vez, as amostras com adição pura de metacaulim em ambos os traços apresentaram desempenho superiores frente à carbonatação. Ocorre que, tudo deriva da natureza química e mineralógica da adição, da atividade pozolânica e finura, ou seja, do potencial de alterar física e quimicamente a pasta de cimento.

Para os teores propostos de adição pura, a condição de consumo da “reserva” alcalina pela sílica da pozolana, não sobressaiu aos benefícios dessas adições à matriz cimentícia. Todavia, quando se substituiu pozolana por parte de cimento, tende-se a elevar a carbonatação pela redução da alcalinidade.

Portanto, todas amostras com maior grau de maturação (condição c), ficaram classificadas como condição de carbonatação “média”. Entretanto na condição intermediária de maturação (b), todas as amostras com adição pura (traços médio e forte) e sem adição no traço forte são classificadas como “baixa” condição de carbonatação, tendo em vista classificação limites quanto à profundidade de carbonatação: baixa < 5 mm; média 5 até 15 mm; alta > 15 mm [36]. Assim, as amostras com substituição de parte do cimento, não tiveram desempenho significativo no combate à carbonatação.

A Tabela 6 apresenta os resultados do ensaio de cloretos solúveis [32].

Tabela 6: Resultados do teor de cloretos (Cl / SD)

TRAÇO – 1:1:6:1.5		TRAÇO – 1:0.5:4.5:1:5	
0% metacaulim	0,5178 / 0,039	0% metacaulim	0,3950 / 0,0311
8% substituição de parte do cimento	0,4763 / 0,047	8% substituição de parte do cimento	0,5202 / 0,0466
15% substituição de parte do cimento	0,6064 / 0,0366	15% substituição de parte do cimento	0,5956 / 0,0410
8% adição pura	0,2971 / 0,0121	8% adição pura	0,2616 / 0,0116
15% adição pura	0,2520 / 0,0225	15% adição pura	0,2171 / 0,0201

Verifica-se que a amostra com 15% de metacaulim por adição pura no traço forte, apresentou redução substancial de cloretos livres em comparação as demais amostras. Entretanto, amostras com substituição de parte do cimento apresentaram maiores concentração de cloretos, inclusive em relação até as amostras sem adição.

4. CONCLUSÕES

Em todos os ensaios relacionados com a durabilidade (absorção, velocidade de propagação da onda ultrassônica, carbonatação e cloretos), bem como o de resistência à compressão e módulo de elasticidade (devido o refinamento dos poros), verificou-se que a argamassa com adição pura de metacaulim, apresenta melhor condição para diminuir ações de agentes deletérios.

Portanto, em que pese à amostra com 8% de adição pura ter apresentado resultados satisfatórios, pode-se verificar que a amostra com traço “forte” e 15% de adição pura de metacaulim sobressaiu, em geral, diante das demais amostras em todos os ensaios, podendo-se tecer algumas considerações, a saber:

- (a) maior resistência a compressão e módulo de elasticidade, indicando menor porosidade;
- (b) maior velocidade da onda ultrassônica, sendo classificada como “bom”, denotando satisfatória compacidade da amostra;
- (c) menor espessura carbonatada, classificada como “média” na condição de maturação mais severa, sendo interessante condição de proteção em centros urbanos;
- (d) menor teor de cloretos solúveis na espessura de 1 cm a 2 cm da superfície dos corpos de prova, importante para regiões em áreas marinhas.

O ensaio de absorção de água por imersão não mostrou diferença significativa entre as amostras de referência e com adição pura. As amostras com adição por substituição de parte do cimento apresentam resultados mais desfavoráveis.

Ressalta-se ainda que, a substituição de parte do cimento por metacaulim ficou, em geral, aquém das amostras com adição pura (sem retirar parte do cimento), e próximo as amostras de referência, caracterizando a importância dos aglomerantes. Esta tendência pode ser ressaltada nos dois teores estudados (8% e 15%).

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] MOTA, J.M.F., ARAÚJO G., OLIVEIRA, R., “Influência da argamassa de revestimento na resistência à compressão axial em prismas de alvenaria resistente de blocos cerâmicos”, In: *Anais das XXXII Jornadas Sulamericanas de Engenharia Estrutural*, Campinas-SP, 2006.
- [2] MOTA, J.M.F., OLIVEIRA, R. “Formas de ruptura em prismas de alvenaria Resistente de blocos cerâmicos”, In: *Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas, II*, Rio de Janeiro, 2007.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12653 - Materiais Pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2015.
- [4] SOUZA, P.S.L., *Verificação da influência do uso de metacaulim de alta reatividade nas propriedades mecânicas do concreto de alta resistência*, Tese de D.Sc., UFRGS. Porto Alegre, Brasil, 2003.
- [5] CHRISTÓFOLLI, J.L., *Estudo de argilas calcinadas para produção de cimento Portland pozolânico na região de Curitiba, Paraná – Brasil*, Dissertação de M.Sc., UFPR. Curitiba, Brasil, 2010.
- [6] MURAT, M., “Hydratation reaction and hardening of calcined clays and related minerals”, *Preliminary investigation on metakaolinite. Cement and Concrete Research*, v.15, n.2, 261-268, 1983.

- [7] NITA, C., JOHN, V.M., *Materiais pozolânicos: o metacaulim e a sílica ativa*, Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- [8] MALHOTRA, V.M., MEHTA, P.K., “Pozzolanic and cementitious materials”, 1ed. Amsterdam, Advances in Concrete Technology, 1996.
- [9] MEHTA, P.K., MONTEIRO, P.J.M., “Concreto: estrutura, propriedades e materiais”, São Paulo, Ibracon, 2008.
- [10] TAHA, M.M.R., SHRIVE, N.G., “The use of pozzolans to improve bond and bond strength”, In: Canadian masonry Symposium, 9th, Canada, 2001.
- [11] GALVÃO, S.P., *Avaliação do desempenho de argamassa de reparo estrutural à base de cimento Portland modificadas por polímero e contendo adições*, Dissertação de M.Sc., UFG, Goiana, Brasil, 2004.
- [12] MOTA, J.M.F., CARASEK, H., COSTA E SILVA, A.J., *et al.*, “Argamassas inorgânicas com adição de metacaulim.” In: *XI SBTA – Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassa*, Belo Horizonte, MG, 2011.
- [13] CURCIO, F., De ANGELIS, B.A., PAGLIOLICO, S., “Metakaolin as a pozzolanic microfiller for high-performance mortars”, *Cement and Concrete Research*, v.28, 803-809, 1998.
- [14] LACERDA, C.S., HELENE, P.R.L., *Estudo da influência da substituição de cimento Portland por metacaulim em concretos*, Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- [15] NEVILLE, A. M., *Propriedades do concreto*, 2 ed., Pini, São Paulo, 1997.
- [16] MEHTA, P.K., MONTEIRO, P.J.M., *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*, Pini, São Paulo, 1994.
- [17] VU, D.D., STROEVEN, P., “Strength and durability aspects of calcined kaolin-blended Portland cement mortar and concrete”, *Cement & Concrete Composites*, pp. 471-478, v. 23, 2001.
- [18] GRUBER, K.A., RAMLOCHAN, T., BODDY, A., HOOTON, R.D., THOMAS, M.D.A., “Increasing concrete durability with high-reactivity metakaolin”, *Cement and Concrete Research*, pp. 479-484, v. 23, 2001.
- [19] ALMEIDA, K. S., CHAVES, S. M. S., MORAIS NETO, D. P., *et al.*, “Comparative Analysis of the Protective Capacity of Pozzolanic Mineral Admixtures and Water Absorption”, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, v. 20, pp. 1509-1522, 2015.
- [20] COURARD, L., DARIMONT, A., SCHOUTERDEN, M., *et al.*, “Durability of mortars modified with metakaolin”, *Cement and Concrete Research*, pp. 1473-1479, v. 33, 2003.
- [21] JABAROV, M. *et al.* Strengthening of damaged masonry by reinforced mortar layers, *World Conference on Earthquake Engineering*, v.15, 1985.
- [22] SILVA, F. A. N., OLIVEIRA, R. A., PIRES SOBRINHO, C. W. “Influência do revestimento na resistência de paredes de alvenaria resistente de blocos cerâmicos”, In: *Jornadas Sulamericanas de Engenharia Estrutural, XXXIII*, Santiago, Chile, ASAAE, 2008.
- [23] MOTA, J. M. F. *Reforço de alvenaria resistente com argamassa armada e adição de metacaulim.*, Tese de D.Sc., Universidade Federal de Pernambuco, UFPE, Recife, Brasil, 2015.
- [24] HELENE, P. R. L., MEDEIROS, M. H. F. *Estudo da Influência do metacaulim HP como adição de alta eficiência em concretos de cimento Portland*, São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Maio, 2004.
- [25] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 270 – Standard specification for mortar for unit masonry, 1982.
- [26] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13749 - Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Especificação. Rio de Janeiro, 2013.
- [27] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13279 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à compressão, Rio de Janeiro, 2005.
- [28] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15630 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2008.

- [29] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778 - Argamassas e concretos endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.
- [30] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8802 – Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica, Rio de Janeiro, 2013.
- [31] REUNIÓN INTERNACIONALE DES LABORATOIRES D’ESSAIS ET THE RECHERCHES SUR LES MATERIAUX ET LES CONSTRUCCIONS – RILEM, Measurement of hardened concrete carbonation depth, RILEM Recommendation CPC – 18, Materials and Structures, 1988.
- [32] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C1152 - Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete, 2012.
- [33] HELENE, P., REPETTE, W.I., “Metodologia e recursos para avaliação de estruturas de concreto. In. Simpósio sobre patologia das edificações: prevenção e recuperação”, Anais, UFRGS, Porto Alegre, Brasil, 1989.
- [34] CASCUDO, O. *O Controle da Corrosão de Armaduras em Concreto: Inspeção e Técnicas Eletroquímicas.*, 1. ed., São Paulo, PINI, 1997.
- [35] WHITEHURST, E.A., “Evaluation of concrete properties from sonic tests”, Detroit, *American Concrete Institute*, 1966.
- [36] MEDEIROS, M.H.F., *Estruturas de concreto com corrosão de armaduras por carbonatação: Comparação de argamassas de reparo quanto à proteção do aço*, Dissertação de M.Sc., USP, São Paulo, Brasil, 2002.