

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE METODOLOGIA DE ENSAIO ACELERADO DE EXPOSIÇÃO À CHUVAS DIRIGIDAS

MARIA L. S. REZENDE^{1*}, AIRES CAMÕES², RUTE EIRES², CARLOS JESUS²

1: UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE – CCT - UAEP
Rua Aprígio Velozo, 882, Bairro Universitário, Campina Grande, PB CEP 58429 900
marialuiza.rezende@ufcg.edu.br

2: UNIVERSIDADE DO MINHO – CTAC, Departamento de Engenharia Civil
4800-058 Guimarães, Portugal
d1816@civil.uminho.pt; rute@civil.uminho.pt; cjesus@civil.uminho.pt

Palavras-chave: Durabilidade, Alvenarias, Blocos Pré-moldados, Metacaulim

Resumo *A sustentabilidade de um material está relacionada diretamente a sua durabilidade, pois, quanto maior a vida útil de um produto, menor será a necessidade de sua reposição como um todo ou de seus elementos constituintes. Entretanto, a durabilidade não é uma propriedade restrita ao material e irá depender, principalmente, da sua interação com o ambiente que o cerca, sendo de extrema importância o conhecimento dos agentes de degradação a que estará submetido quando em condições de uso. Nesse contexto, a chuva dirigida, chuva associada à velocidade do vento, é considerada um dos fatores de maior degradação em vedações externas, podendo acarretar à edificação desde problemas estéticos causados pela infiltração de umidade até a decomposição dos materiais que compõem as fachadas e alvenarias. Testes experimentais acelerados, propostos por normas internacionais, objetivam avaliar a erodibilidade em construções de terra quando expostas à chuva, porém, em virtude das recentes pesquisas abordando a utilização de resíduos e aditivos na produção de elementos para alvenarias, se faz necessária a adaptação de metodologias para a avaliação desses novos materiais.*

Neste documento é relatada uma pesquisa experimental objetivando analisar a influência do metacaulim na durabilidade de blocos vazados de concreto para alvenarias, sendo esta avaliada por meio de ensaio acelerado de exposição à chuvas. De acordo com a metodologia do ensaio, duas horas de exposição permitem avaliar a erosão pluvial ocorrida em 50 anos, considerando os parâmetros climatológicos mais agressivos de Portugal (localidade de Penhas Douradas) sendo a erodibilidade, medida pela perda de massa ocorrida durante o ensaio, utilizada como parâmetro de resposta. O teor de cimento nas misturas foi de 12% e o metacaulim foi utilizado em substituição parcial à massa do cimento nos percentuais de 10% e 15%. Corpos de prova prismáticos foram submetidos ao ensaio aos 56 dias de cura, quando também foram realizadas análises termogravimétricas (TGA) para investigação das alterações químicas decorrentes da adição do metacaulim. Os melhores resultados foram obtidos para as misturas com 15% de metacaulim, cujos corpos de prova apresentaram perda de massa 23% inferior aos corpos de prova de referência, sem metacaulim, apresentando também menor ocorrência de carbonatação, o que foi comprovado por meio das análises termogravimétricas. Os baixos valores de perda de massa (<1%) para todas as misturas demonstraram que, para o estudo de durabilidade de concretos expostos à ação de chuvas, a erodibilidade, associada ao ensaio de chuva dirigida utilizado, não pode ser considerada como parâmetro de resposta. Concluiu-se também que, a secagem em estufa (100±5° C) para obtenção dos valores de massa seca, pode promover maior carbonatação devendo todas as amostras, ensaiadas ou não, permanecer por igual período de tempo em estufa.

1. INTRODUÇÃO

Em sólidos porosos, a permeabilidade à água é habitualmente fator determinante na taxa de deterioração, causando os principais problemas ligados à durabilidade do concreto e argamassas [1]. A hidrólise dos componentes ocorre quando, sob efeito de água corrente, a solução de contato é diluída e o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) é retirado por lixiviação, facilitando a invasão de íons de sulfato e a produção de reagentes para formação de produtos expansivos [2]. A ação lixiviadora da chuva, têm-se o agravante de que o CO_2 , presente na atmosfera, solubiliza quando em contato com a água da chuva tornando-a essencialmente ácido carbônico, o que pode intensificar a carbonatação em argamassas e concretos [2-3-4]. A carbonatação não é uma reação deletéria ao concreto sem armadura, podendo, inclusive, reduzir a permeabilidade e aumentar a resistência mecânica [5] devido ao preenchimento dos poros por CaCO_3 , porém, as microfissuras resultantes da retração de volume pela dissolução do ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) podem aumentar a frente de carbonatação, interferindo assim na durabilidade do concreto. As alvenarias são suscetíveis a problemas causados por águas de origens diversas, como a infiltração da água do solo por capilaridade, a lavagem para manutenção e por chuva nas vedações externas, sendo que esta última pode representar entre 40 a 70% dos casos de degradação em fachadas [6]. Nesse contexto, a chuva dirigida, chuva associada à velocidade do vento, é considerada um dos fatores de maior degradação em vedações externas, podendo acarretar à edificação desde problemas estéticos causados pela infiltração de umidade até a decomposição dos materiais que compõem as fachadas e alvenarias.

Testes experimentais acelerados, propostos por normas internacionais, objetivam avaliar a erodibilidade em construções de terra quando expostas à chuva, entretanto, os parâmetros utilizados são específicos para o país ou região em que são adotados, dificultando assim relacioná-los a determinada precipitação ou intensidade, pois, excetuando-se a o teste preconizado pela norma IS 1725 [7], não são disponibilizados dados de caracterização da precipitação [8]. Em pesquisa anterior, Rezende *et al.* [8], propuseram uma metodologia de teste acelerado de exposição à chuvas considerando os parâmetros climatológicos mais agressivos de Portugal (localidade de Penhas Douradas), concluindo que o teste se mostrou eficiente em simular a energia cinética de chuvas incidentes em vedações verticais externas, sendo possível acelerar a erosão ocorrida durante 50 anos de exposição em duas horas de teste, tendo em vista que o potencial erosivo da chuva é medido pela energia cinética.

O metacaulim é um produto obtido mediante a ativação de caulins de alta pureza, resultando em um silicato desidroxilado, de estrutura amorfa. Quando utilizado em substituição parcial ao cimento Portland, reage quimicamente com o ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) liberado durante o processo de hidratação deste e que pode atingir 28% da massa do cimento [9], formando silicatos, silicoaluminatos e aluminatos de cálcio hidratados adicionais. Logo, é esperado que o uso de pozolanas, não só melhore as propriedades físico-mecânicas do concreto como também aumente a sua durabilidade.

Neste documento é relatada uma pesquisa experimental, desenvolvida no Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, sobre a influência do metacaulim nas propriedades físico-mecânicas e na durabilidade de concretos destinados à produção de blocos vazados para alvenarias, sendo esta avaliada por meio de ensaio acelerado de exposição a chuvas.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1. Materiais

Foram utilizados, metacaulim tipo PeserN (Tabela 1) e cimento Portland CEM I 42.5R (Tabela 2). As curvas de distribuição granulométrica do cimento e do metacaulim estão representadas na figura 1.

Tabela 1. Dados de caracterização do metacaulim.

Composição Química (%)		Ensaio Físico	
SiO ₂	54.71	Massa Específica (g.cm ⁻³)	2.5 - 2.6
Al ₂ O ₃	39.37	Superfície Específica – Blaine (cm ² .g ⁻¹)	10150
Fe ₂ O ₃	1.36	Granulometria – Diâmetro médio das partículas D ₅₀ (µm)	5
CaO	0.12	Pozolanicidade (Ensaio Chapelle) g Ca(OH) ₂ .g ⁻¹	983
MgO	< 0.10	Densidade aparente (kg.m ⁻³)	Aerada 550
TiO ₂	2.77		Compactada 750
K ₂ O	< 0.10	Ensaio Mecânico	
PF	<1.50	Índice de Atividade Pozolânica aos 28 dias (%)	117.0

Como pode ser observado na Tabela 1, os teores de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ atendem aos limites recomendados pela ASTM C 618 [10] e NBR 15894 [11] para materiais pozolânicos e metacaulim de alta reatividade. A pozolanicidade apresenta valor superior a 700gCa(OH)₂/g, limite mínimo recomendado pela norma NFP 18-513 [12]. Os valores de diâmetro médio de partículas e superfície específica estão compatíveis com os recomendados por Souza e Dal Molin [13] para metacaulim de alta reatividade.

Tabela 2. Dados de caracterização do cimento Portland CEM I 42.5R.

Composição Química (%)		Ensaio Físico	
SiO ₂	17.85	Massa Específica (g.cm ⁻³)	3.13
Al ₂ O ₃	4.15	Superfície Específica – Blaine (cm ² .g ⁻¹)	4133
Fe ₂ O ₃	3.71	Resíduo de Peneiração > 45µm (%)	3.02
CaO	65.06	Exigência de água (%)	29.1
MgO	1.85	Tempo de Pega(min)	Início 178
SO ₃	3.44		Fim 232
K ₂ O	0.91	Expansibilidade (mm)	1.06
Na ₂ O	0.28	Ensaio Mecânico	
PF ^a	2.15	Resistência à Compressão – 2 dias (MPa)	34.0
RI ^b	0.99	Resistência à Compressão – 7 dias (MPa)	46.1

^a – Perda ao Fogo; ^b – Resíduo Insolúvel

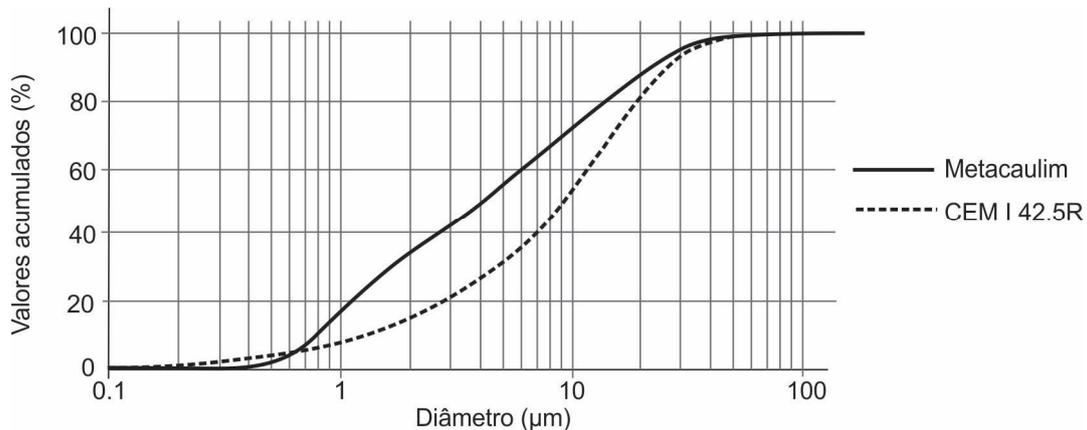


Figura 1. Curva de distribuição granulométrica do cimento e do metacaulim.

Verifica-se, ao comparar as curvas representadas na Figura 1, que o metacaulim apresenta maior

quantidade de finos que o cimento e maior superfície específica (Tabela 1), características estas diretamente relacionadas à reatividade de uma pozolana nas primeiras idades de hidratação do cimento e, por conseguinte, no desenvolvimento das resistências do concreto, em idades posteriores, a atividade pozolânica está relacionada aos teores de sílica e alumina reativa [1].

Como agregados foram utilizados pedra britada de origem granítica, areia quartzosa e pó de pedra na proporção de 37%, 40% e 23%, baseada no menor índice de vazios e maior massa unitária, sendo respeitado o limite máximo de dimensão de agregado recomendado pela NBR 6136 [14] de metade da menor espessura de parede do bloco (12.5 mm).

2.2. Detalhamento das misturas e moldagem dos corpos de prova

O teor de cimento nas misturas foi de 12% e o metacaulim (Mk) foi utilizado em substituição parcial à massa do cimento nos percentuais de 10% e 15%, sendo os concretos sem metacaulim utilizados como referência para comparação dos resultados. As quantidades dos materiais utilizados nas misturas estão detalhadas na Tabela 3. Visando obter a compactação utilizada na indústria de blocos, foram utilizados moldes cúbicos metálicos (150 mm de aresta) e uma peça de encaixe em poliamida 6, a qual permitiu a compactação até a densidade desejada, determinada em pesquisa anterior [15] a partir de blocos recém-moldados por vibroprensagem em fábrica, obtendo-se assim corpos de prova prismáticos com 150 x 150mm² de base e 75mm de altura. Para a compactação na moldagem e execução dos ensaios de resistência à compactação, foi utilizada uma prensa hidráulica automática ELE, modelo Autotest 2000, com capacidade de 1500 kN.

Tabela 3. Quantidade de material utilizado nas misturas (kg.m⁻³) de concreto).

Mistura	Cimento (kg)	Mk*		Brita (kg)	Areia (kg)	Pó de Pedra (kg)	Fator A/(C+Mk)**
		(%)	(kg)				
A	266	0	0	820	887	510	0.56
B	239	10	27	820	887	510	0.57
C	226	15	40	820	887	510	0.58

* Metacaulim; **Cimento+Metacaulim

Após a colocação do material no molde, foi aplicada uma carga de compressão de 45±0.5 kN (taxa de carga 0.5 kN/seg) de forma simultânea, na base do molde e no topo da peça de encaixe, tendo sido este valor determinado experimentalmente em função da densidade a ser obtida. Na Figura 2 está ilustrada a sequência de etapas de moldagem.



Figura 2. Sequência das etapas de moldagem.

Após desmoldados, os corpos de prova foram embalados individualmente em filme de PVC, com o objetivo de evitar a perda de água por evaporação e também a ocorrência de carbonatação durante o período de cura, realizada em condições de ambiente do laboratório (21° C e UR 81%), sendo os ensaios realizados aos 14, 28 e 56 dias de cura. Para os ensaios de resistência à compressão, absorção de água por imersão e por capilaridade, os corpos de prova foram posicionados tomando-se

por base uma das faces de 75 x 150 mm² e, para o ensaio de durabilidade à chuvas dirigidas, foi tomada por base uma das faces de 150 x 150 mm², visando com isto maximizar a área de exposição.

2.3. Metodologia de ensaios

Apesar das resistências à compressão em idades iniciais e aos 28 dias serem as principais características exigidas pela indústria de pré-moldados [16], a porosidade e a permeabilidade à água, são de fundamental importância para a caracterização do desempenho mecânico e durabilidade. Portanto, aos ensaios de resistência à compressão, foram acrescentados os ensaios de absorção por capilaridade e por imersão, os quais foram realizados de acordo com as normas NP EN 12350-3 [17], LNEC E 393 [18] e LNEC E 394 [19], respectivamente. Todos os ensaios foram realizados com três repetições, sendo a média dos resultados comparados aos obtidos para o concreto de referência, sem metacaulim.

A durabilidade foi avaliada por meio de ensaio acelerado de exposição a chuvas (Figura 3), utilizando-se a metodologia proposta por Rezende *et al.* [8]. Segundo os autores, duas horas de ensaio permitem avaliar a erosão pluvial ocorrida em alvenarias externas durante 50 anos exposição, considerando os parâmetros climatológicos mais agressivos de Portugal (região de Penhas Douradas).



Figura 3. Teste acelerado de exposição a chuvas.

Aos 56 dias de cura, os corpos de prova, após secagem em estufa (100±5° C) até a constância de massa, foram expostos a um jato de água (pH=7.3), cônico e cheio, com vazão de 14.26 litros.min⁻¹ e pressão de saída de 45 kPa. Considerou-se a massa constante quando duas pesagens consecutivas, efetuadas em um intervalo de 24 horas, apresentaram diferença igual ou inferior a 0,5%. O valor da vazão foi calculado em função do índice de chuvas dirigidas no local de Penhas Douradas, Portugal, e o tempo de exposição (2 horas) considerando-se 50 anos de precipitação média anual neste local (1715 mm). O corpo de prova foi posicionado a uma distância de 0.32 m do bico de saída do jato, em uma plataforma inclinada 30° em relação à horizontal.

Após o ensaio, foi aferida a massa úmida do corpo de prova e repetido o procedimento de secagem, sendo então calculada a perda de massa decorrente da degradação. A diferença entre a massa seca e a massa úmida foi considerada como absorção por chuvas (Eq. 1) e a diferença entre as massas secas, como desgaste por erosão (Eq. 2), sendo também comparadas as resistências à compressão antes e ao final do teste.

$$Ab_{ch} = (m_u - m_{sf}) \cdot m_u^{-1} \cdot 100 \quad (1)$$

$$D_e = (m_{si} - m_{sf}) \cdot m_{si}^{-1} \cdot 100 \quad (2)$$

Onde: Ab_{ch} = absorção por chuvas,
 D_e = desgaste por erosão,
 m_{si} = massa seca inicial,
 m_{sf} = massa seca final e
 m_u = massa úmida.

Análises termogravimétricas (TGA) foram realizadas para investigação das alterações químicas decorrentes da adição do metacaulim (redução do CaO e aumento nos produtos da hidratação do cimento) e a relação destas com os resultados obtidos nos ensaios físicos e mecânicos. Para a execução de tais análises, foi utilizado o equipamento modelo SDT 2960 V3.0F, fabricante TA Instruments, sendo a taxa de elevação de temperatura constante de 10°C.min⁻¹ até 1000°C e o fluxo de ar de 100mL.min⁻¹. As amostras foram coletadas dos corpos de prova rompidos durante o ensaio de compressão, após o qual, o material foi cominuído (fração <0.075mm) e quarteado para melhor representatividade.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Propriedades físicas e mecânicas

Na Tabela 4 estão descritos os resultados encontrados para os ensaios de resistência à compressão e absorção por imersão.

Tabela 4. Resultados dos ensaios de resistência à compressão e absorção por imersão.

Tempo de cura (dias)	14			28			56		
Mistura	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Mk (%)	0	10	15	0	10	15	0	10	15
Resistência à compressão (Mpa)	10.1	8.9	9.8	10.4	11.2	11.8	10.8	12.2	13.0
Sd* (Mpa)	0.3	0.7	0.5	0.7	0.9	0.4	0.5	0.9	0.8
Absorção por imersão (%)	16.4	16.3	16.0	16.8	15.7	15.5	17.6	16.6	15.8
Sd* (%)	1.0	0.5	0.8	1.6	1.3	0.7	0.2	0.6	0.9

* Sd – Desvio Padrão

Observando-se os dados descritos na Tabela 4, verifica-se que, para o concreto sem metacaulim, os resultados de absorção por imersão tendem a aumentar com o aumento do tempo de cura, provavelmente devido a evaporação da água de amassadura e, por conseguinte, aumento da porosidade. A redução nos valores de absorção, para as composições com metacaulim aos 14 e 28 dias de cura, pode estar relacionada ao efeito micro-filler decorrente do uso de metacaulim de elevada finura [20-21]. Entretanto, o acréscimo de absorção ocorrido entre os 28 e 56 dias de cura verificado para a composição com 10% de metacaulim, indica ser este teor insuficiente para reduzir a porosidade, o que não ocorre para a composição com 15%. Devido ao fato de que a reação pozolânica ocorre após as idades iniciais, verifica-se que, aos 14 dias, as composições com metacaulim apresentaram valores de resistência à compressão inferiores ao concreto de referência, entretanto, aos 56 dias, houve acréscimo de 14% e 21% para 10% e 15%, respectivamente, de substituição da massa do cimento por metacaulim.

A influência do metacaulim pôde também ser observada nos resultados do ensaio de absorção por capilaridade (Tabela 5), por meio do qual foi determinado o coeficiente de capilaridade, o qual representa a velocidade com que a absorção se processa e o valor assintótico, o qual, segundo Faria *et al.* [22], representa a quantidade máxima de água absorvida por capilaridade (variação de massa for

inferior a 1% em 24 horas), quando então o ensaio é concluído. A composição com 15% de metacaulim, aos 56 dias de cura, apresentou absorção 26% inferior ao concreto de referência, justificando assim os resultados mais elevados de resistência à compressão para esta composição, o que deve estar relacionado à menor porosidade e à interconectividade e diâmetro dos poros.

Tabela 5. Valores médios de absorção por capilaridade.

Tempo de cura (dias)	Mistura	Mk (%)	Absorção por capilaridade (kg.m ⁻²)								Coef. de capilaridade (kg.m ⁻² .h ^{-0.5})
			3 h	Sd*	6h	Sd*	24 h	Sd*	48 h**	Sd*	
14	A	0	7.95	1.30	8.99	1.21	11.91	0.84	13.93	0.59	1,15
	B	10	6.00	0.70	7.15	0.79	10.93	0.98	14.41	2.69	1,61
	C	15	4.65	1.71	5.73	1.61	9.01	1.60	11.55	1.53	1,33
28	A	0	6.30	1.31	7.03	1.20	10.11	0.95	12.18	0.67	1,14
	B	10	5.61	0.93	6.25	0.96	9.45	1.19	11.91	1.36	1,22
	C	15	5.63	1.18	6.34	1.08	9.25	0.83	11.15	0.73	1,07
56	A	0	8.50	0.41	9.42	0.50	12.18	0.51	13.83	0.66	1,05
	B	10	6.06	0.96	6.66	0.63	9.47	0.84	11.68	0.84	1,11
	C	15	4.57	0.62	5.36	0.62	7.85	0.69	10.25	0.51	1,10

*Sd = Desvio padrão; ** Valor assintótico

Os resultados das análises termogravimétricas permitiram, por meio de cálculos estequiométricos, quantificar os teores de Ca(OH)₂, (antes da desidroxilação), do CaCO₃ (antes da dissociação do CO₂) e do teor de CaO para estes dois compostos, segundo a metodologia proposta por Tingshu *et al.* [23]. A diferença entre a perda de massa referente a água quimicamente combinada (intervalo entre 105°C e final da desidroxilação do Ca(OH)₂) de todos os hidratos (TH) e a referente a desidroxilação do Ca(OH)₂ (HCH), foi considerada como parâmetro para avaliar o grau de hidratação das misturas estudadas (GH). Todos os resultados foram comparados aos obtidos para os concretos de referência, sem metacaulim, estando descritos na Tabela 6.

Tabela 6. Teores de Ca(OH)₂, CaCO₃ e CaO obtidos por meio das análises termogravimétricas.

Tempo de Cura (dias)	14			28			56		
Mistura	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Mk (%)	0	10	15	0	10	15	0	10	15
TH (%)	2.11	2.15	2.00	2.17	1.85	2.07	2.09	2.30	1.92
HCH (%)	0.62	0.61	0.50	0.60	0.43	0.42	0.54	0.54	0.36
GH (%)	1.49	1.54	1.50	1.57	1.42	1.65	1.55	1.76	1.56
Ca(OH) ₂ (%)	2.55	2.51	2.06	2.47	1.77	1.73	2.22	2.22	1.48
CaCO ₃ (%)	4.21	3.57	2.71	1.41	1.34	1.34	3.96	3.18	2.93
CaO (%) Total	4.29	3.90	3.07	3.66	2.09	2.06	3.90	3.46	2.76

TH- Total de hidratos; HCH - Massa referente a desidroxilação do CH; GH - grau de hidratação.

Os valores descritos na tabela 5 demonstram que a adição de metacaulim promoveu redução na quantidade de CaO, justificando os resultados encontrados nos ensaios físicos e mecânicos. A redução do CaO, aos 56 dias de cura, foi de 16% e 37% para 10% e 15% de substituição, respectivamente, comprovando assim a ocorrência de reação pozolânica. Verifica-se também, pela redução do teor de CaCO₃, que nas misturas com metacaulim houve menor ocorrência de carbonatação, devido a menor disponibilidade de CaO promovida do consumo de Ca(OH)₂ pela reação pozolânica. Tais resultados

corroboram os publicados por Vance *et al.* [24] e Duan *et al.* [25], segundo os quais, o uso de 10% metacaulim reduziu a carbonatação nas misturas de cimento Portland estudadas. A presença de água livre demonstra que, apesar do baixo teor de umidade dos concretos destinados a produção de blocos vazados para alvenarias, para o teor de cimento utilizado nas misturas (12%) a água utilizada para o amassamento foi suficiente para ocorrer a reação pozolânica.

3.2. Ensaio acelerado de exposição a chuvas

Os resultados de absorção (Ab_{ch}), perda de massa ($P_{m,ch}$) e resistência à compressão ($f_{c,ch}$) dos provetes submetidos ao ensaio de exposição à chuvas estão descritos na Tabela 7, onde constam também os valores de resistência à compressão ($f_{c,i}$) e absorção por imersão (Ab_i) dos provetes de mesma idade (56 dias), não submetidos ao ensaio de degradação e mantidos em ambiente protegido.

Tabela 7. Resultados obtidos após ensaio de durabilidade e comparação com os resultados de referência (provetes não submetidos ao ensaio).

Mistura	Mk (%)	Ab _{ch} (%)	Ab _i (%)	Ab _{ch} / Ab _i	P _{m,ch} (%)	f _{c,ch} (MPa)	f _{c,i} (MPa)	f _{c,ch} / f _{c,i}
A	0	7.7	8.7	0.9	0.64	12.2	10.8	1.1
B	10	6.9	8.0	0.9	0.25	13.9	12.2	1.1
C	15	6.7	7.5	0.9	0.15	17.2	13.0	1.3

Comparando-se os resultados apresentados na tabela 6, verifica-se que a absorção de água decorrente da exposição ao ensaio de degradação foi inferior à absorção por imersão, podendo-se considerar a diferença (10%) como margem de segurança. Contrariando os resultados esperados em um ensaio presumido ser de degradação, todas as composições apresentaram, após o ensaio, melhorias nas propriedades físicas e mecânicas em relação aos provetes de referência, não expostos ao teste.

O uso de 10% e 15% de metacaulim promoveu redução de 10% e 13%, respectivamente, na absorção em relação às composições de referência, sem metacaulim. Os provetes de concreto com 15% de metacaulim (mistura C) apresentaram, após o teste, aumento de 32% na resistência à compressão em relação aos provetes de referência com igual composição. Os resultados de perda de massa, todos inferiores a 1%, considerando-se o limite de 5% sugerido por Fitzmaurice *apud* Heathcote [26] para blocos de terra e de 10% recomendado pela Associação Brasileira de Cimento Portland [27] para tijolos de solo-cimento, demonstraram que, para elementos de concreto, a erosão não é um parâmetro de resposta de degradação representativo, porém, as misturas com 15% de metacaulim apresentaram o menor valor de perda de massa (0.15%).

As análises térmicas demonstraram maior ocorrência de carbonatação nos provetes submetidos ao teste acelerado de exposição a chuvas (Figura 4). A elevação do $CaCO_3$ ocorrida nas amostras submetidas ao ensaio de exposição a chuvas, pode ser justificada pela hidratação do CaO promovida pelo teste e posterior carbonatação, consumindo parte do $Ca(OH)_2$ por ser este composto altamente solúvel em meios ácidos. Outro fator importante é a elevada porosidade dos produtos de concreto seco, devido ao baixo teor de água nas misturas em estado fresco e a compactação das mesmas durante a moldagem, ocasionando a presença de poros de ar (e CO_2). De acordo com Ngala e Page [5], a deposição do $CaCO_3$ nos poros promove maior compactação à pasta melhorando as suas propriedades físicas e mecânicas, o que justifica em parte, a elevação dos valores de resistência à compressão dos provetes submetidos ao teste. Por outro lado, a hidratação do CaO ocasiona maior quantidade de $Ca(OH)_2$ para reagir com o metacaulim intensificando assim os efeitos da reação pozolânica a qual, segundo Sabir *et al.* [9], apesar de ocorrer com maior intensidade entre os 14 e 28 dias de cura, pode prolongar-se a idades superiores a 365 dias.

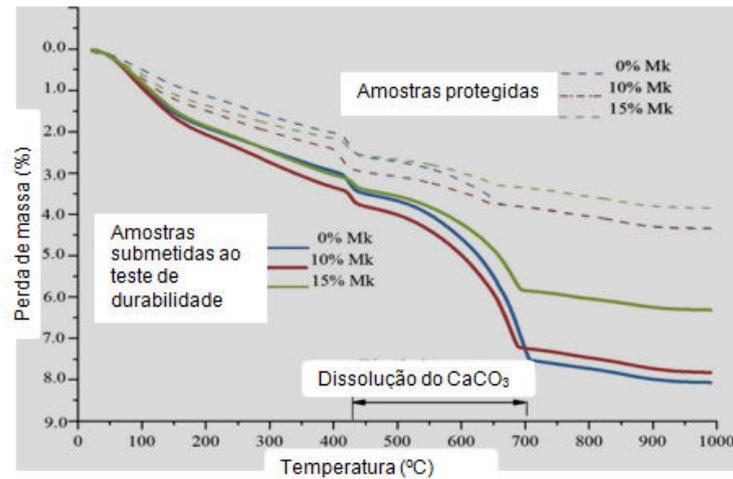


Figura 4. Curvas de análises termogravimétricas (ATG) aos 56 dias de cura.

Entretanto, tais argumentações não justificam a grande ocorrência de carbonatação, podendo ter havido a influência de outros fatores, como o período de tempo de secagem em estufa. Os corpos de prova protegidos, em virtude de não estarem umedecidos, atingiram a constância de massa mais rapidamente do que os provetes submetidos ao ensaio de degradação permanecendo, portanto, menor período de tempo em estufa, sendo isto comprovado ao serem ensaiadas amostras com 15% de metacaulim aos 365 dias de cura, sendo ambas as amostras (protegidas e ensaiadas) mantidas em estufa, até que as amostras ensaiadas atingissem massa constante. Os resultados (Figura 5) demonstraram que a ocorrência de carbonatação foi mais intensa para as amostras protegidas, cujos poros, não estando preenchidos por água, facilitaram a intrusão do CO₂ e posterior carbonatação.

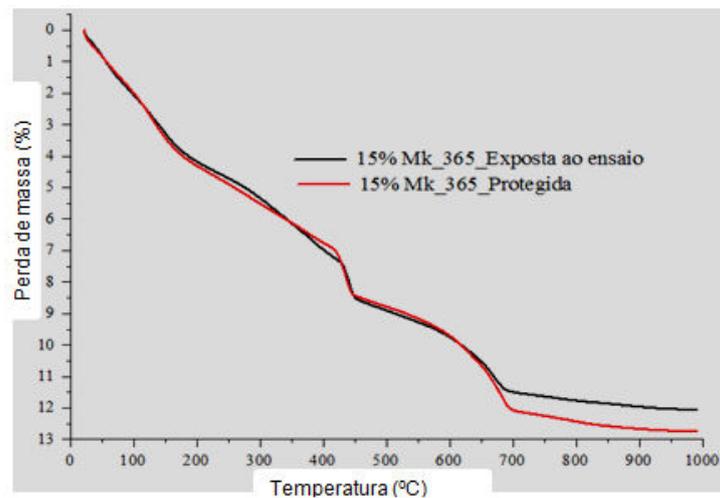


Figura 5. Curvas de análises termogravimétricas (ATG) de amostras expostas por igual período de tempo em estufa (100±5°C).

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho, permitem concluir que o uso de 15% de metacaulim proporciona melhorias nas propriedades físicas e mecânicas em concretos secos, destinados a produção de blocos vazados para alvenarias, inclusive quando expostos a simulação de chuvas. Entretanto, o processo de compactação e o baixo teor de umidade em estado fresco, ocasiona maior permeabilidade, facilitando a ocorrência de carbonatação. Esta reação não se mostrou prejudicial aos concretos estudados,

elevando a resistência à compressão e reduzindo a absorção, o que provavelmente está associado à maior densificação da estrutura porosa.

Após o ensaio de simulação de exposição a chuvas, foi identificado que a secagem em estufa pode ocasionar maior carbonatação, devendo todas as amostras, ensaiadas ou não, ser submetidas a igual período de tempo de secagem. O teor de CaCO_3 , avaliado por meio de análise termogravimétrica, foi reduzido com o uso de metacaulim, sendo os melhores resultados encontrados para as composições com 15% de substituição da massa do cimento por metacaulim. Quando receberam o mesmo tratamento de secagem, as amostras ensaiadas apresentaram menor ocorrência de carbonatação do que as amostras protegidas, o que provavelmente está relacionado ao preenchimento dos poros pela água, dificultando a penetração do CO_2 . Apesar de não ser importante a profundidade de carbonatação no estudo de concretos simples, sem armadura, sugere-se, para futuras pesquisas, que esta análise seja feita com o intuito de confirmar a frente de carbonatação à partir da face do provete exposta a chuvas.

Os baixos valores de perda de massa resultante da exposição ao ensaio de simulação de chuvas demonstraram que, para o estudo de durabilidade de concretos expostos à ação de chuvas, a erodibilidade, associada ao ensaio de chuva dirigida utilizado, não pode ser considerada como parâmetro de resposta. É sugerido também que outros materiais, dos quais já seja conhecido o desgaste ocasionado por exposição natural, sejam testados para melhor validação do ensaio proposto,

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (248888/2013-7) e aos integrantes do Laboratório de Materiais de Construção da Universidade do Minho. Agradecem também ao Prof. Fernando Castro, coordenador do Laboratório de Metalurgia do Departamento de Mecânica da Universidade do Minho e ao técnico Miguel Abreu, pela execução das análises térmicas.

REFERÊNCIAS

- [1] Mehta P.K., Monteiro P.J.M. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. 3ed. São Paulo: IBRACON (2008).
- [2] Rozière E., Loukili A., El Hachen R., Grondin, F., 2009. "Durability of concrete exposed to leaching and external sulphate attacks" *Cement and Concrete Research* 39, 1188-1198.
- [3] Houst, Y.F.; Wittmann, F.H., 2002. "Depth profiles of carbonates formed during natural carbonation" *Cement and Concrete Research* 32(12), 1923-1930.
- [4] Duong V.B., Sahamitmongkol R., Tangtermsirikul S., 2013. "Effect of leaching on carbonation and steel corrosion of cement-based materials" *Construction and Buildings Materials* 40, 1066-1075.
- [5] Ngala V.T., Page C.L., 1997. "Effects of carbonation on pore structure and diffusional properties of hydrated cement pastes" *Cement and Concrete Research*, 27 (7), 995-1007.
- [6] Sabbatini F.H., Barros M.M.S.B., Medeiros J.S., 1998. "Vedações Verticais" In: I Seminário de Tecnologia e Gestão na Produção de Edifícios. São Paulo: Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia de Construção Civil.
- [7] BIS, 1982. "Specification for soil based blocks used in general building construction" IS 1725. Indian Bureau of Indian Standards.
- [8] Rezende M.L.S., Eires R., Camões A., Jesus, C., 2016. "Desenvolvimento e avaliação de um simulador de chuvas para teste acelerado de degradação" *Engenharia Civil – UM*, 53, 17-28.
- [9] Sabir B.B., Wild S., Bai J., 2001. "Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review" *Cement & Concrete Composites*, 23, 441-454.

- [10] ASTM, 1991. "Fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in Portland cement concrete" ASTM C 618. American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- [11] ABNT, 2010. "Metacaulim – Requisitos" NBR 15894. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- [12] AFNOR, 2012. "Pozzolan addition for concrete-metakaolin - definitions, specifications and conformity criteria" NFP 18-513. Association Française de Normalisation, Saint-Denis.
- [13] Souza P.S.L., Dal Molin D.C.C., 2002. "Estudo da Viabilidade do uso de Argilas Calcizadas, como Metacaulim de Alta Reatividade (MCAR)" Revista Engenharia Civil – *UM*, 15.
- [14] ABNT, 2008. "Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Requisitos" NBR 6136. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- [15] Rezende M.L.S, Nascimento J.W.B, Neves G.A., Silva F.L.H., Leal A.F., Ferreira, H.C., 2012. "Uso de metacaulim em concreto seco: uma abordagem por superfície de resposta" *Ambiente Construído*, 12 (3), 135-146.
- [16] Cassagnabère F., Mouret M., Escadellas G.; Broilliard P., Bertrand A., 2010. "Metakaolin a solution for the precast industry to limit the clinker content in concrete: mechanical aspects" *Construction and Buildings Materials*, 24, 1109-1118.
- [17] IPQ, 2009. "Ensaio de betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão de provetes de ensaio" NP EN 12350-3. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.
- [18] LNEC, 1993. "Betões: determinação da absorção de água por capilaridade" LNEC E 393. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- [19] LNEC, 1993. "Betões: determinação da absorção de água por imersão" LNEC E 394. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- [20] Khatib J.M., Wild S., 1996. "Pore size distribution of metakaolin paste" *Cement and Concrete Research*, 26(10), 1545-1553.
- [21] Arikan M., Sobolev K., Ertün T., Yeginobali A., Turker P., 2009. "Properties of blended cements with thermally activated kaolin". *Construction and Building Materials*. 23, 62-70.
- [22] Faria, P., Henriques, F., Rato, V., 2007. "Argamassas correntes: influência do tipo de ligante e do agregado" In: 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, Lisboa, APFAC.
- [23] Tingshu H., Chen S., Guoxin L., Xuefeng S., 2012. "Effects of superplastiziers on the carbonation resistance of C₃S and C₃A hydration products" *Construction and Buildings Materials*, 36, 954-959.
- [24] Vance K., Aguayo M., Oey T., Sant G., Neithalath N., 2013. "Hydration and strength development in ternary Portland cement blends containing limestone and fly ash or metakaolin" *Cement&ConcreteComposites*, 39, 93-103.
- [25] Duan P., Shui Z., Chen W., Shen C., 2012. "Influence of metakaolin on pore structure-related properties and thermodynamics stability of hydrated phases of concrete in seawater environment" *Construction and Buildings Materials*, 36, 947-953.
- [26] Heathcote, K. A., 2002. "An investigation in to the erodibility of earth wall units" Tese (Doctor of Philosophy) – Sydney, Austrália: University of Technology Sydney.
- [27] ABCP, 1980. "Dosagem das misturas de solo-cimento: normas de dosagem e métodos de ensaio" Associação Brasileira de Cimento Portland. Publicações ABCP, São Paulo.