

## Argamassas de cal e metacaulim: influência das condições de cura

### Influence of Curing Conditions on Lime-metakaolin Mortars

Flávia Costa de Mattos<sup>1</sup>, Margarete Regina Freitas Gonçalves<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais – UFPel, Pelotas, RS, Brasil.  
e-mail: fcmattos@vetorial.net

<sup>2</sup> Profa. Dra. do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais – UFPel, Pelotas, RS, Brasil.  
e-mail: margareterfg@gmail.com

---

#### RESUMO

Nesse estudo analisou-se a influência das condições de cura de argamassas de cal aérea com dois tipos de metacaulim, utilizados como substituto parcial da massa de cal (10%). Para a análise, foram realizados ensaios de resistência mecânica à flexão e à compressão e, de composição mineralógica por difração de Raio-X (DRX), em corpos de prova com 28 e 180 dias de cura em ambiente interno, com umidade e temperatura constantes e, expostos ao ar livre, protegidos apenas da ação direta da chuva. As análises da microestrutura e da composição química foram realizadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e por espectroscopia por dispersão de energia (EDS), respectivamente, em corpos de prova com 180 dias de idade, curados ao ar livre. Os resultados da análise experimental foram comparados entre si e mostraram que as substituições foram menos eficientes para ambientes com baixa umidade relativa.

**Palavras-chave:** argamassas, cal aérea, metacaulim, cura.

---

#### ABSTRACT

This study analyzed the influence of curing conditions on air lime mortars with two types of metakaolin which were used as partial substitutes for lime mass (10%). Flexural strength and compressive strength tests, as well as mineralogical composition ones by X-ray diffraction (XRD), were carried out in specimens after having been cured for 28 and 180 days indoors, at constant temperature and humidity, and outdoors, with no direct exposure to rain. Analyses of microstructure and chemical composition were conducted by scanning electron microscopy (SEM) and by energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS), respectively, in 180-day-old specimens, which were cured outdoors. Comparisons of results of the experimental analysis showed that substitutions were less efficient in environments with low relative humidity.

**Keywords:** mortars, air lime, metakaolin, curing.

---

#### 1. INTRODUÇÃO

Por muitos séculos o revestimento externo em argamassa cumpre as funções de regularização das alvenarias e impermeabilização das fachadas, contribuindo para a estanqueidade global das paredes externas. Também assumem as funções de proteção das paredes contra ações externas, de acabamento e suporte de decoração e adornos [1,2].

No passado, as argamassas de cal aérea foram muito utilizadas nas formulações clássicas, e a melhoria das características mecânicas e de durabilidade dos revestimentos era obtida pela introdução de elementos que conferissem características hidráulicas, como o uso de materiais pozolânicos.

A cal aérea é um aglomerante inorgânico que misturado com água, forma uma pasta com propriedades aglomerantes, cujo endurecimento se dá pela reação com o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), e que após esta reação (carbonatação) não resiste bem em ambientes úmidos ou em contato permanente com água.

O uso da cal aérea como aglutinante único em argamassa envolve alguns inconvenientes, como tempo de cura, carbonatação lenta, fissuras por retração, baixa durabilidade na presença de água e umidade e, tam-

bém, vulnerabilidade a agentes atmosféricos, fatores que motivam diversos estudos para a formulação de argamassas a serem utilizadas em restauração de revestimentos de prédios históricos, abordando aspectos de compatibilidade com os materiais pré-existentes e, à preservação do patrimônio arquitetônico [3,4].

Tais fatores elencam as razões apontadas para o uso de materiais pozolânicos em argamassa de cal, sobretudo em casos específicos, como nos locais com presença de água ou dificuldade de acesso de CO<sub>2</sub>, onde a adoção de argamassas de cimento não são as mais adequadas, devido ao elevado módulo de elasticidade, menor permeabilidade ao vapor de água e por conterem sais solúveis em sua composição, situação que pode levar ao surgimento de eflorescências e produtos de cristalização expansíveis [5,6,7].

A utilização de materiais pozolânicos naturais e artificiais em argamassas e concretos vem sendo abordada em vários estudos, que apontam para resultados que viabilizam a sua utilização no incremento da resistência mecânica e na durabilidade [2,3,4,7,8,9,10,11,12,13].

As pozolanas são materiais finos, ricos em silicatos e aluminatos, que quando hidratado não endurecem com água. Contudo, na presença de hidróxido de cálcio reagem para formar novos compostos, como silicato de cálcio e aluminato de cálcio hidratado, conferindo propriedades hidráulicas às argamassas [12,14].

Além do incremento nas propriedades mecânicas e físicas, a utilização de pozolana artificial, como o metacaulim se alinha com a adoção de práticas construtivas sustentáveis, visto que sua produção libera menos dióxido de carbono para a atmosfera se comparado com a produção de cimento Portland e, também, pela menor absorção de CO<sub>2</sub> durante a carbonatação dessas argamassas [9].

Nas composições de argamassa de cal e metacaulim, as condições de cura são muito importantes, uma vez que diferentes configurações de umidade e temperatura podem propiciar a variação de características físicas, mecânicas e mineralógicas [12,14,15,16,17].

A reação pozolânica entre o metacaulim e a cal, por ser uma reação hidráulica, exige a presença de água durante um longo período de tempo, superior ao requerido pela hidratação do cimento e da cal hidráulica. No sistema cal-metacaulim, a reação pozolânica compete com a de carbonatação da cal e, se as condições ambientais forem mais favoráveis à carbonatação, toda a cal se transforma em carbonato de cálcio antes mesmo de reagir com o metacaulim, atuando este como filler (agregado) e não mais como ligante [13].

Em temperatura ambiente a reação entre o metacaulim e o hidróxido de cálcio resulta na formação de Silicato de Cálcio Hidratado (genericamente denominados CSH na química do cimento-  $x\text{CaO}\cdot y\text{SiO}_2\cdot z\text{H}_2\text{O}$ ) ou tobermorita (um dos tipos de CSH), juntamente com outros produtos cristalinos como os aluminatos de cálcio hidratados e alumino-silicatos hidratados,  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 8\text{H}_2\text{O}$  – stratlingita ou gelenita hidratada,  $\text{C}_4\text{AH}_{13}$  – aluminato tetracálcico hidratado,  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCO}_3\cdot 11\text{H}_2\text{O}$  – monocarboaluminato e  $\text{C}_3\text{AH}_6$  – hidrogranada [4,8,11,12,16,17,18].

Para as argamassas de cal aérea a cura seca favorece a reação de carbonatação e a cura úmida favorece a reação de hidratação, benéfica para as argamassas com metacaulim [12,17].

No tocante as argamassas do sistema cal-metacaulim, as condições de cura tem sido foco de diversos estudos desenvolvidos pelos pesquisadores Grilo *et al.* [12], Faria e Martins [14], Felgueiras [15] e Cardoso [16] com intuito de identificar as características físicas e mineralógicas decorrentes do processo.

Diante dessas premissas, o programa experimental deste trabalho avaliou as características mecânicas, física, química e microestrutural de uma argamassa (de cal) cujo aglomerante foi substituído, parcialmente, por dois tipos de metacaulim (10% em massa) e, os corpos de prova foram submetidos a diferentes condições de cura: uma sem ação das variações climáticas (temperatura, umidade e vento) e a outra ao ar livre (apenas ao abrigo da chuva).

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o trabalho experimental foi utilizada a cal hidratada em pó tipo CH-II, areia de natureza quartzosa (comumente utilizada na região) e dois tipos de metacaulim produzidos pela Metacaulim do Brasil.

A cal hidratada e a areia foram caracterizadas conforme os procedimentos normativos informados nas Tabelas 1 e 2. Para a obtenção da área superficial foi utilizado o método B.E.T. (Brunauer, Emmett, Teller).

**Tabela 1:** Propriedades físicas da cal hidratada.

PROPRIEDADE	MÉTODO DE ENSAIO	RESULTADO
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	NBR NM-45 [19]	0,61
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	NBR-NM-23 [20]	2,55

Área superficial específica (m <sup>2</sup> /g)	B.E.T.	15,5
---	--------	------

**Tabela 2:** Propriedades físicas da areia.

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	
Módulo de finura NBR NM- 248 [21]	2,79
Dimensão máxima característica (mm) NBR NM- 248 [21]	2,40
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> ) NBR NM- 45 [19]	1,58
Coefficiente de uniformidade *	3,45
Teor de finos (%) **	0,33
* Coeficiente de uniformidade (Cu) definido como a relação entre as malhas das peneiras correspondentes a 60% e 10% do material passante.	
** Material passante na peneira # 0,075 mm.	

A caracterização dos metacaulins foi realizada por ensaios que determinaram o diâmetro médio das partículas através de granulômetro a laser (Microtac- S3000/3500), a área superficial específica através de B.E.T. (Micrometrics-2420) e a análise da composição mineralógica por meio de Difração de Raio-X (Bruker-D8 Advance).

A Tabela 3 apresenta o resultado das propriedades físicas dos metacaulins e, a Tabela 4, a composição química fornecida pela empresa Metacaulim dos Brasil.

**Tabela 3:** Propriedades físicas dos metacaulins.

PROPRIEDADE	MÉTODO DE ENSAIO	RESULTADO	
		HP Ultra	HP Max
Diâmetro de partículas (µm)	Granulometria à laser	32,09	11,83
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	NBR NM-23 [20]	2,53	2,05
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	NBR NM-45 [19]	0,56	0,46
Finura (resíduo # 45 µm -%)	NBR 15894-3 [22]	12,40	17,45
Área Superficial específica (m <sup>2</sup> /g)	B.E.T.	22,5	26,6

**Tabela 4:** Análise química dos metacaulins.

(%)	P.F.	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	BaO	Total
Mk- HP Ultra	2,61	52,37	39,16	2,83	1,48	0,11	0,31	0,87	0,03	0,05	0,03	99,85
MK- HP Max	1,12	51,18	42,56	2,29	1,21	0,15	0,32	0,65	0,18	0,04	0,02	99,82

P.F.- Perda ao Fogo

A composição mineralógica dos metacaulins utilizados apresenta o quartzo e a muscovita como as principais fases cristalinas presentes, além de outras fases minoritárias como a ilita, o caulim e a virgilita.

A partir da adoção do traço experimental 1:4 em volume (cal e areia, respectivamente) foram elaboradas três famílias de argamassas: uma de referência e duas outras com substituição de 10% da massa de cal do traço referência, pelos metacaulins MK-ultra e MK-max. As argamassas foram preparadas com pasta da cal, maturada por sete dias (na proporção 1:0,6 - cal e água, respectivamente). Finalizado o procedimento de mistura, a quantidade de água utilizada foi a necessária para a obtenção de argamassas trabalháveis e adequadas para aplicação *in situ*, conforme [23], Tabela 5.

**Tabela 5:** Formulação e índice de consistência das argamassas testadas.

IDENTIFICAÇÃO	TRAÇO EM VOLUME	PROPORCIONALIDADE EM MASSA (Kg)					A/MS	IC (mm)
		Cal hidratada em pasta	Areia	MK Ultra	MK Max	Água		
A	1:4	0,480	3,058	-	-	0,491	0,20	261
B		0,432	3,058	0,026	-	0,475	0,19	256
C		0,432	3,058	-	0,022	0,474	0,19	260

A/MS- Água/Materiais Secos

Os corpos de prova moldados em formas prismáticas (40x40x160 mm) foram submetidos a dois processos de cura. Inicialmente, todas as amostras foram mantidas durante sete dias nas formas em ambiente laboratorial com umidade e temperatura de  $60\pm 5\%$  e  $20\pm 2^\circ\text{C}$ , respectivamente, ficando cobertas com filme plástico nos quatro primeiros dias. Após este período, ocorreu a desforma dos corpos de prova, permanecendo um grupo na cura interna (I), em local com umidade e temperatura igual a  $80\pm 5\%$  e  $20\pm 2^\circ\text{C}$ , respectivamente, até completar 180 dias. O outro grupo em cura externa (E), inicialmente, em ambiente laboratorial, idêntico ao da cura interna até completar 28 dias e depois, expostos ao ar livre até completar 180 dias, protegidos apenas da incidência direta da chuva.

As argamassas testadas foram submetidas a ensaios de resistência à tração na flexão e à compressão, de acordo com [24] e, de composição mineralógica por difração de Raio-X (DRX), em corpos de prova com 28 e 180 dias de cura nos dois ambientes analisados. A análise da microestrutura e da composição química das argamassas foram realizadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e por espectroscopia por dispersão de energia (EDS), respectivamente, em corpos de prova com 180 dias de idade curados ao ar livre.

As condições climáticas, entre os meses de dezembro de 2016 a maio de 2017, período no qual o grupo da cura externa (E) ficou exposto, apresentaram variações de temperatura e umidade, diferentes da cura interna (I), que se manteve constante durante todo o período em análise, ratificando o interesse do estudo quanto às condições de cura, devendo ser o mais próximo das condições *in situ*.

### 3. RESULTADOS

As tabelas 6 e 7 apresentam os resultados das resistências mecânicas, à tração na flexão e à compressão, com as respectivas médias e desvios padrões nas duas condições de cura analisadas.

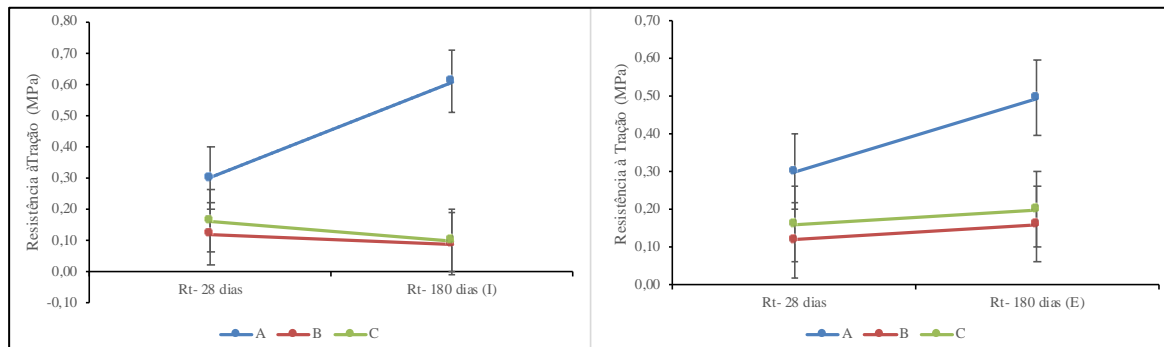
**Tabela 6:** Resistência à tração na flexão e à compressão das argamassas submetidas a cura externa (E).

Idade (dias)	A				B				C			
	Rt (MPa)	DV	Rc (MPa)	Dv	Rt (MPa)	DV	Rc (MPa)	Dv	Rt (MPa)	DV	Rc (MPa)	Dv
28	0,30	0,04	0,35	0,08	0,12	0,02	0,47	0,02	0,16	0,02	0,47	0,02
180	0,50	0,02	1,38	0,09	0,16	0,02	0,73	0,08	0,20	0,02	0,71	0,10

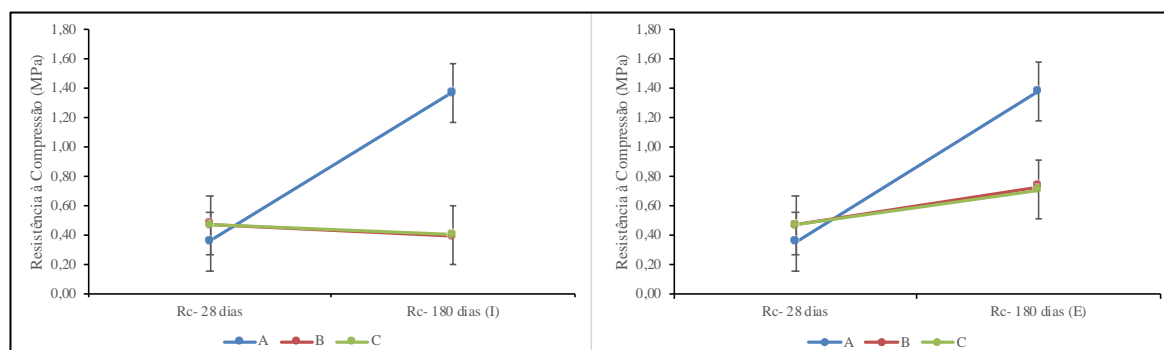
**Tabela 7:** Resistência à tração na flexão e à compressão das argamassas submetidas a cura interna (I).

Idade (dias)	A				B				C			
	Rt (MPa)	DV	Rc (MPa)	Dv	Rt (MPa)	DV	Rc (MPa)	Dv	Rt (MPa)	DV	Rc (MPa)	Dv
28	0,30	0,04	0,35	0,04	0,12	0,02	0,47	0,02	0,16	0,02	0,47	0,02
180	0,60	0,04	1,37	0,11	0,09	0,007	0,39	0,05	0,10	0,01	0,40	0,02

A representação gráfica dos resultados, Figuras 1 e 2, permite verificar o decréscimo da resistência mecânica na condição de cura interna (I) para as argamassas com metacaulim a partir dos 28 dias de cura.



**Figura 1:** Resistência à tração aos 28 e 180 dias, na cura interna (I) e externa (E).



**Figura 2:** Resistência à compressão aos 28 e 180 dias, na cura interna (I) e externa (E).

Observou-se que nos corpos de prova com 180 dias de idade, o ambiente de cura interna (I) propiciou ganho de resistência à tração de 20% para a argamassa referência (A), sendo ineficiente para as argamassas com metacaulim. Este fato sinaliza que, as reações de carbonatação e pozolânica foram prejudicadas, a primeira pela deficiência no nível de  $\text{CO}_2$  e a segunda pelo insuficiente teor de umidade, aliado ao baixo percentual de substituição, sendo provável que o metacaulim tenha atuado, fundamentalmente, como filer.

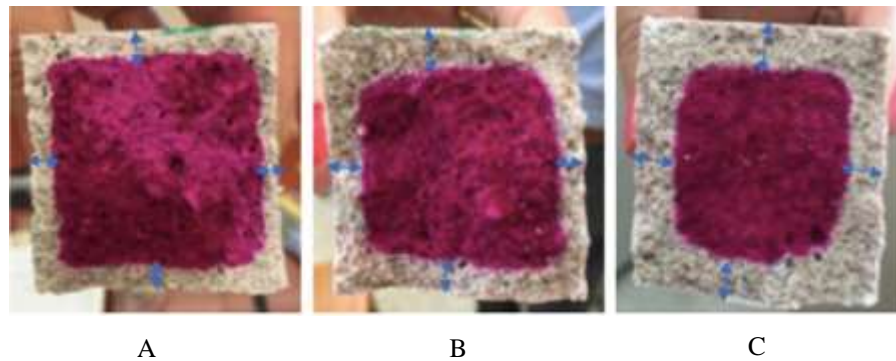
Estes resultados estão em sintonia com o que foi observado por Felgueiras [15] e Cardoso [16], que utilizaram traços semelhantes, constando que a cura úmida ( $> 90\%$ ) não favoreceu a resistência das argamassas com substituição de 9% da massa da cal hidratada por metacaulim, admitindo que este resultado seja devido ao baixo teor desta pozolana, apresentando efeito benéfico apenas no período inicial de cura.

Na análise comparativa de corpos de prova com 180 dias de idade nas argamassas com metacaulim, verificou-se que a cura externa (E) teve influência no desempenho mecânico destas argamassas, onde a resistência à tração teve aumento de 77,8% para a argamassa B e 100% para a argamassa C.

Quanto a resistência à compressão o ganho foi de 87,2% para a argamassa B e 77,5% para a argamassa C. Os resultados obtidos podem estar associados à reação de carbonatação, conforme relato de Felgueiras [15] que afirma que a umidade relativa entre 50 e 70% conduz a maiores velocidades de carbonatação, justamente na faixa que a cura externa (E) ocorreu.

Veiga[13] analisou em laboratório argamassas de cal aérea e metacaulim (cal aérea:metacaulim:areia silicosa- 1:0,5:2,5 e 1:1:4), simulando condições de cura que tinham probabilidade elevada de ocorrer na realidade, em Portugal ( $t=23^\circ\text{C}$  e  $\text{UR}=50\%$ ), obtendo resistências mecânicas aos 90 dias similares às do presente trabalho para o traço 1:1:4 (mais fraco).

Para maior entendimento dos valores de resistência, fez-se uma análise da profundidade de carbonatação em amostras extraídas dos corpos de prova rompidos aos 28 dias de cura. A Figura 3 mostra a profundidade de carbonatação identificada pela área acinzentada e, a área ainda não carbonatada apresenta-se na cor rosa, que é a cor do indicador utilizado, a fenolftaleína.



**Figura 3:** Profundidade de carbonatação das argamassas testadas aos 28 dias de cura.

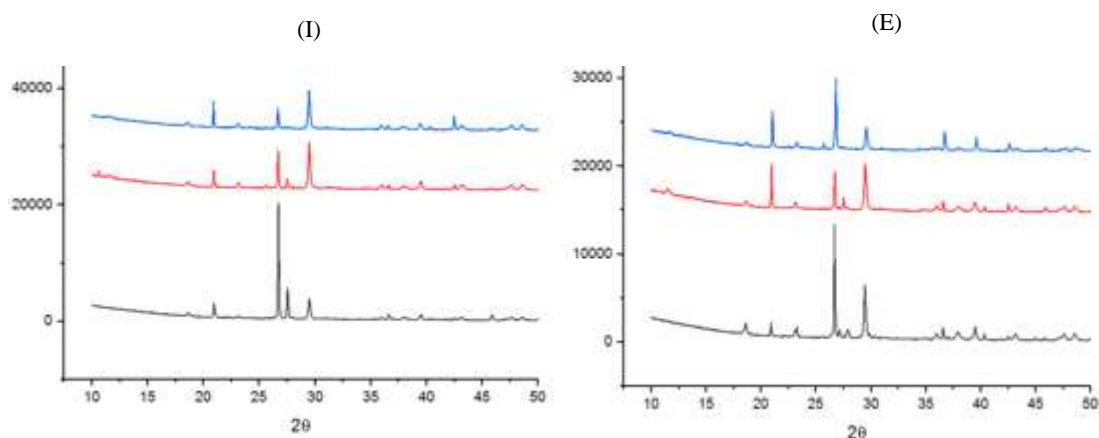
Nesta análise, identificou-se uma linha de fronteira bem definida entre o material carbonatado e o não carbonatado, sendo a profundidade média de carbonatação de 2,48 mm para a argamassa A, de 5,76 mm para a argamassa B e de 6,14 mm para a argamassa C. Este resultado justifica os menores valores de resistência à compressão e à tração na flexão para argamassa A, identificados aos 28 dias de cura.

A menor carbonatação da argamassa A nos primeiros dias de cura é explicada pela reduzida formação de cristais de carbonato de cálcio, em substituição ao hidróxido de cálcio. Para as argamassas B e C é de se supor que, além da formação de maior quantidade de cristais de carbonato de cálcio, possa ter ocorrido a formação de produtos resultantes da reação pozolânica, como silicatos de cálcio hidratado e aluminatos de cálcio hidratados.

Esta constatação também se alicerça no processo de carbonatação da argamassa de cal aérea, que requer o contato com  $\text{CO}_2$  e de certo grau de umidade para permitir a dissolução do  $\text{CO}_2$ . No entanto, estando os poros da argamassa saturados ou parcialmente saturados não existem condições facilitadoras para que ocorra a difusão na rede porosa da solução aquosa de  $\text{CO}_2$ , justificando o atraso no processo de carbonatação que se dá de forma lenta ao longo de vários meses ou anos, conforme já constatado por [2] e [16].

Nas demais idades a aspersão da solução não revelou a cor rosa, de forma bem definida, sendo indicativa da finalização do processo de carbonatação.

No tocante a composição mineralógica das argamassas aos 180 dias de cura, Figura 4, verificou-se nas duas condições de cura que as principais fases cristalinas identificadas, foram o quartzo e a calcita, indicando que a reação dominante foi a de carbonatação.



**Figura 4:** Difratomogramas das argamassas testadas nas condições cura interna e externa, aos 180 dias de cura.

Nota: Argamassas: ●A, ●B, ●C.

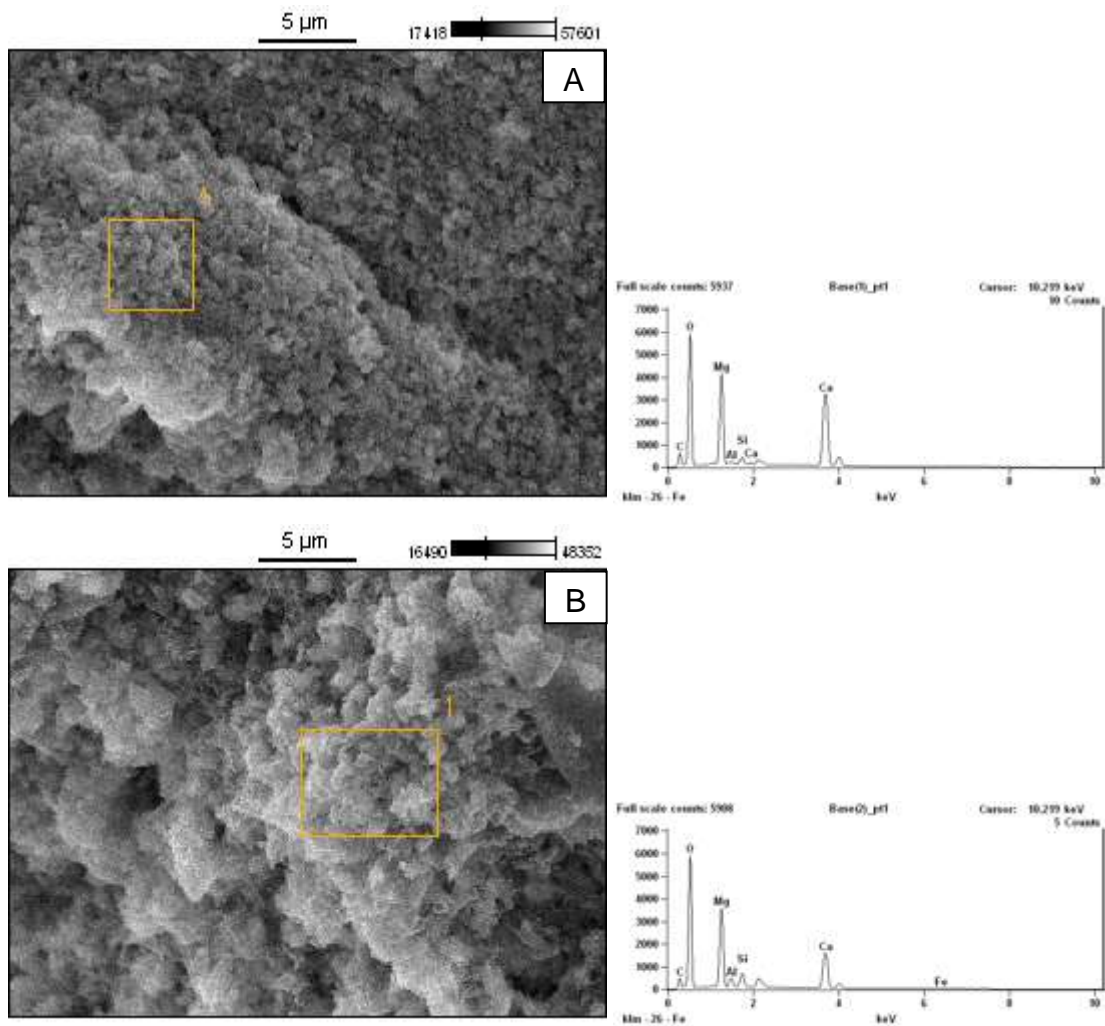
Provavelmente, o teor de umidade presente na cura interna (I) não foi o suficiente para permitir que a reação pozolânica prevalecesse à reação de carbonatação, minimizando de certa forma, a ocorrência das fases cristalinas próprias da reação cal-metacaulim, como: monocarboaluminato, tobermorita (CSH) e stratlingita.

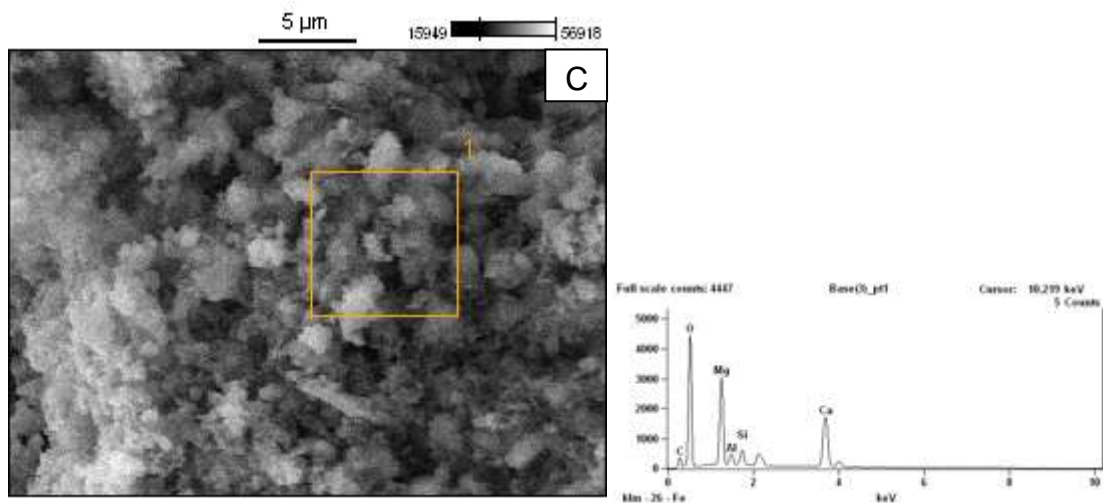
Além do carbonato de cálcio, se observou o carbonato de magnésio ( $\text{MgCO}_3$ ), em razão da cal dolomítica utilizada na composição. A portlandita ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) carbonata de imediato, originando a calcita, no entanto, a carbonatação da brucita ( $\text{Mg(OH)}_2$ ) é demorada e pode resultar em vários compostos de magnésio ao

longo do tempo [25].

Nas argamassas preparadas com metacaulim, na cura externa (E) ocorreu a diminuição do teor de portlandita e brucita aos 180 dias em relação a cura interna (I), como esperado, justificada pelo consumo na reação de carbonatação e pela pozolânica. Outras fases cristalinas minoritárias, como citado, foram percebidas nos difratogramas como, stratlingita ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ), monocarboaluminato ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCO}_3\cdot 11\text{H}_2\text{O}$ ) e tobermorita (CSH), também relatado por [11,16].

Nas micrografias e EDS da Figura 5, obtidas em amostras de corpos de prova das três famílias de argamassas (A, B e C) expostos a cura externa (E), é possível identificar a presença de partículas de calcita, comprovando a efetiva carbonatação do hidróxido de cálcio. Além da calcita, na análise química das amostras (EDS) foram identificados o Mg, Si e Al, elementos químicos constituintes da estrutura da cal e dos metacaulins, sendo que o teor mais elevado de magnésio se deve pela presença da cal dolomítica utilizada nas composições.





**Figura 5:** Micrografias no MEV e espectro EDS aos 180 dias na cura externa (E) das argamassas analisadas (A, B e C).

Os resultados das resistências mecânicas (tração na flexão e compressão) analisados em conjunto com a difração de raios X e a análise microestrutural, indicam que a incorporação de metacaulim promove a formação de compostos pozolânicos (aluminatos), em pequenos teores, instáveis ao longo do tempo, justificando menores valores das resistências destas argamassas em relação a de referência (A). Por outro lado, esta última (argamassa de referência) apresenta evolução das resistências mecânicas com o tempo, devido à continuidade da reação de carbonatação e à ausência de compostos instáveis.

Para as argamassas com metacaulim, nas condições de cura analisadas, o desenvolvimento da resistência ficou limitado, devido a evaporação da água e pelo rápido consumo do hidróxido de cálcio nas idades iniciais.

#### 4. CONCLUSÕES

Os aspectos importantes verificados no ensaio experimental nas argamassas de cal aérea com ou sem metacaulim, em condições de cura passíveis de serem reproduzidas *in situ*, foram:

- A dificuldade inicial de endurecimento da argamassa à base de cal aérea (A) aos 28 dias na condição de cura interna (I), pela baixa resistência à compressão e alta ductilidade, também percebida pelo baixo teor de calcita na difração de Raios-X;
- A argamassa (A), aos 180 dias na cura interna (I), apresentou acréscimo de resistência à tração, no entanto, não houve diferença nas duas condições de cura analisadas para a resistência à compressão;
- As argamassas de cal-metacaulim (B e C), aos 28 dias na condição de cura interna (I), apresentaram melhor comportamento quanto a resistência à compressão, inclusive com maior facilidade na desforma. Os difratogramas indicaram maior teor de calcita nas argamassas com metacaulim (B e C), quando comparadas com a argamassa de referência (A);
- Para a idade de 180 dias de cura, as argamassas com metacaulim (B e C) tiveram melhor desempenho mecânico na cura externa (E) quando comparadas com a cura interna (I), sugerindo que a reação de carbonatação prevaleceu a pozolânica, ou seja, a quantidade de hidróxido de cálcio disponível não foi adequada para reagir com os silicatos e aluminatos do metacaulim.

A partir dos resultados obtidos nas condições adotadas para a cura externa (E), que são as mais próximas da realidade de obra, conclui-se que estas foram as mais adequadas para argamassas de cal aérea com metacaulim nas composições propostas. No entanto, devido a cinética da reação pozolânica e de carbonatação, para potencializar o uso desta pozolana para aplicação *in situ*, pode ser recomendável o uso de uma de manta geotêxtil com pulverização frequente de água, garantindo o teor de umidade nas idades iniciais.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Ao Centro de Microscopia Eletrônica da Furg- CEME-SUL; ao Laboratório de Engenharia Civil e Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia-FURG e ao Laboratório de Ciência e Engenharia de Materiais-UFPel.



## 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] VELOSA, A. L. P. L., “Argamassas de cal com pozolanas para revestimento de paredes antigas”, Tese de D.Sc, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 2006.
- [2] VEIGA, R., “Air lime mortars: What else do we need to know to apply them in conservation and rehabilitation interventions? A review”, *Construction and Building Materials*, v.157, pp.132-140, Dec., 2017.
- [3] AGGELAKOPOULOU, E., BAKOLAS, A., MOROPOULOU, A., “Properties of lime-metakaolin mortars for the restoration of historic masonries”, *Applied Clay Science*, v.53, n.1, pp.15-19, July, 2011.
- [4] GAMEIRO, A., SILVA, A., FARIA, P., *et al.*, “Physical and chemical assessment of lime–metakaolin mortars: Influence of binder: aggregate ratio”, *Cement and Concrete Composites*, v. 45, pp.264–271, Jan., 2014.
- [5] COLLEPARDI, M., “Degradation and restoration of masonry walls of historical buildings”, *Materials and Structures*, v.23, n. 2, pp.81-102, March,1990.
- [6] GIBBONS, P, Building Conservation, <http://www.buildingconservation.com>. Acessado em maio, 2015.
- [7] MAGALHÃES, A. C., MUÑOZ, R., ANDRADE, L. S., “Argamassas de cal aérea com metacaulim para uso em alvenarias antigas: um estudo experimental”, In: *Simpósio Brasileiro De Tecnologia Das Argamassas*, São Paulo, São Paulo, Sep., 2017.
- [8] ROGRIGUES, M. P. S.F.F., *Argamassas de revestimento para alvenarias antigas- Contribuição para o estudo da influência dos ligantes*, Dissertação de M.Sc., Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2004.
- [9] VELOSA, A. L., ROCHA, F., VEIGA, M. R., “Influence of chemical and mineralogical composition of metakaolin on mortars characteristics”, *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, v.6, n. 1, pp.121-126, Jan., 2009.
- [10] MOTA, J. M. F., CARASEK, H., COSTA e SILVA, A. J., *et al.*, “Argamassas inorgânicas com adição de meta caulim”, In: *Simpósio Brasileiro De Tecnologia Das Argamassas*, Belo Horizonte, Minas Gerais, Sep., 2011.
- [11] GAMEIRO, A.L., SILVA, A.S., VEIGA, M.R., *et al.*, “Lime–metakaolin hydration products: a microscopy analysis”, *Materials and technology*, v.46, n. 2, pp.145–148, March, 2012.
- [12] GRILO J., SILVA, A., FARIA, P., *et al.*, “Mechanical and mineralogical properties of natural hydraulic lime-metakaolin mortars in different curing conditions”, *Construction and Building Materials*, v.51, pp.287–294, Jan., 2014.
- [13] VEIGA, M.R. “*Argamassas de cal e metacaulino para revestimento de paredes antigas: características do revestimento aplicado*”, In: Velosa A., Rocha F.T., Cachim P. (eds), *Metacaulino em Portugal. Produção, Aplicação e Sustentabilidade*, ed., chapter 7, Aveiro, Portugal, IUC, 2013.
- [14] FARIA P., MARTINS A., “Influence of Air Lime type and Curing Conditions on Lime and Lime-Metakaolin Mortars”, *Durability of Building Materials and Components*, v. 3, pp.105-126, July, 2013.
- [15] FELGUEIRAS, N. M. N., Avaliação da evolução das características de argamassas de cal aérea com diferentes teores de metacaulino sujeitas a ambientes de diferente humidade relativa, Dissertação de M.Sc., Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2011.
- [16] CARDOSO, D. B., Argamassas de cais e metacaulino sujeitas a diferentes condições de cura: evolução das características e dos compostos mineralógicos formados com a idade, Dissertação de M.Sc., Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2013.
- [17] SILVA A. S., GAMEIRO A., GRILO J., *et al.*, “Long-term behavior of lime–metakaolin pastes at ambient temperature and humid curing condition”, *Applied Clay Science*, v. 88–89, pp.49-55, Feb., 2014.
- [18] SABIR, B. B., WILD, S., BAI, J., “Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review”, *Cement & Concrete Composites*, v. 23, n.6, pp. 441-454, Dec., 2001.
- [19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 45 - Agregado: Determinação de massa unitária e volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.
- [20] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 23 - Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2000.
- [21] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248 - Agregados: Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

[22] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15894-3 – Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta Parte 3: Determinação da finura por meio da peneira 45 µm. Rio de Janeiro, 2010.

[23] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR13276 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005.

[24] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13279 - Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos- Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

[25] VINAGRE, A. I. B., “Estudo comparativo entre argamassas de cal calcítica e de cal dolomítica: características mecânicas, físicas, mineralógicas e microestruturais”, Dissertação de M.Sc., Escola de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Évora, Évora, Portugal, 2015.

#### **ORCID**

Flávia Costa de Mattos <https://orcid.org/0000-0002-9281-5893>

Margarete Regina Freitas Gonçalves <https://orcid.org/0000-0001-6834-8546>