

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Centro de Desenvolvimento Tecnológico
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais



TESE

Análise da influência da pozolana metacaulim no desempenho de argamassas de cal destinadas ao restauro de revestimentos externos de prédios históricos

Flávia Costa de Mattos

Pelotas, 2018.

Flávia Costa de Mattos

Análise da influência da pozolana metacaulim no desempenho de argamassas de cal destinadas ao restauro de revestimentos externos de prédios históricos

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, do Centro de Desenvolvimento Tecnológico da Universidade Federal de Pelotas como requisito parcial à obtenção do grau de Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientadora: Profa. Dra. Margarete Regina Freitas Gonçalves

Pelotas, 2018.

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

M435a Mattos, Flávia Costa de

Análise da influência da pozolana metacaulim no desempenho de argamassas de cal destinadas ao restauro de revestimentos externos de prédios históricos / Flávia Costa de Mattos ; Margarete Regina de Freitas Gonçalves, orientadora. — Pelotas, 2018.

174 f. : il.

Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, 2018.

1. Restauro. 2. Argamassa. 3. Cal aérea hidratada. 4. Metacaulim. I. Gonçalves, Margarete Regina de Freitas, orient. II. Título.

CDD : 620.11063

Elaborada por Maria Inez Figueiredo Figs Machado CRB: 10/1612

Flávia Costa de Mattos

Análise da influência da pozolana metacaulim no desempenho de argamassas de cal destinadas ao restauro de revestimentos externos de prédios históricos

Tese aprovada, como requisito parcial, para a obtenção de grau de Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas.

Data de defesa: 14 de dezembro de 2018.

Banca examinadora:

.....
Prof.a. Dra. Margarete Regina Freitas Gonçalves – UFPel (Orientadora)
Doutora em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

.....
Prof.a. Dra. Ariela da Silva Torres – UFPel
Doutora em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

.....
Prof.a. Dra. Maria Tereza Pouey – UFPel
Doutora em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

.....
Prof.a. Dra. Daniela Baltz da Fonseca – UFPel
Doutora em Memória Social e Patrimônio Cultural pela Universidade Federal de Pelotas

.....
Prof.a. Dra. Bianca Pereira Moreira Ozório– FURG
Doutora em Engenharia de Estruturas pela Universidade de São Paulo

Para vocês, Chico e Otávio, amores da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, por insistirem no tema que educação é tudo.

Ao meu marido, amigo e incentivador de todos meus projetos pessoais.

À D. Iara e à Maria, pelos cuidados dispensados ao Otávio na minha ausência.

À minha orientadora Margarete, que não mediu esforços em me auxiliar e amparar nos momentos de grandes dúvidas.

Ao professor Cezar Bastos, Diretor da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande, pela disponibilização das instalações do Laboratório de Construção Civil e Geotecnia para a realização dos ensaios.

Aos técnicos e laboratoristas do Laboratório de Construção Civil e Geotecnia da Escola de Engenharia, Engenheiros Júlio, Luciano e Régis, pelo auxílio na execução dos ensaios.

Ao professor Dr. Carlos Casanova, do curso de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia, pela ajuda na confecção e usinagem das peças para os ensaios mecânicos.

Ao professor Dr. Jorge Luis Braz Medeiros pela orientação e execução do ensaio de névoa salina.

Aos amigos do Laboratório de Análise de Tensões- POLICAB do curso de Engenharia Mecânica da FURG, Devanir e Tales pela realização dos ensaios mecânicos e, a Veridiana do laboratório da Engenharia de Oceânica da Escola de Engenharia na FURG, pelos ensaios de granulometria a laser.

Ao Rudmar e a Caroline, do Centro de Microscopia Eletrônica- CEME-SUL, da Universidade Federal do Rio Grande.

À professora Dra. Maria do Rosário Veiga, Investigadora Principal do Laboratório Nacional de Engenharia Civil em Lisboa, pelas contribuições valiosas.

À UFPel pela acolhida.

Ao meu querido anjo-da-guarda que me guiou sempre pelo bom caminho!

Obrigada!

*“Tudo é uma questão de manter a mente quieta, a espinha
ereta e o coração tranquilo.”
(Walter Franco)*

RESUMO

MATTOS, Flávia Costa de. **Análise da influência da pozolana metacaulim no desempenho de argamassas de cal destinadas ao restauro de revestimentos externos de prédios históricos.** 2018. 174f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2018.

O presente trabalho tem por finalidade enfatizar a importância do conhecimento das características físicas, químicas e mecânicas, bem como, da compatibilidade para aplicação de argamassa de cal aérea hidratada com pozolana, em processos de reabilitação e conservação de prédios de interesse histórico. O estudo das argamassas de revestimento externo de alguns prédios históricos da cidade do Rio Grande, município localizado ao sul do Brasil, balizou a seleção da matéria-prima quanto às características da granulometria do agregado e da composição mineralógica destas argamassas. As novas argamassas, foram avaliadas quanto a influência da substituição parcial (10%) da massa de cal aérea por dois tipos de metacaulins, com traço 1:4 (aglomerante:agregado). Um conjunto de ensaios mecânicos e físicos foi realizado sobre as novas argamassas, permitindo estabelecer a sua adequação para uso nestes prédios. A evolução das características de resistência mecânica e comportamento frente a exposição à água, na forma líquida e de vapor, foi analisada dos 28 aos 540 dias de cura, com ensaios em idades intermediárias. O sistema de cura adotado teve por objetivo obter as condições mais próximas da realidade, em que os corpos de prova, após desformados, permaneceram em uma sala climatizada com umidade e temperatura de $80\pm 5\%$ e $20\pm 2^{\circ}\text{C}$, respectivamente, até completar 28 dias, momento em que foram expostos ao ar livre, protegidos apenas da incidência direta da chuva. Foi possível identificar que a presença do metacaulim nas argamassas influenciou, positivamente, nos primeiros dias de cura devido à reação pozolânica, apresentando maior resistência à compressão e facilidade no manuseio dos corpos de prova. As fases cristalinas observadas através de DRX, ao longo da pesquisa, indicaram a prevalência da reação de carbonatação sobre a reação pozolânica, ocorrida em menor escala, devido as condições de cura adotadas. Na análise microestrutural foram identificadas as morfologias próprias das argamassas de cal dolomítica (hidromagnesita) e do metacaulim (aluminato de cálcio hidratado). Ao final da pesquisa, no estado endurecido, os resultados obtidos demonstraram que a argamassa de referência apresentou valores de resistência mecânica superior aos das argamassas com metacaulim. No entanto, na análise global, as argamassas com metacaulim apresentaram valores de resistência mecânica compatível para a utilização em restauro de revestimento externo e melhor desempenho frente ao ataque de névoa salina, devido ao refinamento na rede de poros.

Palavras-chave: restauro, argamassa, cal aérea hidratada, metacaulim

ABSTRACT

MATTOS, Flávia Costa de. **Analysis of the influence of metakaolin pozzolan on the performance of lime mortars aiming at the restoration of external coverings of historic buildings**. 2018. 174p. Thesis (Doctoral Degree in Science and Material Engineering) - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2018.

This study aims at highlighting the importance of knowing physical, chemical and mechanical characteristics of aerial lime-based mortars hydrated with pozzolan, as well as their compatibility with rehabilitation and preservation processes of historic buildings. The study of mortars for external covering of some historic buildings in Rio Grande, a city located in the south of Brazil, defined the selection of raw material in terms of characteristics of granulometry of the aggregate and mineralogical composition of these mortars. New mortars were evaluated in relation to the influence of partial replacement (10%) of aerial lime mass for two types of metakaolin with trace 1:4 (binder:aggregate). New mortars were submitted to a set of mechanical and physical assays so as to establish whether they were adequate for these buildings. Evolution of characteristics of mechanical strength and of behavior towards exposure to water, both in liquid and vapor forms, was analyzed on the 28th and 540th curing days, and assays were carried out at intermediate ages. The curing system aimed at achieving realistic conditions in which specimens – after having been unmolded – were kept in a climatized room at $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ and $80\pm 5\%$ humidity, up to 28 days. Afterwards, they were kept outdoors, with no direct exposure to rain. Metakaolin in the mortars exerted positive influence on the first curing days, due to the pozzolanic reaction, and led to higher compressive strength and easy handling of specimens. Crystalline phases observed by XRD throughout the study showed the prevalence of the carbonation reaction, while the pozzolanic reaction occurred on a small scale, as the result of the curing conditions. The microstructural analysis identified the morphologies of dolomitic lime mortars (hydromagnesite) and of metakaolin (hydrated calcium aluminate). At the end of the study, when the mortar of reference was hardened, results showed that its values of mechanical strength were higher than the ones of mortars with metakaolin. However, in the global analysis, values of mechanical strength shown by mortars with metakaolin were adequate for restoration of external coverings. These mortars also had better performance against salt spray, due to the refinement in their pore structure.

Key-words: restoration, mortar, hydrated aerial lime, metakaolin

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Ações não estruturais nas argamassas de revestimento.	36
Figura 2- Ciclo da cal aérea.....	49
Figura 3- Esquema de reação pozolânica.	59
Figura 4- Etapas desenvolvidas na parte experimental da pesquisa.....	71
Figura 5- Centro Municipal de Cultura (1914), prédio localizado na Rua Marechal Floriano Peixoto, 91. Imagens do local e da posição de extração da amostra do revestimento.	72
Figura 6- Fábrica Rheingantz (1873), prédio localizado na Avenida Rheingantz. Imóvel Tombado pelo IPHAE. Processo nº2778-1100/95-1. Imagens do local e da posição de extração da amostra do revestimento.....	72
Figura 7- Creche da fábrica Rheingantz, prédio localizado na Avenida Rheingantz. Imóvel Tombado pelo IPHAE. Processo nº2778-1100/95-1. Imagens do local e da posição de extração da amostra do revestimento.	73
Figura 8- Dissolução ácida das amostras coletadas.....	74
Figura 9- Filtragem do resíduo através de lavagem.	74
Figura 10- Resíduo insolúvel das argamassas.....	75
Figura 11- Curvas granulométricas dos agregados das amostras obtidas dos prédios analisados.....	76
Figura 12- Difractogramas das amostras das argamassas antigas.....	77
Figura 13- Organograma de ensaios para a cal hidratada.....	78
Figura 14- Esquema de determinação do teor de CO ₂	79
Figura 15- Curva granulométrica da cal hidratada.....	80
Figura 16- Difração de raio X da cal hidratada.	81
Figura 17- Organograma de ensaios para o agregado miúdo.	82
Figura 18- Curva granulométrica do agregado miúdo.	84
Figura 19- Difração de raio X do agregado miúdo.	84
Figura 20- Organograma de ensaios para os metacaulins utilizados.	85
Figura 21- Apresentação dos metacaulins utilizados.....	85
Figura 22- Curvas granulométricas dos metacaulins.....	86
Figura 23- Difração de raio X dos metacaulins.....	87

Figura 24- Processo de maturação da cal. (A) Homogeneização da cal hidratada com água, (B) Consistência final da pasta.	88
Figura 25- Curvas granulométricas da areia utilizada e dos prédios históricos analisados.....	89
Figura 26- Curvas granulométricas dos materiais utilizados na formulação das novas argamassas.	90
Figura 27- Processo de mistura e homogeneização das matérias-primas utilizadas nas formulações das novas argamassas.	92
Figura 28- Processo de moldagem dos corpos de prova. (A) preenchimento e adensamento, (B) corpos de prova preenchidos: prismáticos, cilíndricos e circulares.	93
Figura 29-Identificação esquemática dos corpos de prova.....	93
Figura 30- Processo inicial de cura dos corpos de prova. (A) fôrmas prismáticas cobertas com filme plástico, (B) fôrmas cilíndricas cobertas com tampa acrílica.	94
Figura 31- Processo de cura dos corpos de prova. (A) ambiente interno no laboratório, (B) ambiente externo ao laboratório.	94
Figura 32- Organograma dos ensaios realizados nas argamassas no estado fresco.	95
Figura 33- Organograma dos ensaios realizados nas argamassas no estado endurecido.....	97
Figura 34- Ensaio de resistência mecânica. (A) Tração na flexão, (B) Compressão.....	98
Figura 35- Ensaio de absorção de água por capilaridade. (A) nivelamento do cesto, (B) aferição da lâmina de água.....	100
Figura 36- Ensaio de absorção de água por capilaridade. (A) após 4 minutos iniciais do início do ensaio, (B) término do ensaio.....	100
Figura 37- Pesagem hidrostática dos corpos de prova após o processo de imersão total e fervura.....	101
Figura 38- Curva típica de secagem de materiais porosos.....	102
Figura 39- Esquema adotado para o ensaio de permeabilidade ao vapor e imagem das amostras preparadas para o ensaio.	104
Figura 40- Ensaio de permeabilidade ao vapor. Corpos de prova no interior da câmara de climatização.	105
Figura 41- Ensaio de exposição à névoa salina. (A) equipamento de ensaio, (B) amostras na câmara de salinização.	106

Figura 42- Variação de massa das argamassas durante o período de 180 dias....	111
Figura 43- Evolução da resistência à compressão ao longo de 540 dias.....	113
Figura 44- Evolução da resistência à tração na flexão ao longo de 540 dias.....	114
Figura 45- Profundidade de carbonatação das argamassas testadas.....	117
Figura 46 – Absorção de água por capilaridade das argamassas testadas.....	120
Figura 47- Curvas de absorção de água por capilaridade.....	121
Figura 48- Comparação das curvas de absorção de água por capilaridade nos 90 e 365 dias.....	122
Figura 49- Resultados do índice de vazios, absorção de água e massa específica real aos 365 dias.....	125
Figura 50- Curvas de secagem das argamassas estudadas com 365 dias de cura.....	126
Figura 51- Representação do ganho de massa no ensaio de permeabilidade ao vapor.....	127
Figura 52- Teor de cloretos retidos nas argamassas estudadas, testadas aos 120,180 e 365 dias de cura.....	128
Figura 53- Ciclos de saturação e secagem das argamassas testadas após exposição a névoa salina.....	129
Figura 54- Resistência à compressão das argamassas expostas a diferentes condições de salinidade.....	130
Figura 55- Resistência mecânica (Mpa) x cloretos retidos (%)......	131
Figura 56- Difração de Raios-X da argamassa de referência (A): H- halita.....	132
Figura 57- Difração de Raios-X da argamassa com metacaulim (B): H- halita, M- monocarboaluminato, SF- Sal de Friedel.....	133
Figura 58- Difração de Raios-X da argamassa com metacaulim (C): H- halita, M- monocarboaluminato, SF- Sal de Friedel.....	134
Figura 59- Difractogramas das argamassas testadas, obtidos em corpos de prova com 28 dias de cura.....	135
Figura 60- Difractogramas das argamassas testadas, obtidos em corpos de prova ao longo de 540 dias de cura.....	137
Figura 61- Micrografias da argamassa A. Amostra com 180 dias na cura (A); amostra com 540 dias de cura (B) e elementos químicos identificados por EDS na amostra com 180 dias (C).	139

Figura 62- Micrografias da argamassa B. Amostra com 180 dias na cura (A); amostra com 540 dias de cura (B) e elementos químicos identificados por EDS na amostra com 180 dias (C).	140
Figura 63- Micrografias da argamassa C. Amostra com 180 dias na cura (A); amostra com 540 dias de cura (B) e elementos químicos identificados por EDS na amostra com 180 dias (C).	141
Figura 64- Análise conjunta das propriedades das argamassas frente a ação da água.	144
Figura 65- Correlação entre coeficiente de capilaridade, absorção de água e teor de cloretos retidos.	145
Figura 66- Variação do teor de cloretos retidos nas argamassas analisadas aos 365 dias de cura.	145

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Algumas propriedades físicas e mecânicas de argamassa antigas.....	31
Tabela 2- Requisitos funcionais versus classificação da argamassa.	33
Tabela 3- Requisitos de compatibilidade- características mecânicas.....	34
Tabela 4- Requisitos de compatibilidade- características de comportamento frente à água e ao clima.	34
Tabela 5- Requisitos de compatibilidade das características mecânicas e de comportamento frente à água de argamassas de restauro.	35
Tabela 6- Principais sais solúveis e sua origem.	38
Tabela 7- Produtos decorrentes da degradação por sais.	39
Tabela 8- Pozolanas artificiais.	57
Tabela 9- Requisitos químicos para os materiais pozolânicos.	58
Tabela 10- Requisitos físicos para os materiais pozolânicos.....	58
Tabela 11- Compostos formados a partir da reação da pozolana metacaulim com hidróxido de cálcio.	65
Tabela 12- Resumo dos fatores que influenciam na reação pozolânica.....	67
Tabela 13- Fração solúvel e resíduo insolúvel das argamassas antigas, após ataque ácido	75
Tabela 14- Resultados da análise granulométrica.....	76
Tabela 15- Características físicas da cal hidratada.	81
Tabela 16- Características físicas do agregado miúdo.....	83
Tabela 17- Característica química dos metacaulins.	85
Tabela 18- Resultados das características físicas e químicas dos metacaulins.....	87
Tabela 19- Identificação e composição em volume das famílias das novas argamassas.	90
Tabela 20- Composições em massa utilizadas nas famílias de argamassas.....	91
Tabela 21- Teor de água utilizado no ensaio de consistência das argamassas testadas.	96
Tabela 22- Índice de consistência das argamassas testadas.....	108
Tabela 23- Densidade de massa e teor de ar incorporado das argamassas testadas.	109
Tabela 24- Retenção de água das argamassas.	109

Tabela 25- Retenção de água das argamassas.	110
Tabela 26- Resultado do ensaio de densidade de massa aos 28 dias de cura.....	110
Tabela 27- Resistência à compressão das argamassas testadas.....	112
Tabela 28- Resistência à tração na flexão das argamassas testadas.....	113
Tabela 29- Análise comparativa entre a resistência mecânica das argamassas testadas e as identificadas em trabalhos analisados no referencial teórico.	116
Tabela 30- Evolução da ductilidade das argamassas testadas.	118
Tabela 31- Coeficiente de capilaridade das argamassas testadas.....	119
Tabela 32- Absorção capilar das argamassas testadas.	119
Tabela 33- Índice de vazios das argamassas testadas.	123
Tabela 34- Absorção de água das argamassas testadas.....	124
Tabela 35- Massa específica real das argamassas testadas.	124
Tabela 37- Resultado do ensaio de permeabilidade ao vapor de água das argamassas testadas.	127
Tabela 38- Resultado dos ensaios das argamassas testadas com 365 dias de cura.	143

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	OBJETIVOS.....	24
1.2	ESTRUTURA DA TESE.....	24
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
2.1	ARGAMASSAS ANTIGAS À BASE DE CAL	26
2.1.1	Características químicas, físicas e mecânicas.....	30
2.1.2	Requisitos técnicos para uso em revestimentos	34
2.1.3	Principais agentes de degradação.....	35
2.1.4	Constituição do traço	40
2.2	MATÉRIA-PRIMA	44
2.2.1	Agregado miúdo.....	44
2.2.2	Cal aérea	47
2.2.2.1	Processo de obtenção da cal virgem.....	48
2.2.2.2	Processo de hidratação	50
2.2.2.3	Processo de endurecimento – Carbonatação.....	51
2.2.2.4	Processo de maturação	53
2.2.3	Materiais Pozolânicos	55
2.2.3.1	Reação pozolânica	58
2.2.3.2	Metacaulim	61
2.3	ARGAMASSAS DE CAL AÉREA COM METACAULIM	65
2.3.1	Condições de cura para efetivação da reação cal-metacaulim.....	68
3	MATERIAIS E MÉTODOS	70
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	70
3.2	CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS ANTIGAS	72
3.2.1	Dissolução ácida.....	73
3.2.2	Análise granulométrica	75
3.2.3	Análise mineralógica.....	76
3.3	CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NOVAS.....	78
3.3.1	Matéria-prima.....	78
3.3.1.1	Cal hidratada	78

3.3.1.2	Agregado miúdo	82
3.3.1.3	Metacaulim	85
3.3.2	Produção das novas argamassas.....	87
3.3.2.1	Formulação e preparo	87
3.3.2.2	Obtenção dos corpos de prova.....	92
3.3.2.3	Cura dos corpos de prova.....	93
3.3.3	Caracterização das novas argamassas no estado fresco.....	95
3.3.3.1	Índice de consistência	95
3.3.3.2	Densidade de massa de massa e teor de ar incorporado	96
3.3.3.3	Retenção de água da argamassa.....	96
3.3.4	Caracterização das novas argamassas no estado endurecido.....	97
3.3.4.1	Densidade de massa aparente.....	98
3.3.4.2	Resistência mecânica à tração na flexão e à compressão	98
3.3.4.3	Profundidade de Carbonatação	98
3.3.4.4	Ductilidade	99
3.3.4.5	Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade... 99	
3.3.4.6	Índice de vazios e absorção de água	100
3.3.4.7	Permeabilidade ao vapor de água	103
3.3.4.8	Resistência à névoa salina	105
3.3.4.9	Análise mineralógica.....	107
3.3.4.10	Análise da microestrutura	107
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	108
4.1	CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO FRESCO.....	108
4.2	CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO ENDURECIDO	110
4.2.1	Densidade de massa	110
4.2.2	Resistência mecânica	112
4.2.3	Profundidade de carbonatação.....	117
4.2.4	Ductilidade	118
4.2.5	Coeficiente de capilaridade e de absorção de água por capilaridade... 118	
4.2.6	Índice de Vazios e Absorção de água.....	123
4.2.6.1	Secagem.....	125
4.2.7	Permeabilidade ao vapor de água	126
4.2.8	Exposição a névoa salina	128

4.2.9	Análise mineralógica.....	135
4.2.10	Análise da microestrutura.....	138
4.2.11	Síntese dos resultados no estado endurecido.....	142
5	CONCLUSÕES	146
6	TRABALHOS FUTUROS.....	149
	REFERÊNCIAS.....	150
	ANEXO A.....	163
	ANEXO B.....	165
	ANEXO C.....	167
	ANEXO D.....	168

1 Introdução

Atualmente a manutenção de edificações históricas tem sido tema de diversos estudos, sendo esta iniciativa fundamental para a permanência da memória e identidade cultural de um povo, contribuindo também para o desenvolvimento do turismo e democratização dos espaços culturais.

A durabilidade desses prédios históricos já era abordada pelos antigos construtores e tratadistas e, ratificada na Carta de Veneza de 1964, sendo este o documento mais importante do século XX no que se refere a conservação, manutenção, reabilitação e restauro do patrimônio arquitetônico, especificamente, dois artigos merecem especial destaque, a seguinte aprovação:

Artigo 4º - A conservação dos monumentos exige, antes de tudo, manutenção permanente” (p. 2).

Artigo 10º - Quando as técnicas tradicionais se revelarem inadequadas, a consolidação de um monumento pode ser assegurada através do recurso a outras técnicas modernas de conservação e de construção, desde que a sua eficácia tenha sido comprovada por dados científicos e garantida pela experiência (p. 3).

Para Brandi, um dos principais nomes da restauração de objetos de arte do século XX, em sua principal obra a Teoria da Restauração, a durabilidade dos prédios históricos é abordada através de dois axiomas, que influenciaram na elaboração da Carta de Restauro Italiana de 1972 e na prática atual do restauro, sendo estes:

1º axioma - restaura-se somente a matéria da obra de arte (p. 31);

2º axioma - a restauração deve visar ao restabelecimento da unidade potencial da obra de arte, desde que isso seja possível sem cometer um falso artístico ou um falso histórico, e sem cancelar nenhum traço da passagem da obra de arte no tempo (BRANDI, 2014, p. 33).

Ainda, segundo Brandi (2014), o conceito de restauro é entendido como “qualquer intervenção voltada a dar nova eficiência a um produto da atividade

humana” (p. 25) e que, mesmo se utilizando dos mesmos materiais, a passagem do tempo deverá permanecer na sua história.

[...] pelo fato de a matéria ser a mesma: a matéria não será de modo algum a mesma, mas, sendo historicizada pela obra atual do homem, [...] e, por mais que seja quimicamente a mesma, será diversa e acabará, do mesmo modo, por constituir um falso histórico e estético (BRANDI, 2014, p. 38).

Os imóveis com idades avançadas, muitas vezes acima de 100 anos, em perfeitas condições de estabilidade estrutural remetem a reflexões sobre as técnicas construtivas e materiais utilizados no passado e no quanto as intervenções equivocadas e sem embasamento técnico feitas nesses imóveis acabam acelerando o processo de degradação da obra e muitas vezes levando a perda total, por falta de conhecimento dos materiais e das técnicas construtivas da época da construção (MAGALHÃES, 2002; VEIGA, 2003; VELOSA, 2006; SANTIAGO, 2007; KANAN, 2008; RECENA, 2014). Nesses prédios, por estarem expostos a ações destrutivas, os revestimentos são os primeiros a mostrar degradação, não só pelo aspecto estético que conferem a edificação, como, também, pela sua função de camada protetora da estrutura as intervenções de conservação e reabilitação desses elementos são objeto de inúmeras pesquisas.

Neste sentido, um crescente interesse no uso de argamassas à base de cal para a restauração de revestimentos de fachadas de prédios históricas tem sido observado em pesquisas em âmbito nacional e internacional, como o ICOMOS¹ ou o ICCROM², que recomendam o uso de materiais similares, em composição e propriedades, aos originais para os trabalhos de restauro (LANAS; ALVAREZ, 2003).

No âmbito das argamassas de restauro estas colocações servem para nortear os aspectos relativos a compatibilidade estética e funcional, e pela busca de harmonia e equilíbrio dos materiais empregados com o suporte onde serão aplicados (RECENA, 2014; VEIGA, 2005, 2013).

Segundo Rodrigues (2004), a réplica exata da formulação de uma argamassa não é apropriada e nem é possível, mesmo que conhecida, tendo em vista que,

¹ Conselho Internacional dos Monumentos e Sítios. Organização não-governamental de âmbito internacional, fundada em 1965, dedicada à conservação, proteção e valorização dos monumentos, conjuntos e sítio de todo o mundo. Possui como documento fundador o resultado da assinatura da Carta de Veneza.

² Centro Internacional de Estudos para a Conservação e Restauro de Bens Culturais. Organização não-governamental mundial associada à UNESCO, que se dedica a promover a teoria, a metodologia e a tecnologia aplicada à conservação.

geralmente, a base já não apresenta as características originais devido a ação do tempo, ao envelhecimento natural e ao grau de deterioração que estão sujeitas.

Também, os autores Veiga (2003), Kanan (2008) e Magalhães; Silva e Veiga (2011) afirmam em suas pesquisas que uma argamassa que sobreviveu vários séculos ou décadas envelhece e traz mudanças em sua microestrutura, acarretando variações de natureza química e física ao longo do tempo, determinando desta forma, modificações de acordo com as propriedades dos materiais e natureza, intensidade e frequência dos agentes de degradação.

Reforçam estas observações as especificações propostas por Recena (2014) para o desenvolvimento de um projeto de restauro, o qual deve ser pautado na especificação dos materiais, relacionando natureza e desempenho, tendo em vista que o material atual pode não reproduzir as características do original, e nem levar em consideração o efeito do tempo, do envelhecimento natural e das alterações espontâneas.

A elaboração da dosagem de uma argamassa de restauro para uso em um prédio histórico deve ter como norte a compatibilidade entre o material antigo e o novo. De acordo com Veiga (2003) os critérios de compatibilidade abrangem diversos requisitos, assim expostos:

As texturas e cores tão características, os materiais seleccionados, a tecnologia usada - a boa arte de executar e aplicar, cujos segredos são, hoje, difíceis de penetrar -, o bom funcionamento global das paredes gerado pela compatibilidade de materiais e de soluções construtivas, merecem ser preservados, não só porque fazem parte da nossa história e da nossa memória colectiva e caracterizam ambientes, mas também porque são importantes objectos de estudo da própria historia dos materiais e das tecnologias da construção (VEIGA, 2003, p. 2).

Para Van Balen *et al.* (2005), os requisitos de compatibilidade de uma argamassa se referem ao comportamento similar das argamassas antigas e ao substrato, sem promover ou agravar um dano, conduzindo a obtenção dos mencionados requisitos técnicos e funcionais como durabilidade, sustentabilidade e harmonização. Explicam os autores que quanto a durabilidade e custos, os restauros precisam ser viáveis na medida em que precisam resistir ao intemperismo ou aos agentes agressivos; quanto a sustentabilidade, devem ser usados materiais locais, requerendo menos energia para a produção e; quanto a harmonização e estética, deve-se usar materiais, técnicas e procedimentos que compatibilizem o antigo com o novo.

Veiga (2003, 2005) ratifica que as exigências funcionais para rebocos antigos são diferentes das exigências dos rebocos atuais, uma vez que os primeiros devem apresentar menor resistência mecânica, maior deformabilidade, aderência moderada e extensa, permeabilidade ao vapor de água mais elevada com maior capilaridade e teor reduzido de sais solúveis. A autora explica que é muito difícil especificar argamassas de substituição completamente compatíveis com os elementos pré-existentes, visto ser dependente de muitos fatores, recomendando sempre que possível evitar a substituição, recorrendo a operações de reparos pontuais.

De acordo com Aggelakopoulou; Bakolas e Moropoulou (2011), Arizzi e Cultrone (2012a) e Gameiro *et al.* (2014), 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, também, vulnerabilidade a agentes atmosféricos. Esses fatores motivaram 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.

Tais fatores elencam as razões apontadas para o uso de materiais pozolânicos em argamassas de cal, sobretudo em casos específicos, como nos locais com presença de água ou dificuldade de acesso de CO₂, onde a adoção de argamassas de cimento não é a mais adequada, 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 (COLLEPARDI, 1990; GIBBONS, 1997; MAGALHÃES; MUÑOZ; ANDRADE, 2017).

Além do incremento nas propriedades mecânicas e físicas, a utilização de pozolana artificial, como o metacaulim, por exemplo, se alinha com a adoção de práticas construtivas sustentáveis, visto que sua produção libera menos dióxido de carbono para a atmosfera se comparada com a produção do cimento Portland e, também, pela menor absorção de CO₂ durante a carbonatação das argamassas (VELOSA; ROCHA; VEIGA, 2009a).

Somada as dificuldades de reconstituição dos traços de argamassa de cal, tem-se a situação das condições de exposição do revestimento dos prédios históricos em ambientes salinizados, como os marítimos. Nesses locais, uma série de solicitações que influenciam na durabilidade das argamassas de restauro devem ser abordadas,

como ação do vento, ciclos de molhagem e secagem, gradientes térmicos, ação da água através de capilaridade ou condensação, etc.

Para Mehta e Monteiro (2008) a penetração de cloretos ocorre em regiões litorâneas pela exposição à água do mar direta ou indiretamente, através do vento que pode carregar a névoa salina por alguns quilômetros da costa para o interior.

Diante das considerações acima apontadas, desenvolveu-se o presente trabalho que analisou e caracterizou uma argamassa de cal aérea proposta para uso na reconstituição de revestimento externo de prédios históricos existentes na cidade do Rio Grande, RS, que além de possuir inúmeros prédios históricos, está localizada em uma condição geográfica propícia a contaminação por sais, visto que é uma península banhada pela Lagoa dos Patos e pelo Oceano Atlântico.

A hipótese formulada para o desenvolvimento do trabalho foi analisar a influência da substituição parcial da massa de cal aérea por dois tipos de metacaulim, a partir da comparação do comportamento físico, mecânico e de durabilidade dessas argamassas com uma argamassa de referência, expostas às condições ambientais semelhantes ao ambiente da cidade do Rio Grande.

Inicialmente, definiu-se um traço padrão de argamassa de cal aérea, obtido a partir das características de composição química e granulometria extraídas de amostras de argamassas de revestimento de prédios antigos existentes na cidade do Rio Grande. No traço padrão, fez-se substituições de 10% da massa de cal aérea pelos dois tipos de metacaulins.

As argamassas obtidas foram caracterizadas no estado fresco e no estado endurecido e a análise dos resultados foi comparativa entre a argamassa padrão e as argamassas com incorporação dos metacaulins.

No Brasil, pesquisas envolvendo o uso de metacaulim em argamassa de restauro, tendo a cal aérea como único ligante, ainda é inovador, principalmente, em situações de salinização como a existente no contexto geográfico da cidade do Rio Grande, justificando a relevância do desenvolvimento do estudo apresentado nessa tese.

1.1 Objetivos

Objetivo Geral:

O objetivo geral do trabalho foi obter argamassas de cal aérea formuladas com a incorporação de dois diferentes tipos de metacaulim identificando, comparativamente, qual apresenta melhor desempenho mecânico, físico e de durabilidade, visando a sua aplicação como revestimento externo de prédios históricos.

Objetivos específicos:

- Obter uma argamassa de referência, utilizando como parâmetros as características dos constituintes das argamassas de revestimento externo existentes em prédios históricos na cidade de Rio Grande, e caracterizá-la no estado fresco e no estado endurecido;
- Obter argamassas com dois tipos de metacaulim e caracterizá-las no estado fresco e estado endurecido;
- Avaliar a influência da substituição dos dois tipos de metacaulim nas argamassas propostas comparativamente à argamassa referência.

1.2 Estrutura da tese

A estrutura da tese foi organizada com cinco capítulos, assim constituídos:

O primeiro capítulo aborda a introdução e hipótese, objetivo geral e específicos, estrutura da tese.

No segundo capítulo apresenta-se uma revisão sobre as argamassas antigas à base de cal, matérias-primas utilizadas, características e requisitos de argamassa de restauro e um estudo atual referente a argamassas de cal e metacaulim.

No terceiro capítulo tem-se a descrição da parte experimental da pesquisa, com especificação dos materiais e métodos utilizados.

No quarto capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos nos procedimentos experimentais, fazendo ligação e comparações entre características físicas, mecânicas e mineralógicas das argamassas estudadas.

No quinto capítulo apresenta-se as conclusões finais.

Por fim, são apresentadas no sexto capítulo as sugestões para trabalhos futuros, as referências bibliográficas e quatro anexos.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Argamassas antigas à base de cal

Para Veiga (2017) as argamassas de cal foram amplamente utilizadas por muito tempo, em diferentes formas arquitetônicas e composicionais, podendo contar a história da construção, provavelmente, melhor do que qualquer outro material.

Alvarez; Sequeira e Costa (2005) citam que as primeiras argamassas conhecidas foram descobertas na Galiléia, atualmente estado de Israel, com mais de 10.000 anos de existência. Em Jericó (8000 – 7000 a.C.) foi verificada a presença de cal e gesso nas construções e, na mesma época, na Turquia, foi utilizado gesso como reboco de paredes. Mais tarde, argamassas hidráulicas foram encontradas nas cisternas de Jerusalém. Segundo os autores, pesquisas arqueológicas mostraram que a maioria das argamassas romanas utilizava apenas a cal aérea como ligante, endurecendo pela ação do anidrido carbono. Complementam ainda, “[...] A construção da grande Roma, ou seja, da Roma popular, era por isso frágil, não permitindo edifícios de grande porte [...]” (ALVAREZ; SEQUEIRA; COSTA, 2005, p. 3).

Margalha (2011) menciona que os gregos foram os primeiros a utilizar a cal em argamassa de revestimento sendo que, inicialmente, a cal era misturada com a areia e, mais tarde foi adicionada a pedra de Santorini, que é uma pozolana (composto rico em sílicas), resultando em um ligante hidráulico capaz de endurecer mesmo debaixo de água. Cabe salientar a importância dos revestimentos externos nos prédios antigos, visto que por muitos séculos, cumpriram as funções de regularização e proteção (impermeabilização) das alvenarias e das fachadas, contribuindo para a estanqueidade global das paredes externas. Além disto, também, assumiam as funções de proteção das paredes contra ações externas e de suporte de acabamentos, decoração e adornos (VEIGA, 2017; VELOSA, 2006).

De acordo com Torraca (2009 *apud* CARVALHO, 2014) a cal aérea utilizada como aglomerante em argamassas aplicada como revestimento em paredes, foi encontrada no palácio de Knossos por volta de 1700 a. C. A partir desta data, diversos registros dão conta do emprego de argamassas de cal e gesso pelos egípcios, etruscos, fenícios, gregos, incas e romanos (ALVAREZ; SEQUEIRA; COSTA, 2005). Segundo dados da European Mortar Industry Organisation³, as argamassas à base de gesso foram usadas há pelo menos 10.000 anos e, as de cal estima-se que tenham sido produzidas por volta de 6.000 a.C., tendo sido os romanos os que primeiro usaram a cal aérea como constituinte para produzir argamassa.

No entanto, nas obras públicas e do Império, os romanos utilizavam argamassas mais elaboradas, em que era adicionado material pozolânico, implicando melhoria das características dos rebocos, como endurecimento mais rápido e maior resistência mecânica. Além dessas propriedades, as argamassas com pozolanas permitiram construções de obras de maior porte e a introdução das abóbodas e dos arcos abobadados na arquitetura romana, como aquedutos, arcos triunfais, pontes, basílicas, templos, palácios entre outros (ALVAREZ; SEQUEIRA; COSTA, 2005; MARGALHA, 2011).

As argamassas de alta qualidade utilizadas pelos romanos na construção de grandes obras, contavam com outros produtos além da cal, como areia vulcânica (*harena fossicia*, denominação em latim), pozolanas artificiais obtidas a partir de barro moído (telhas, em latim denominado *testa*) e argila caolinítica calcinada, em latim denominado *carbuncules*, a cerca de 800°C (ALVAREZ; SEQUEIRA; COSTA, 2005; SANTIAGO, 2007). Segundo Gibbons (1997), esta era uma prática conhecida pelos construtores romanos, que modificavam as características das argamassas de cal pela adição de materiais contendo silicatos e aluminatos reativos, obtidos dos depósitos vulcânicos de Pozzuoli perto de Nápoles.

No final do Império Romano, de acordo com Alvarez; Sequeira e Costa (2005), devido a problemas econômicos passou-se a utilizar uma argamassa de pior qualidade, com reduzida porcentagem de cal e maior quantidade de areia e argila. Estas argamassas foram observadas em construções da Idade Média, como a catedral de Leon, na França.

³ European Mortar Industry Organisation – EMO- History of Mortar Disponível em: <http://www.euromortar.com/product-range/mortar/history-of-mortar/> Acesso em: 30 jun. 2017.

Alvarez; Sequeira e Costa (2005) relatam o uso de pozolanas há cerca de 1.250 a.C., quando ocorreu a explosão da parte superior da cratera do vulcão Tera, situado na ilha de Santorini, em que as cinzas podem ter atingido 300 mil quilômetros quadrados. As cinzas resultantes da erupção do vulcão Tera e, mais tarde, do vulcão Vesúvio na baía de Nápoles, foram integradas na formulação de argamassas e tiveram um papel decisivo nas civilizações clássicas grego-romano, com a melhoria na qualidade devido a adição de aluminatos e silicatos reativos, provenientes das pozolanas, destacando três tipos de argamassa produzidas pelos romanos (ALVAREZ; SEQUEIRA; COSTA, 2005, p. 5):

- Opus cementicium, composição mais generalizada das argamassas utilizadas pelos arquitetos romanos. Era formada por cal, misturada com areia e pozolana, ou pedaços de tijolo ou turfa.
- Coccio pisto, argamassa resultante de uma mistura de cal com pedaços de tijolo.
- Opus Signinum, uma argamassa na qual era utilizada um tipo de areia proveniente do norte de Roma denominada por Carbunculus, (argila caolítica) calcinada a cerca de 800 °C. Caracterizava-se pela sua enorme dureza. Por isso era usada preferencialmente em cisternas, salgadeiras, tanques de água e fontes.

Os autores, também, relatam que no século VIII o gesso foi introduzido pelos árabes na Europa, trazendo importantes modificações nas propriedades das argamassas; no século XVII foi descoberta na Alemanha grande extensão turfa⁴, que moídas resultava em um produto semelhante as pozolanas para serem empregadas em argamassas.

Gibons (2003) também cita que o uso de cales hidráulicas em conjunto com as pozolanas foi retomado no final do século XVIII, através de estudos de grandes engenheiros, tais como Vicat, Treussart e Smeaton.

Velosa (2006) ao se referir a composição das argamassas no passado, cita a utilização de materiais de obtenção imediata, como a terra, lama e fibras vegetais. A autora relata o uso do gesso como um dos primeiros produtos a ser utilizado como ligante, como também, o uso de argamassas de asfalto já terem ocorrido desde 3000 a.C.. Complementa, que o uso da cal como resultante de processos de calcinação é conhecido desde 4000 a.C., e que existem registros de calcinação e utilização de rebocos e pavimentos com cal desde o período neolítico.

⁴ Um tipo de pozolana extraída da Renânia, Alemanha.

A primeira referência encontrada por Santiago (2007) sobre o emprego de argamassas, consta no Tratado de Agricultura intitulado *Rerum rusticarum*, escrito pelo historiador e soldado romano Marco Terencio Varrão (116-27 a.C.), no qual informa a utilização de argamassas hidrófugas para a proteção do trigo contra a ação da umidade e contra roedores. Para a autora, o conhecimento de argamassas históricas reporta às indicações de Vitrúvio⁵, no que diz respeito à constituição, finalidade e proporção entre as diversas composições das argamassas de cal, presente na maioria dos monumentos anteriores ao século XX.

Em seu tratado sobre arquitetura, descoberto em 1414, denominado “Os dez livros de arquitetura” Vitrúvio retrata de forma ampla a construção na Época Romana, incluindo os materiais e as técnicas construtivas, sendo considerado o único tratado da Antiguidade que influenciou outros tratadistas, como os autores Renascentistas Alberti⁶ e Palladio⁷ (VELOSA, 2006; SANTIAGO, 2007). Em seu livro, Vitrúvio não dedicou uma parte específica às argamassas, mas mencionou algumas de suas características, assim como detalhes acerca dos traços recomendados no seu preparo (SANTIAGO, 2012).

Para Santiago (2012), Vincenzo Scamozzi⁸ considerava as argamassas como os nervos e a força das construções. Ainda nos dias atuais a definição de argamassas, do latim *arenatum* (ou *harenatum*), segundo a autora, é considerada, de maneira pouco clara como uma mistura de ligante, areia e água.

Segundo a literatura, até o início século XIX, a cal aérea e as pozolanas naturais eram utilizadas como aglomerantes predominantes na produção de argamassas de assentamento, obtendo-se, então, argamassas com características hidráulicas (RODRIGUES, 2004; GIBBONS, 1997; VELOSA, 2006; SANTIAGO, 2012). A partir de 1824, Joseph Aspdin desenvolveu e patenteou o cimento Portland, ligante fabricado através da mistura de cal e argila em forma de pasta calcinadas e moídas (NEWMAN; CHOO, 2003 *apud* JAPIASSÚ, 2011).

Existe um consenso entre autores como Veiga (2003), Velosa (2006), Santiago (2007) e Kanan (2008) que, até o século XIX, tanto na fabricação de argamassas

⁵ VITRUVIO, Marcus Lucius Vitruvius Pollio, arquiteto romano ativo no século I a.C. (46-30 a.C.), autor do mais antigo tratado de arquitetura que chegou aos dias atuais.

⁶ ALBERTI, Leon Battista (1404-1472), Arquiteto, teórico de arte e humanista italiano. Ao estilo do ideal renascentista, foi filósofo da arquitetura e do urbanismo, pintor, músico e escultor.

⁷ PALLADIO, Andrea (1508-1580), Arquiteto e tratadista italiano.

⁸ SCAMOZZI, Vincenzo, foi um arquiteto e teórico de arquitetura italiana (1548-1616).

portuguesas como brasileiras eram utilizadas pozolanas, além de alguns óleos que conferiam propriedades hidrofugantes.

2.1.1 Características químicas, físicas e mecânicas

O conhecimento das características das argamassas antigas nos revestimentos de prédios históricos permite a formulação de novas argamassas com finalidades de proceder à reabilitação ou restauro de prédios antigos. No entanto, conforme relatos de Velosa (2006), Recena (2014), e Rodrigues (2004), a simples obtenção dos parâmetros químicos, físicos e mecânicos destas argamassas não resulta na produção de uma argamassa idêntica à original, tendo em vista a idade, as ações de envelhecimento natural e a deterioração a qual o revestimento esteve sujeito.

Entende Velosa (2006, pg. 67) “que houve uma mutação destas características com o tempo, relacionada com fenômenos como a erosão, poluição atmosférica e com a própria reação química dos componentes da argamassa entre si e com o suporte”.

Importante observação é citada por Kanan (2008, p.37) quando se refere às argamassas de reintegração e recuperação “[...] não vão repetir obrigatoriamente a composição original da argamassa antiga, mas devem ser formuladas de modo a compatibilizar-se com a estrutura e se adequar às suas necessidades, bem como apresentar boa resistência aos sais solúveis e a outros agentes de degradação [...]”.

Mesmo entendimento aponta Recena (2014) citando a polêmica questão sobre a especificação de materiais em obras de restauro:

Não se pode esperar que um material atual possa reproduzir as características do original e, mesmo que isso fosse possível, por certo, não seria possível reproduzir o efeito do tempo sobre o material, o envelhecimento natural, as alterações espontâneas, a personalidade ou seu caráter (RECENA, 2014, p. 39).

Desta forma, o conhecimento destas características foi sintetizado por Moropoulou *et al.* (2005a, 2005c), com base em um leque de argamassas estudadas, relacionando-as com a sua formulação.

Para a caracterização química das argamassas antigas, Moropoulou *et al.* (2005a) desenvolveu uma metodologia baseada na análise térmica, medindo o

conteúdo em carbonato de cálcio pela libertação de CO₂ e o conteúdo de água de adsorção e água estrutural, conforme tabela 1.

Tabela 1- Algumas propriedades físicas e mecânicas de argamassa antigas.

Tipo de argamassa	Volume (mm ³ /g)	Densidade aparente (g/cm ³)	Dimensão média do poro (μm)	Superfície específica (m ² /g)	Porosidade total (%)	Resistência à tração (MPa)	Traço em massa (lig.:agr.)
Argamassa de cal	170-230	1,5-1,8	0,8-3,3	1,3-3,3	30-45	<0,35	1:4-1:1
Argamassa de cal e cimento Portland	105-241	1,8-1,9	0,03-6,5	1,7-10,6	20-43	0,6-0,7	1:2-1:1
Argamassa de cal hidráulica	90-230	1,7-2,1	0,1-3,5	2,5-13,5	18-40	0,35-0,55	1:4-1:1
Argamassa com pozolana natural	160-265	1,6-1,9	0,1-1,5	3-14	30-42	>0,60	1:5-1:1
Argamassa com pozolana artificial	170-280	1,5-1,9	0,1-0,8	3,5-9	30-40	>0,55	1:3

Fonte: Moropoulou *et al.* (2005a).

A escolha adequada dos materiais a serem utilizados em uma argamassa de substituição tem, como princípio, critérios de compatibilidade física, química, estética e de comportamento em conjunto com o suporte e com os demais elementos existentes, contribuindo para a preservação e durabilidade, sem comprometer o aspecto original do edifício (HENRIQUES; FARIA, 2008; VAN BALEN *et al.*, 2005; VEIGA, 2003).

Para os rebocos externos algumas características são necessárias visando a proteção das alvenarias e evitando ou diminuindo o processo de degradação (VEIGA, 2003; RODRIGUES, 2004; VAN BALEN *et al.*, 2005; HENRIQUES; FARIA, 2008; COELHO; TORGAL; JALALI, 2009;), tais como:

- A absorção capilar de água deve ser a moderada, no entanto, com facilidade na secagem;
- A permeabilidade ao vapor de água deve ser alta, a fim de evitar que ocorra condensação de água no interior da alvenaria, permitindo que a parede seque, eliminando a água por evaporação;
- A estrutura porosa deve ter predominância de pequenos poros, embora este fato implique em aumento no coeficiente de capilaridade;

- Resistência mecânica suficiente para realizar a função de proteção contra ações mecânicas de choque e erosão, com reduzido módulo de elasticidade;
- Resistência aos sais solúveis, sendo estes muito comuns em paredes antigas;
- Aderência ao suporte é essencial para a proteção da alvenaria, estando esta característica relacionada diretamente com a resistência mecânica;
- Resistência a ciclos de calor/frio, calor/água e água/gelo;
- Compatibilidade de cor, textura e brilho com as argamassas pré-existentes.

Kanan (2008) e Rodrigues (2004) afirmam que entre as exigências funcionais das argamassas de cal a porosidade é um importante parâmetro, incidindo no comportamento higroscópico com repercussão na durabilidade e na resistência mecânica controlando, também o fluxo de água (retenção e evaporação da umidade) e a penetração do ar, responsável pela carbonatação do hidróxido de cálcio.

De acordo com a função da aplicação, diversos requisitos podem ser exigidos com diferentes níveis de importância. No contexto de argamassas históricas, Hughes (2010) apresentou a classificação da importância dos requisitos funcionais para diferentes tipos de argamassas, como consta na tabela 2. Na tabela, é possível observar a importância dada aos requisitos vinculados ao comportamento frente à água.

Tabela 2- Requisitos funcionais versus classificação da argamassa.

TIPOS DE ARGAMASSAS					
Requisito	Assentamento	Rejunte	Revestimento externo	Reparo	Revestimento interno
Aderência	3	3	3	2	3
Resistência (compressão e flexão)	2*	2*	1*	2*	1*
Deformabilidade e elasticidade (E)	3	3	2	3	1
Proteção às intempéries					
Resistência à penetração de água	2	3	3	1	1
Resistência à gelo/desgelo	2	3	3	1	0
Dilatação térmica	1	1	3	1	3
Permeabilidade ao vapor d'água	2	3	3	1	3
Comportamento à molhagem e secagem	2	3	3	0	3
Estética	1	3	3	0	3
* Em relação ao substrato os valores de resistência e deformação da argamassa devem ser menores que da alvenaria					
Classificação 0 = sem importância - 3 = muito importante					

Fonte: Adaptado de Hughes (2010).

Atualmente, as tendências de pesquisas sobre a elaboração de argamassa de restauro correspondem à formulações visando compatibilidade e durabilidade, que é fortemente influenciada pela absorção de água (NUNES; SLÍŽKOVÁ; KŘIVÁNKOVÁ, 2013).

Alvarez; Sequeira e Costa (2005) explicam que as argamassas devem permitir a respiração da parede, no entanto, dificultando a entrada de águas pluviais.

As Argamassas de Reabilitação, devem por um lado, permitir a respiração da parede, dando passagem ao vapor de água, (pelo que é importante a utilização de ligantes com estruturas relativamente abertas e agregados com curvas granulométricas criteriosamente escolhidas), e por outro lado, impedir a passagem de águas pluviais, para que no reboco antigo, normalmente rico em sulfatos e cálcio, estes não venham a ser dissolvidos pela água em circulação no interior da parede e arrastados para a interface, contribuindo para o destacamento do reboco de Reabilitação (ALVAREZ; SEQUEIRA; COSTA, 2005, p. 9).

Veiga (2003) estabeleceu de forma sistemática os requisitos de compatibilidade entre as argamassas de restauro e o substrato, estando estes descritos nas tabelas 3 e 4.

Tabela 3- Requisitos de compatibilidade- características mecânicas.

Argamassa	Características mecânicas aos 90 dias (Mpa)			Aderência ao suporte (Mpa)	Comportamento às forças desenvolvidas por retração restringida (N)
	Resistência à flexão	Resistência à compressão	Módulo de elasticidade		
Reboco externo	Características mecânicas semelhantes às das argamassas originais e inferiores às do suporte.			Resistência ao arrancamento inferior à resistência à tração do suporte.	Força máxima desenvolvida por retração restringida inferior à resistência à tração do suporte.
Reboco interno					
Refechamento de juntas					

Fonte: Adaptado de Veiga (2003).

Tabela 4- Requisitos de compatibilidade- características de comportamento frente à água e ao clima.

Argamassa	Comportamento à água- ensaio clássico aos 90 dias			Comportamento térmico
	Permeabilidade ao vapor d'água	Coefficiente de capilaridade	Porosidade	Características térmicas
Reboco externo	Capilaridade e permeabilidade ao vapor de água semelhantes às argamassas originais e superiores às do suporte.		Porosidade e porosimetria semelhantes às das argamassas originais e com maior percentagem de poros grandes que o suporte.	Coeficiente de dilatação térmica e condutibilidade térmica semelhantes aos das argamassas originais e à do suporte.
Reboco interno				
Refechamento de juntas				

Fonte: Adaptado de Veiga (2003).

2.1.2 Requisitos técnicos para uso em revestimentos

Os revestimentos de paredes, comumente denominados de rebocos, são de utilização muito antiga estando sua qualidade relacionada como fator determinante para a salubridade, conforto, durabilidade e aspecto estético dos edifícios. Além disto, eles também assumem as funções de proteção das paredes contra ações externas, de acabamento e suporte de decoração e adornos (VEIGA, 2017; VELOSA, 2006).

Em seu trabalho Kanan (2008) expõem que o sistema de revestimento com argamassas históricas a base de cal funciona como elemento de sacrifício do edifício, formando uma membrana capaz de absorver agressões atmosféricas e proteger a estrutura interior, que é feita, muitas vezes, com alvenaria excessivamente porosa e irregular.

Vários autores, tais como Magalhães (2002), Veiga (2003, 2005), Kanan (2008) e Recena (2014) também mencionam que, devido à sua localização, os revestimentos externos são os elementos que estão sujeitos as maiores agressões do meio por

estarem expostos à ação direta e continuada de agentes físicos, mecânicos, químicos e biológicos, sendo por isso os primeiros a se degradarem.

Para Veiga (2003) as características a serem observadas para as novas argamassas, a rigor, deveriam ser fundamentadas nas características dos elementos pré-existentes as quais irão interagir. Complementa, afirmando que esta condição é "...possível para construções de elevado valor histórico ou arquitetônico, mas não para a grande maioria dos edifícios antigos..." (VEIGA, 2003, p.10).

Desta forma, baseando-se na experiência acumulada Veiga (2003, 2005, 2013) estabeleceu alguns requisitos de compatibilidade técnica para as argamassas de restauro, apresentados na tabela 5.

Tabela 5- Requisitos de compatibilidade das características mecânicas e de comportamento frente à água de argamassas de restauro.

Tipo de reboco	Características mecânicas aos 90 dias (MPa)				Comportamento à água aos 90 dias	
	Rt	Rc	E	Aderência	S _d (m)	C (kg/m ² .h ^{0,5})
Reboco exterior	0,2-0,7	0,4-2,5	2000-5000	0,1-0,3 ou ruptura coesiva	<0,08	<12,0; >8,0
Reboco interior	0,2-0,7	0,4-2,5	2000-5000	0,1-0,3 ou ruptura coesiva	<0,10	-
Juntas	0,4-0,8	0,6-3,0	3000-6000	0,1-0,5 ou ruptura coesiva	<0,10	<2,05; >8,0

Rt-Resistência à tração, Rc-Resistência à compressão, E- Módulo de elasticidade, S_d- espessura da camada de ar de difusão equivalente, C- Coeficiente de capilaridade

Fonte: Adaptado de Veiga (2003).

2.1.3 Principais agentes de degradação

Nas faces externas dos prédios antigos é comum a identificação de diversas anomalias, visto que estas estão expostas à ação direta dos agentes de degradação que, de forma resumida, podem ser devido às ações estruturais e não estruturais, sendo a segunda bem mais frequente que a primeira (MAGALHÃES, 2002; RODRIGUES, 2004).

Desconsiderando as causas estruturais, alguns dos principais fatores de degradação são: ação do vento, gradiente de temperatura, índice pluviométrico, umidade relativa do ar, ação química da poluição e atmosfera marítima, atuando isolados ou conjuntamente sobre uma edificação.

As ações não estruturais são devidas à ação direta e continuada dos agentes físicos, químicos e biológicos, conforme esquematizado na figura 1.

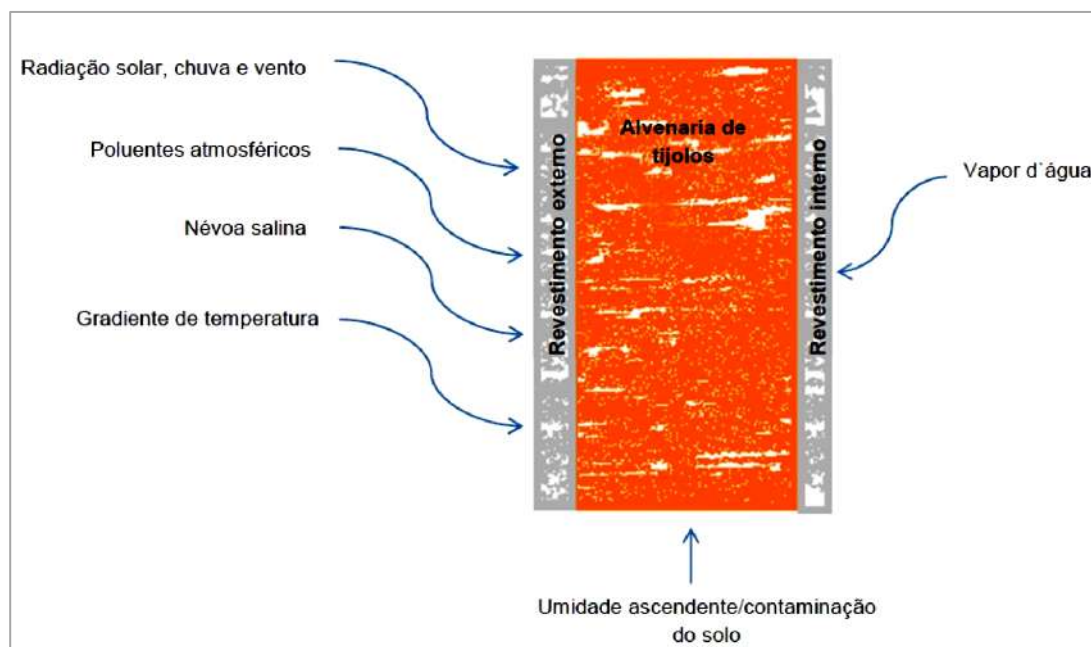


Figura 1- Ações não estruturais nas argamassas de revestimento.

A água é apontada como a principal causa de degradação dos revestimentos (RECENA, 2014; RODRIGUES; GONÇALVES, 2005; MAGALHÃES, 2002).

Magalhães (2002) ainda é mais pontual quando afirma que a água é a causa primária de muitas anomalias e causa secundária de muitas outras.

A manifestação de umidade pode ocorrer na superfície ou no interior do revestimento de paredes, podendo ser oriunda da própria construção, do terreno, de precipitação, condensação entre outros. Qualquer que seja a forma, a umidade possui a capacidade de desencadear processos de degradação, afetando aspectos funcionais e estéticos (ANSELMO, 2012).

Segundo Rodrigues (2004), as consequências principais da presença de água são a diminuição da resistência mecânica, o transporte de sais, o favorecimento de microrganismos e vegetação parasitária devido ao meio úmido.

Recena (2014) afirma que os sais são os principais responsáveis pela deterioração das argamassas de cal, no entanto, seu efeito somente se manifestará a partir da presença de umidade para promover a sua dissolução.

A presença de sais solúveis é percebida através de eflorescências na superfície a partir da existência do fluxo hidráulico e do grau de solubilidade destes sais,

características que determinarão a sua periculosidade e responsabilidade pelos danos (RECENA, 2014; NAPPI; NAPPI; SOUZA, 2013).

Recena (2014) e Hughes (2010) compararam as construções com regiões áridas e semi-áridas da Terra, aonde os episódios de molhagem (dissolução) e secagem (cristalização) conduzem as soluções salinas através da água intersticial, pela evaporação, até a superfície onde ocorre a cristalização destes sais com aumento de volume e expansão. Recena (2014) ainda pontua que, estando o material contaminado permanentemente saturado, em equilíbrio, não ocorrerão as degradações típicas da cristalização.

A água de chuva incidente na fachada também provoca ciclos de molhagem e secagem, quando a camada de pintura deixa de funcionar como elemento de proteção, sendo o processo agravado pelo aumento da pressão horizontal devido a ação do vento. O material dependendo de sua porosidade pode absorver diferentes graus de umidade e, diante do fato dos sais serem higroscópicos, poderá ocorrer absorção de forma diferenciada, principalmente quando a umidade relativa possuir valores superiores a umidade relativa de equilíbrio (RECENA, 2014).

Para Magalhães (2002), Magalhães; Silva e Veiga (2011), Nappi; Nappi e Souza (2013) e Azevedo (2013), os sais ao se dissolverem se cristalizam, devido a alterações de temperatura e umidade, dando origem ao processo de eflorescência e criptoflorescência. Na eflorescência a solução salina chega até a superfície onde evapora e os cristais se desenvolvem nessa superfície, enquanto que, na criptoflorescência os cristais se desenvolvem no interior dos poros induzindo tensões internas, por expansão, podendo rompê-los. É consenso entre os diversos autores que os danos são consideráveis quando os cristais são formados nos poros e nos vasos capilares dos materiais, ou seja, as criptoflorescências têm maior poder destruidor e de afetar a vida útil do material, já que provocam a desagregação.

Para Azevedo (2013) nem todos os sais provocam degradação, dependendo das condições ambientes, características físicas, teor de água do material, etc. Afirma, também, que raramente a deterioração de materiais porosos por ação dos sais solúveis envolve um só sal, podendo estar envolvidos no fenômeno dois ou mais sais.

O tipo de sal é o melhor indicador da sua origem, sendo os mais correntes os expostos na tabela 6.

Tabela 6- Principais sais solúveis e sua origem.

Sal	Origem
Sulfatos- SO_4^-	Poluição atmosférica (chuvas ácidas), solos fertilizados, materiais cerâmicos.
Cloretos- Cl^-	Água do mar (ação direta, salpicos, brisa ou nevoeiro marítimo ou solos contaminados), produtos salgados armazenados nos edifícios, contaminação de solo com resíduo doméstico.
Nitratos- NO_3^-	Solos (fertilizantes orgânicos), excremento de animais, matéria orgânica em decomposição.
Carbonatos- CO_3^-	Reação química, na presença de água, entre os álcalis presentes nas argamassas à base de cimento e o CO_2 da atmosfera.

Fonte: Adaptado de Azevedo (2013).

O cloreto de sódio é um dos sais solúveis mais conhecido e estudado no âmbito da degradação de edifícios antigos. A sua solubilidade, praticamente, não varia com a temperatura e este possui apenas uma forma cristalina, a halita (NaCl).

Já o sulfato de sódio existente nos revestimentos antigos, aplicados em alvenarias de materiais cerâmicos, é o sal de maior solubilidade à temperatura podendo se cristalizar como thenardite na forma anidra (Na_2SO_4), como mirabilite ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) que é a fase estável e como heptahidrato ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) que é uma fase metaestável (AZEVEDO, 2013).

Em estudos sobre as degradações em argamassas antigas ao longo do tempo, Magalhães; Silva e Veiga (2011) pontua que ocorrem rearranjos químicos e físicos entre os materiais, além de alterações nas suas propriedades. Neste complexo processo, existem produtos que se formam com ação benéfica ou nociva, ou ainda, apenas transformação de fase. Os autores citam que os produtos de degradação, frequentemente, encontrados são os sais solúveis conforme apresentados na tabela 7.

Tabela 7- Produtos decorrentes da degradação por sais.

Classificação	Produtos			Origem provável
Degradação	Sais	Cloretos	Cloreto de sódio- Halite (NaCl)	Atmosfera, água infiltrada, água de amassamento.
			Cloreto de cálcio (CaCl ₂)	
			Cloreto de potássio (KCl)	
			Cloreto de magnésio (MgCl ₂)	
		Sulfatos	Sulfato de cálcio- (CaSO ₄ ·2H ₂ O)	Suporte, água de amassamento, água do mar, interação do ácido sulfúrico com a cal aérea, transformação de substâncias orgânicas secretadas por organismos ou microrganismos, interação com ligantes hidráulicos.
			Bassanite- (CaSO ₄ ·0,5H ₂ O)	
			Sulfato de sódio- Thenardite (Na ₂ SO ₄)	
			Arcanite- (K ₂ SO ₄)	
			Singenite- (K ₂ Ca(SO ₄) ₂ ·H ₂ O)	
			Mirabilite- (Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O)	
			Sulfato de magnésio- Epsomite (MgSO ₄ ·7H ₂ O)	
		Kieserite- (MgSO ₄ ·H ₂ O)		
Nitratos	Nitrocalcite (Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O)	Solo, interação do ácido nítrico com a cal aérea, transformação de substâncias orgânicas secretadas por organismos ou microrganismos.		
	Nitromagnesite- (Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O)			
	Niter- (KNO ₃)			
	Nitratite- (NaNO ₃)			
	Nitramite- (NH ₄ NO ₃)			
Carbonatos	Natron- (Na ₂ CO ₃ ·10H ₂ O)	Água infiltrada, interação com ligantes hidráulicos.		
	Termonatrite- (Na ₂ CO ₃ ·H ₂ O)			
	Nacolite- (NaHCO ₃)			
	Trona- (Na ₃ H(CO ₃) ₂ ·H ₂ O)			
	Calcinite- (KHCO ₃)			
Monosulfoaluminato de cálcio- (3Ca·Al ₂ O ₃ ·CaSO ₄ ·12H ₂ O)			Reação entre os sulfatos e os aluminatos provenientes das reações pozolânica.	
Trissulfoaluminato de cálcio- Etringite (3CaO·Al ₂ O ₃ ·3CaSO ₄ ·32H ₂ O)				
Taumasite (CaSiO ₃ ·CaCO ₃ ·CaSO ₄ ·15H ₂ O)			Reação entre sulfatos, silicatos e carbonatos.	
Cloroaluminatos de cálcio hidratado (3CaO·Al ₂ O ₃ ·CaCl ₂ ·10H ₂ O). Sal de Friedel			Reação entre os cloretos e os aluminatos	
Hidróxido de Magnésio- Brucite (Mg(OH) ₂)			Reação entre os constituintes da argamassa e o magnésio.	
Hidromagnesite (Mg ₅ [(CO ₃) ₄ (OH) ₂]4H ₂ O)			Alteração da brucite e magnesite.	

Fonte: Adaptado de Magalhães; Silva e Veiga (2011).

Para as argamassas, o acúmulo dos íons cloretos tem efeito deletério especialmente em função das pressões de cristalização geradas pela alternância no estado cristalino, durante ciclos de molhagem e secagem.

Rodrigues (2004) menciona que as manifestações químicas (eflorescências) estão relacionadas com a reação entre os sais solúveis higroscópicos e outros compostos na alvenaria, enquanto que as físicas (trincas e fissuras), geralmente, são devidas às variações de água no interior dos materiais. A autora também acrescenta que, a patologia física decorrente da cristalização de cloretos é muito comum em edifícios antigos, localizados em ambientes próximos a orla costeira.

De fato, esta situação se agrava nas regiões próximas ao mar, onde o ar que contém cloretos pode ser transportado pelos ventos e percorrer grandes distâncias, dependendo da intensidade do vento e da topografia do terreno. Nesses locais os cloretos presentes no ar se acumulam sob a forma de névoa salina, que se depositam em paramentos e fachadas das construções. A configuração da edificação também influencia o movimento dos sais transportados pelo ar e, os redemoinhos podem fazer com que estes sais alcancem as faces das fachadas opostas ao mar (METHA e MONTEIRO, 1994 *apud* NAPPI; LALANE, 2010).

Os cloretos podem se apresentar sob três formas nas argamassas e concretos endurecidos: quimicamente ligados ao aluminato tricálcico, conhecido como sal de Friedel ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$); os adsorvidos na superfície dos poros e os cloretos livres, sendo estes com ação mais deletéria (MOTA; OLIVEIRA; CARNEIRO, 2016).

É admitido por Rodrigues (2004), Zibara *et al.* (2008) e Figueiredo *et al.* (2014) que o principal mecanismo de fixação de cloretos livres em misturas de cimento Portland é a formação do sal de Friedel e de complexos relacionados aos aluminatos. Nas misturas com a presença de metacaulim, a fixação dos cloretos livres é potencializada em razão da alumina dos componentes pozolânicos.

2.1.4 Constituição do traço

A obra de Santiago (2007) é uma excelente fonte de pesquisa sobre tratados e textos antigos envolvendo argamassas históricas, sobretudo argamassas de cal. Em seus estudos, a autora aborda de forma detalhada um dos mais antigos documentos

que versa sobre argamassas históricas, referindo-se em diversos momentos a obra literária Os dez livros de arquitetura, de Vitrúvio e, sobre contribuições importantes elaboradas por como Plínio⁹, Vincenzo Scamozzi, Palladio, Alberti, Philibert de l'Orme¹⁰ entre outros.

Sob o ponto de vista de antigos tratadistas e dos autores que escreveram sobre o assunto, a composição da argamassa histórica não corresponde à dos dias atuais, nelas era frequente o emprego de: pozolana, material cerâmico pulverizado, limalha de ferro, óleo, cinzas de Tournai¹¹, borra de ferro, pó de tijolo, massapez¹² e cinza de carvão (SANTIAGO, 2007).

Em sua obra, Santiago (2007), cita as recomendações de Alberti, quando tece considerações acerca da restauração dos edifícios, indicando o uso de pasta de cal bastante fluida, misturada com pó de mármore, após lavagem do local com água pura, na renovação do revestimento de uma parede ou pavimento.

Ao analisar a obra de diversos tratadistas, Santiago (2007) observou que não havia regra para a determinação das proporções entre os diversos componentes das argamassas, citando Vitrúvio e Plínio, que não tinham opinião concordante quanto aos traços recomendados. Era sugerido por Vitrúvio o traço 1:3 (cal, areia de jazida) e 1:2 (cal, areia de rio ou mar) enquanto que para Plínio, recomendava o traço 1:4 (cal, areia de jazida) e 1:2 (cal, areia de rio ou mar).

Em contradição com as indicações vitruvianas, Santiago (2007) cita Philibert de l'Orme que indicou o traço vinculando a qualidade das areias, sendo este para areias boas nas proporções 1:5 ou 1:7, para areias ruins nas proporções 1:2 ou 1:3 e para aquelas muito ruins na proporção 1:1.

Como visto a variabilidade na indicação das relações volumétricas de cal:areia davam conta da forma empírica em que eram prescritas, no entanto, levavam em consideração além das seleção qualitativa da matéria prima, o princípio de máxima compacidade, pretendendo desta forma que a quantidade de cal adicionada

⁹PLINIO (23-79), Historiador, naturalista e oficial romano. Foi chamado de “o apóstolo da ciência romana”.

¹⁰ PHILIBERT de l'Orme (1510 - 1570), Arquiteto francês e um dos grandes mestres do Renascimento.

¹¹Cinzas de Tournai consistiam em uma mistura de *pierrebleu* (calcário) de Tournai (região na Bélgica) com hulha, calcinadas em conjunto e que conferiam hidráulidade à argamassa (SANTIAGO, 2007).

¹² No Brasil, a denominação massapê significa um solo constituído basicamente por argila montmorilonita, bastante frequente, dentre outros locais, no Recôncavo Baiano (SANTIAGO, 2007, p. 148).

preenchesse os vazios dos grãos de areia, relacionando a granulometria e da forma dos grãos da areia com a finura da cal (CARVALHO, 2014).

Moropoulou *et al.* (2005a) citando Vitrúvio, também, se reportam quanto a importância da proporção de cal e areia na qualidade da argamassa, e que o tamanho do agregado selecionado deve estar de acordo com o propósito da aplicação, sugerindo bom senso ao combinar as características do material com os requisitos da construção.

Em seus trabalhos, autores como Santiago (2007), Kanan (2008), Velosa (2006) e Veiga (2005) esclarecem que tanto as argamassas portuguesas como as brasileiras até o século XIX usavam adições nas composições, sendo a maior parte delas constituídas com pozolanas oriundas de pó de tijolos, telhas ou ainda pedra, que possuíam sílica e alumina na sua estrutura.

O uso de argamassa de cal no Brasil data à época das Capitânicas Hereditárias, sendo assim, antecedente a fundação da cidade de Salvador, na Bahia, em 1549 (SANTIAGO, 2007), tendo ocorrido no início da colonização brasileira, a partir da calcinação dos calcários de origem marinha (conchas) que eram abundantes na região. Santiago (2012) acrescenta que além do uso de corais, também, era comum o uso de pedras de lioz¹³, conforme o relato do cronista português Gabriel Soares (1540-1592):

“[...] informava não ser necessário o envio de pedras de lioz de Portugal para a confecção de cal, já que os corais atendiam muito bem ao objetivo, conseguindo-se com os mesmos obter uma cal de ótima qualidade [...]” (SANTIAGO, 2012, p. 70).

Mesmo entendimento é citado por Kanan (2008):

No Brasil, utilizou-se a cal de conchas marinhas desde os primeiros tempos de colonização, nas argamassas e revestimentos das construções da cidade de Salvador da Bahia, fortificações e casarios ao longo do território brasileiro (KANAN, 2008, p.15).

Nas argamassas e, também, em pinturas à base de cal eram utilizados aditivos orgânicos do tipo: polissacarídeos (mucilagem vegetal), proteínas (caseína do leite, clara de ovo), óleos animais (de peixe, etc.), vegetais (linhaça) e gorduras (sebo), e

¹³ Lioz ou pedra lioz é um tipo raro de calcário que ocorre em Portugal, na região de Lisboa e seus arredores.

outros. Também era comum adicionar fibras vegetais (palha) e de animais (crina, estrume) (KANAN, 2008).

Interessante observação é feita por Switzki (2006 *apud* RODRIGUES, 2005) quando relata a presença de cactos como aditivo nas argamassas antigas em alguns prédios históricos no município de Piratini/RS.

Segundo Kanan (2008), as argamassas de recuperação não irão repetir, necessariamente, a composição original da argamassa antiga, mas devem ser formuladas visando a sua compatibilização com a estrutura, sendo, portanto, importante a identificação do tipo de aglomerante, características dos agregados, aditivos orgânicos (fibras vegetais e animais), bem como a proporção do aglomerante e do agregado. Cita, também, ter sido comum o uso traço, em volume, que variava entre 1:4 a 1:3 (cal:agregado) para argamassa de cal aérea.

A partir destas observações, fica evidente o vasto espectro de possibilidades de traços e composições de materiais, orgânicos e inorgânicos, nas argamassas históricas. Souza (2013) em seu estudo elaborou uma tabela (apresentada no Anexo A) na qual, de forma objetiva, menciona a composição e os traços de argamassas textualizadas por tratadistas e por outros autores, tendo observado com isto que os traços comumente adotados eram 1:1, 1:2, 1:3 e 1:4, com variações nas adições de alguns materiais, e o aglomerante principal era a cal maturada.

A forte influência portuguesa, através de seus artífices, arquitetos e engenheiros, determinaram as técnicas construtivas e os materiais a serem empregados nas construções brasileiras, que também adotaram similaridade nos traços e nas composições.

Assim, embora seja possível determinar de forma analítica a composição de uma argamassa histórica, há de se levar em consideração que os materiais e a mão-de-obra atual não correspondem aos originais (VELOSA, 2006; RECENA, 2014).

Aliado a estas considerações, ainda resta a análise de que a argamassa de substituição ou de reparo possa ter exigências diferentes da original, dado o envelhecimento natural do edifício, das diferentes utilizações ao longo de sua existência e das alterações ambientais (RODRIGUES, 2004; KANAN, 2008; RECENA, 2014).

Salientam diversos autores, que o desempenho das argamassas de substituição não está determinado apenas pela formulação, mas condicionado, também, pelas técnicas de preparação, aplicação e cura sendo o conjunto destes

fatores essenciais para o aspecto pertinente a durabilidade (VELOSA, 2006; RECENA, 2014; VEIGA, 2003, 2005).

Para os autores pesquisados Veiga (2003, 2005, 2013), Moropoulou; Bakolas e Aggelakopoulou (2004), Moropoulou *et al.* (2005a), Moropoulou *et al.* (2005c), Alvarez; Sequeira e Costa (2005), Velosa (2006), Margalha (2011) e Recena (2014), existe um consenso que as argamassas com adição de cimento não se revelam como uma opção adequada para as argamassas de restauro, visto que estas são pouco deformáveis, impermeáveis e com capacidade limitada de permitir a secagem da parede, apresentando, também, aspecto final muito diferente das argamassas de cal, como a textura superficial. Além disto, contêm na sua composição sais solúveis que são transportados para o interior das paredes e lá cristalizam, contribuindo para a sua degradação.

Para Velosa (2006), Veiga (2005) e Van Balen *et al.* (2005), existem muitos casos conhecidos onde o emprego do cimento na conservação de obras antigas acabou por causar danos nos materiais originais. Expõem também, o princípio de compatibilidade, afirmando que os materiais utilizados na restauração devam ser compatíveis com os originais, ou seja, não devem causar danos, contribuindo para a sua conservação.

Como alternativa a esta questão, muitos pesquisadores têm procurado avaliar o benefício das adições pozolânicas nas argamassas de restauro, a fim de conferir-lhes propriedades similares às argamassas originais e atender as demandas ambientais atuais, mais agressivas que no passado.

2.2 Matéria-Prima

2.2.1 Agregado miúdo

A Associação Brasileira de Normas Técnicas, sob o título ABNT NBR 7211: 2009 define o agregado miúdo como grãos que passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira de malha de 0,074mm.

Os agregados por constituírem de 75 a 85% do volume das argamassas contribuem para o adequado comportamento físico, químico e mecânico das

argamassas, repercutindo, também, no aspecto final dos rebocos como textura e cor (SANTOS *et al.*, 2015).

O agregado miúdo utilizado nas argamassas é a areia, que tem papel fundamental no seu desempenho, facilitando as reações químicas de carbonatação e distribuindo, uniformemente, eventuais efeitos de retração.

Sendo considerado o esqueleto da argamassa, a areia ganha coesão pela ligação dos seus grãos ao ligante, influenciando o comportamento global da pasta (MARGALHA; VEIGA; BRITO, 2007).

Nas argamassas antigas utilizava-se somente areias naturais. As areias naturais são encontradas em jazidas, nos leitos dos rios, à beira-mar ou em dunas apresentando, desta forma, origem diversificada e vários tipos de grãos com coloração e composição mineralógica variada (SANTIAGO, 2007; TRISTÃO, 2005).

A variação do tamanho do grão está associada especialmente a fatores físicos, visto que a distribuição granulométrica dos grãos está vinculada ao meio de transporte e à sua velocidade; a forma dos grãos está relacionada ao meio de transporte, à distância e ao rigor do transporte; a textura superficial devido à dissolução ou método de transporte e, a composição mineralógica com as rochas fonte (TRISTÃO, 2005).

De acordo com Selmo (1989), a forma dos grãos é a característica de maior influência sobre as propriedades das argamassas, em que grãos angulosos dificultam a trabalhabilidade, no entanto, proporcionam superfícies mais ásperas, próprias para chapisco e emboço e, os grãos arredondados, por possuírem menor superfície específica e atrito interno, conferem melhor trabalhabilidade e compacidade.

Para Lanas e Alvarez (2003), o tipo e o formato do agregado miúdo interferem na resistência mecânica, sendo que os agregados calcários angulosos apresentam maior resistência. Também, nas argamassas que se utilizam desses agregados ocorre maior quantidade de poros médios e grandes, facilitando o processo de carbonatação e evitando a retração durante o processo de cura.

A dimensão dos poros de uma mistura de areias, de acordo com Henriques e Faria (2008) pode ser determinante no comportamento da argamassa, visto que com poros maiores a argamassa tem tendência a secar mais rapidamente e, com poros mais finos acontece o contrário, situação em que estes apresentam pressões capilares maiores, dificultando a secagem.

Quanto a composição mineralógica das areias, segundo Santos *et al.* (2015), esta influencia na resistência mecânica e na durabilidade das argamassas, pois

poderão ser reativas no ambiente alcalino do ligante dando origem a novos compostos, bem como, a composição granulométrica (distribuição dos grãos) que, para as argamassas no estado fresco, interfere na trabalhabilidade, no consumo do aglomerante e na água de amassamento e, no estado endurecido, influencia na resistência mecânica, permeabilidade, porosidade e na carbonatação.

No tocante a distribuição granulométrica, a escolha do agregado além de propiciar aspectos referentes ao desempenho das argamassas possui, também, consequências econômicas visto ser o material de maior consumo na formulação com custo menor que o aglomerante.

Para Bauer (2005) a análise granulométrica do agregado é o principal método de ensaio para avaliar os diversos tipos de agregados que compõem as argamassas de revestimento, que consiste na determinação das dimensões das partículas e das proporções relativas em que elas se encontram na composição.

A norma brasileira que especifica o ensaio para a determinação da composição granulométrica do agregado é a ABNT NBR NM 248 (2003), sendo o resultado expresso em porcentagem média retida e porcentagem média retida acumulada, em cada peneira.

A distribuição das dimensões das partículas do agregado é representada graficamente através de curva granulométrica, que pode apresentar distribuição contínua, descontínua e uniforme (BAUER, 2005; CINCOTTO; ÂNGULO, CARNEIRO, 2012; CARASEK, 2007). Na distribuição contínua estão presentes todos os tamanhos de grãos, as descontínuas apresentam falta de algumas frações granulométricas e quando há a predominância de grãos de mesmo tamanho, a granulometria pode ser considerada uniforme (POSSER, 2004).

Quanto a caracterização da areia para trabalhos de restauro, Recena (2014) se refere da seguinte forma:

Em geral, é especificada em trabalhos de restauro uma argamassa de cal e areia, sem que sequer tenha sido realizado qualquer estudo de maneira a orientar sobre a proporção entre os dois componentes ou sobre a distribuição granulométrica da areia (RECENA, 2014, p.47).

Desta forma, a areia a ser utilizada nas argamassas de reconstituição deve ser criteriosamente escolhida, pois pode influenciar na aparência do edifício, bem como na porosidade (microestrutura física), textura, resistência mecânica e, ainda,

determinar a qualidade e a durabilidade da intervenção (KANAN, 2008; RECENA, 2014).

2.2.2 Cal aérea

O uso da cal pelo homem como ligante data de 4000 a.C., sendo que as primeiras alusões na incorporação em argamassa são da Época Romana (COELHO; TORGAL; JALALI, 2009; VELOSA, 2006). Relatam os pesquisadores a utilização desta matéria-prima no revestimento em obras espalhadas pelo mundo, como em construções emblemáticas: Pirâmide de Gizé (2500 a.C.), Pirâmide de Quéops e Quéfren (2600-2550 a.C.) e Templos Gregos a Apolo e Elis (450 a.C.).

De acordo com Guimarães (2002), foi somente a partir da civilização egípcia que a cal começou a aparecer com frequência nas construções, partindo para a Grécia e para Roma e depois, abrangendo outras regiões mediterrâneas e circunvizinhas. O uso da cal, tanto para revestimento como para assentamento, foi intenso até os meados do século XIX, porém com o advento do cimento tipo Portland e as vantagens na sua utilização, como por exemplo, o processo de cura mais acelerado e aumento da resistência mecânica, a sua utilização entrou em declínio. Apesar da argamassa de cimento apresentar vantagens, o seu uso não é aconselhável em obras de recuperação de revestimentos antigos, dada a falta de compatibilidade química, física e mecânica com os materiais originais.

A cal é considerada um aglomerante inorgânico que, em função de seu endurecimento pode ser classificada em aérea e hidráulica. A cal aérea, menos resistente à ação prolongada da água, tem seu endurecimento através da reação com o dióxido de carbono atmosférico, que ocorre lentamente. Em contrapartida, a cal hidráulica é mais resistente à ação da água e possui a propriedade de endurecer embaixo de água, embora o dióxido de carbono atmosférico também contribua para o seu endurecimento.

Aspectos referentes às propriedades da cal em argamassas de revestimento são apontados por diversos autores. Guimarães (2002), Guimarães; Gomes e Seabra (2004), Coelho; Torgal e Jalali, (2009) e Recena (2014) identificam como sendo as suas principais características: a trabalhabilidade; a retenção de água; a incorporação

de ar; a resistência à compressão; o baixo módulo de elasticidade; a porosidade; a capilaridade; a permeabilidade ao vapor de água e a durabilidade.

O uso da cal no Brasil é relatado por Guimarães (2002) como tendo ocorrido desde 1549, quando o governador Thomé de Souza criou a primeira mineração utilizando material conchífero, produzindo a cal virgem para ser utilizada nas argamassas e na caiação das construções.

Recena (2014, p.59) também cita a importância do uso da cal no período colonial ao relatar “...que um dos primeiros atos do Rei D. João VI após sua chegada no Brasil, em 1808, foi determinar a instalação de uma grande caieira para satisfazer a necessidade do aglomerante frete às obras que se tencionava construir.”

No processo de obtenção da cal, a quantidade de argila presente na rocha calcária é um parâmetro que, quimicamente, distingue a matéria-prima de uma cal aérea de uma cal hidráulica, visto que quanto maior a quantidade de argila maior o índice de hidraulicidade. Este aspecto já era observado pelos tradadistas, conforme relato de Velosa (2006) que em seu estudo reporta a consideração de Vicat ¹⁴ da existência de diferentes tipos de rocha dando origem a diferentes tipos de cales.

A constituição da rocha calcária pode originar dois tipos de cales: a cálcica, que contém apenas carbonato de cálcio (CaCO_3), e a dolomítica, que contém carbonatos de cálcio e magnésio (RECENA, 2014; COELHO; TORGAL; JALALI, 2009).

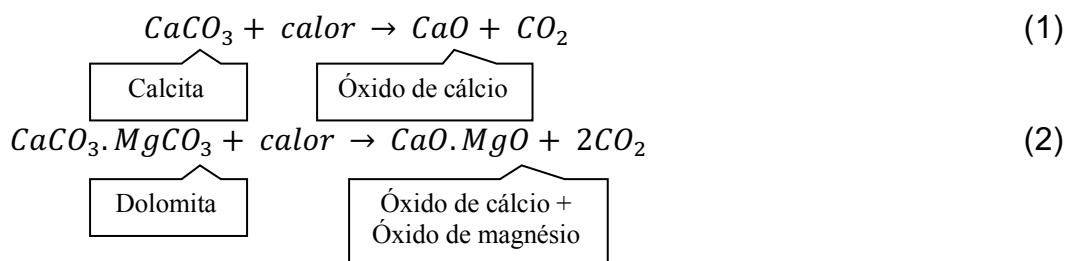
2.2.2.1 Processo de obtenção da cal virgem

No processo de obtenção da cal virgem (CaO) a partir de rochas cálcicas, o mineral calcita (carbonato de cálcio - CaCO_3) é calcinado à temperaturas entre 850°C e 900°C. Quando a rocha é dolomítica (carbonato de cálcio e magnésio- $(\text{Ca.Mg})(\text{CO}_3)_2$), a decomposição ocorre em duas etapas: a primeira entre 250°C e 380°C para o dolomito e a segunda para a calcita, obtendo-se os óxidos de cálcio (CaO) e de magnésio (MgO -Periclásio). Este processo é constituído de uma reação endotérmica¹⁵ com liberação do dióxido de carbono, também denominado anidrido carbônico (CINCOTTO; QUARCIONI; JOHN, 2010; CINCOTTO, 1997). As equações

¹⁴ Vicat, L.J. – Mortars and Cements, Donhead, Dorset, 1997, Traduzido por J.T. Smith, first published by John Weale, Architectural Library, London, 1837.

¹⁵ É uma reação química cuja energia total (entalpia) dos seus produtos é maior que a de seus reagentes, ou seja, ela absorve energia (na forma de calor).

1 e 2 apresentam as reações químicas que ocorrem na obtenção da cal virgem em função dos dois tipos de rocha.



Para Guimarães (2002), em função dos teores dos óxidos as cales se classificam da seguinte forma:

- Cal Cálcica: produto com alto teor de óxido de cálcio, variando entre 90 a 100% do óxido total presente;
- Cal Dolomítica: possui em sua composição teores mais baixos de óxido de cálcio, variando entre 58 a 65% do total;
- Cal Magnesiana: possui teores de óxido de cálcio intermediários entre a cal calcita e cal dolomítica, entre 65 a 90% do óxido total presente.

O ciclo da cal aérea corresponde às reações químicas e físicas, onde a forma inicial do carbonato de cálcio após ser submetido a três processos distintos, apresenta como produto final o mesmo carbonato de cálcio, figura 2. Ou seja, o retorno a condição original caracteriza a sua instabilidade termodinâmica (RECENA, 2014).

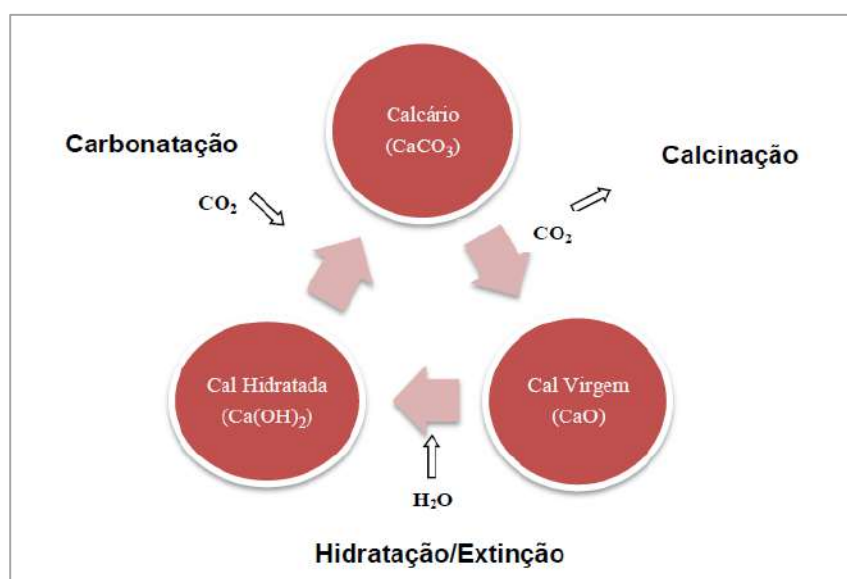
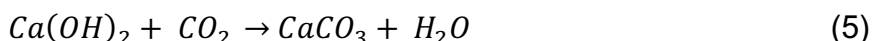
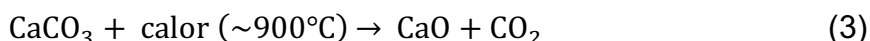


Figura 2- Ciclo da cal aérea.

A visualização deste processo pode ser observada nas equações 3, 4 e 5.



Para Cincotto (1997) a temperatura de calcinação influi sobre o tipo de impurezas encontradas na cal virgem, entre 1000°C e 1100°C são constituídas, essencialmente, de aluminato tricálcico, ferrita e silicato bicálcico e, entre 1100°C e 1400°C, são constituídas de ferrita e silicato tricálcico. Complementa, ainda, que estas impurezas tendem a fechar os poros da cal virgem dificultando a sua hidratação.

2.2.2.2 Processo de hidratação

A operação de hidratação da cal virgem, comumente conhecida como “queima” ou “extinção” tem como produto final o hidróxido de cálcio ou cal hidratada, que é o produto decorrente da transformação dos óxidos em hidróxido, que deve ser também conduzida de acordo com a natureza da cal. Em função da matéria-prima, a cal hidratada é formada pela mistura de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) e de magnésio (Mg(OH)_2) e, óxidos não hidratados (CaO e MgO).

A reação de hidratação dos óxidos de cálcio é fortemente exotérmica¹⁶ e, praticamente instantânea, favorecida pela finura da cal virgem, não ultrapassando 20 minutos. O mesmo efeito não ocorre para os óxidos de magnésio, que se hidratam em aproximadamente em 24 horas. As cales virgens magnesiana e dolomíticas, em virtude da supercalcinação não se hidratam totalmente (CINCOTTO; QUARCIONI; JOHN, 2010; NIQUES, 2003).

Este processo deve prever a hidratação completa dos óxidos minimizando a hidratação retardada, que se ocorrer com a argamassa já aplicada no substrato pode levar ao processo de expansão e consequente fissuração, sendo que este fenômeno patológico apresentará diferente efeito para óxido de cálcio e óxido de magnésio. É

¹⁶ É uma reação química cuja energia é transferida de um meio interior para o meio exterior, assim aquecendo o ambiente.

relatado por Taylor (1997) que a hidratação do periclásio (MgO) ocorre como uma reação lenta e expansiva.

Coelho; Torgal e Jalali (2009) aponta algumas vantagens da utilização da cal hidratada, citando que devido a elevada leveza e finura de seus grãos e, conseqüente, capacidade de proporcionar fluidez, coesão e retenção de água, a cal hidratada melhora a qualidade das argamassas. As suas partículas muito finas, ao serem misturadas com água, funcionam como um verdadeiro lubrificante, reduzindo o atrito entre os grãos de areia.

No estudo de Posser (2004) é mencionado que a utilização de cal hidratada, em reboco de recuperação, favorece a retenção de água, a trabalhabilidade, a plasticidade do material além de aumentar a difusão de vapor e a porosidade, requisitos necessários para o sistema de recuperação.

2.2.2.3 Processo de endurecimento – Carbonatação

O processo de endurecimento e aumento da resistência ao longo do tempo é iniciado pela secagem da água em excesso, com a transformação do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) em carbonato de cálcio (CaCO_3) ou carbonato de magnésio (MgCO_3) ou os dois, através do contato com o dióxido de carbono (CO_2), fenômeno conhecido como carbonatação que ocorre do exterior para o interior da argamassa.

De acordo com Guimarães (2002), as partículas finas de hidróxidos se aglomeram formando cristais que aumentam de número e tamanho, à medida que a água evapora, ocorrendo o entrelaçamento destes cristais com a formação de uma malha resistente que retém os agregados.

Desta forma, é necessária a absorção de CO_2 do ar para que ocorra o endurecimento da cal aérea, esta não endurece debaixo de água, justificando a denominação “cal aérea” diferentemente de outra variação, como a cal hidráulica, que endurece, principalmente, pela ação da água. Este processo ocorre de forma lenta e de fora para dentro, justificando o fato das camadas mais internas manterem-se frescas durante muito tempo até que ocorra a recarbonatação.

Este fato encontra-se citado por Lanas e Alvarez (2003) e Coutinho (2006 *apud* COELHO; TORGAL; JALALI, 2009) onde informam que as argamassas de cal podem levar muitos anos para atingir a carbonatação total.

Este processo de endurecimento é descrito em cinco etapas, conforme Johannesson e Utgenannt (2001 *apud* COELHO; TORGAL; JALALI, 2009):

- Difusão do CO_2 através dos poros da argamassa;
- Dissolução do CO_2 na água dos poros;
- Dissolução do Ca(OH)_2 na água dos poros;
- Reação entre o Ca(OH)_2 e o CO_2 ;
- Precipitação do CaCO_3 .

O endurecimento vem acompanhado por uma sensível redução do volume causado pela evaporação da água da mistura e pela reação química, sendo possível que isto processo provoque alguma fissuração.

Rodrigues (2004) menciona que o processo de carbonatação ocorre com a diminuição do volume de poros, citando que uma porosidade de 42% antes da carbonatação corresponde a 37% após esta ter ocorrido. Continua expondo que a alteração no volume ocorre no interior dos poros, com alteração na microestrutura aonde os poros maiores vão sendo preenchidos pelo carbonato de cálcio microcristalino ou amorfo.

Lawrence (2007 *apud* COELHO; TORGAL; JALALI, 2009, p. 70) observou que:

[...]o processo de carbonatação influencia a porosidade das argamassas de cal, observando-se um aumento do volume dos poros com 0,1 μm de diâmetro quando da transição da fase da portlandite para a fase da calcite. Como estes poros não participam da reação de carbonatação porquanto dificultam o acesso do CO_2 isso explica porque o processo de carbonatação se pode arrastar durante vários anos.

No entanto, à semelhança do que acontece com a cal cálcica hidratada, também na cal dolomítica hidratada, ocorre o processo de recarbonatação, sendo esses hidróxidos transformados em carbonatos de cálcio e de magnésio, respetivamente, ocorrendo mais lentamente neste último (VINAGRE, 2015).

De acordo com Hartshorn (2013 *apud* VINAGRE, 2015, p.18), "...a cal dolomítica contribui para a complexidade do sistema, uma vez que os compostos de magnésio e cálcio carbonatam a diferentes velocidades." A portlandita (Ca(OH)_2) carbonata de imediato originando calcita, enquanto que a carbonatação da brucita (Mg(OH)_2) é demorada, podendo resultar em vários compostos de magnésio.

Magalhães; Silva e Veiga (2011) após analisarem diversas argamassas antigas, verificaram melhor comportamento das cales dolomíticas, em que a presença de hidromagnesita e de magnesita estimulam o desenvolvimento do ligante, através do preenchimento dos espaços vazios entre os grãos de agregado, o que contribui para a sua resistência e durabilidade. Vinagre (2015) também cita que a presença da hidromagnesita nas argamassas favorece o aumento da resistência mecânica.

Para que a velocidade de carbonatação seja otimizada, Rodrigues (2004, p. 33) menciona que “...cerca de 50% do volume dos poros devem estar cheios de água-os capilares mais finos ficam cheios de água e os mais largos permanecem disponíveis para a difusão do CO₂ para o interior e para a dissipação do vapor de água.” Ainda completa com a afirmação que a velocidade de carbonatação é afetada pelo teor em água, temperatura, concentração em CO₂, espessura de argamassa e umidade relativa.

Portanto, a reação de carbonatação em argamassas de cal é um mecanismo controlado pela difusão e dissolução do CO₂. Na hipótese da estrutura porosa estar preenchida pela água, a difusão do CO₂ será muito lenta, atrasando o processo de carbonatação. Assim, o estudo da estrutura porosa passa a ter uma grande importância, sendo esta responsável pela evolução desta reação de endurecimento das argamassas de cal (CARDOSO, 2013).

2.2.2.4 Processo de maturação

Em razão da possibilidade de haver eventuais teores de óxidos não hidratados, durante o processo de hidratação da cal, a ABNT NBR 7200 (1998)¹⁷ prescreve a maturação da cal hidratada, por no mínimo 16 horas, consistindo em deixar a cal em contato com a areia e água, ou somente água, em forma de pasta, antes do emprego na argamassa.

Para Rago e Cincotto (1999), a utilização da cal em pasta teve seu início, provavelmente, quando era empregada a cal virgem nas construções ficando, necessariamente, em contato com a água antes de sua aplicação. Na prática, a cal que fica em repouso em contato com a água sob a forma de pasta ou argamassa,

¹⁷ Item- 7.3.2.1, p.4

contribui para uma melhora em suas propriedades no estado fresco, tais como, trabalhabilidade e retenção de água se comparado à situação da cal adicionada em pó na hora da mistura.

Segundo Posser (2004), a maturação da cal hidratada é uma técnica tradicional que melhora as propriedades da argamassa no estado fresco e, também, fornece um meio mais apropriado para a hidratação do cimento, quando comparado à mistura onde a cal é adicionada em pó. Complementam a importância da maturação da cal as observações de Araújo; Oliveira e Carasek (2011) e Rodrigues (2004) que relatam propiciar esta o aumento da plasticidade, trabalhabilidade e retenção de água da argamassa, tendo em vista que no processo ocorre a adsorção de água na superfície das partículas hexagonais de hidróxido de cálcio e magnésio.

Hansen *et al.* (1999 *apud* Niques, 2003), mencionam o aumento da superfície específica da cal com o tempo de maturação, comparando uma cal maturada durante 2 anos e outra com 16 anos, além da redução do tamanho dos cristais e a sua melhor formação.

Rodrigues (2004) cita a documentação do English Heritage¹⁸, em que é indicado, sempre que possível, utilizar cal em pasta na execução de trabalhos de conservação em edifícios antigos. No entanto, quando este procedimento não for possível, deve usar-se cal em pó colocada pelo menos 48 horas antes em água limpa para a formação da pasta. Mesmo entendimento foi apontado por Guimarães (2002), quando menciona que ao se utilizar cal hidratada é indispensável deixar a argamassa maturar, visto que o hidróxido de cálcio se apresenta na forma lamelar imperfeitamente cristalizado, necessitando a adição de água, durante certo tempo, para completar a sua cristalização e desenvolver sua plasticidade.

Estudos realizados por Margalha; Veiga e Brito (2006, 2006a) concluem que o tempo de maturação da cal influencia positivamente na plasticidade, nas características mecânicas e na capilaridade das argamassas, evitando a adição de maior quantidade de água. Também verificaram que um período maior de maturação melhora a adesão da pasta de cal aos agregados, funcionando como um lubrificante, identificando diferenças entre tamanho e forma dos cristais.

¹⁸ English Heritage é um órgão público inglês que tem como função proteger e promover o ambiente histórico da Inglaterra, assegurando que o passado seja pesquisado e compreendido.

2.2.3 Materiais Pozolânicos

A utilização de materiais pozolânicos em argamassa e concretos tem sido abordada em diversos estudos recentes, apontando para resultados que viabilizam a sua utilização no incremento da resistência mecânica e na durabilidade (GIBBONS, 1997; MOROPOULOU; BAKOLAS; AGGELAKOPOULOU, 2004; VELOSA, 2006; VELOSA; ROCHA; VEIGA, 2009a; VELOSA; VEIGA; ROCHA, 2009b; MOTA *et al.*, 2011; SOUZA, 2013; VEIGA, 2013; TEODORO; CASCUDO; CARASEK, 2016).

Para Nita e John (2007) as pozolanas podem contribuir para ganho de resistência mecânica e redução de água para a obtenção de trabalhabilidade, devido ao efeito físico das partículas na distribuição granulométrica do sistema, sendo mais acentuado para pozolanas mais finas como a sílica ativa e o metacaulim.

As pozolonas são materiais sílico ou sílico-aluminosos que por si só não possuem propriedades aglomerantes, mas quando combinados com o hidróxido de cálcio da cal originam compostos tais como silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, que possuem boa estabilidade na presença de água e com propriedades aglomerantes.

De acordo com a ABNT NBR 12653 (2012, p.1), pozolanas são materiais “silicosos ou silicoaluminosos que, por si sós, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença da água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes”.

Gibbons (1997) define a pozolana, como sendo um material finamente pulverizado que pode ser aditivado à argamassa de cal (ou a uma argamassa de cimento Portland) para aumentar a sua durabilidade e, no caso das argamassas de cal, para proporcionar uma pega¹⁹ mais rápida.

As pozolanas quanto à origem podem ser classificadas em naturais e artificiais. As naturais, segundo Gibbons (1997) são materiais de origem vulcânica, que quando finamente divididos tornam-se muito reativo. São formadas por uma combinação de materiais, principalmente, sílica e alumina e com quantidades menores de outros minerais como cálcio, magnésio, ferro, potássio e sódio, ejetados por vulcões. A autora também expõe que estas pozolanas foram largamente utilizadas em obras de

¹⁹ É o tempo para o início do endurecimento da argamassa quando esta é misturada com a água.

engenharia do século XIX em conjunto com cales hidráulicas naturais, sendo especialmente adequadas para obras marítimas e em locais em contato com a água.

Moropoulou *et al.* (2005a), Moropoulou; Bakolas e Anagnostopoulou (2005b) relatam ser vantajosa a adição de pozolanas naturais ou artificiais nas misturas de cal na obtenção de argamassa hidráulicas, conforme foram muito utilizadas na Antiguidade, principalmente em cisternas, aquedutos e dutos de esgotos como material impermeabilizante.

Para Velosa (2006), além da existência de pozolana natural de origem vulcânica, existe outra fonte abundante de sílica reativa na natureza que é a terra diatomácea ou diatomito, de origem sedimentar, que pode ser encontrada no seu estado puro ou incorporando argila, sendo neste caso conhecida por moler. As pozolanas artificiais, são obtidas pela calcinação de materiais naturais em condições específicas ou são provenientes de subprodutos industriais. Simplificadamente, Velosa (2006) define a classificação das pozolanas da seguinte forma:

- **POZOLANAS NATURAIS:** encontram-se na natureza, provenientes do rápido arrefecimento de produtos de erupções vulcânicas ou sob a forma de terra diatomácea.
- **POZOLANAS ARTIFICIAIS:** resultam de processos de queima a temperaturas específicas de materiais naturais. Neste domínio encontram-se alguns subprodutos industriais.

Para a obtenção da pozolana artificial, dependendo do tipo de material, a temperatura de calcinação deve ser específica para cada um, sendo suficientemente elevada para permitir a perda de hidroxila, mas abaixo da temperatura que provoque a formação de uma fase vítrea e a cristalização de outras fases tais como a mulite (VELOSA; ROCHA; VEIGA, 2009a).

Para Rodrigues (2004), quando o tempo e a temperatura de calcinação são elevados desenvolvem-se cristais de sílica e alumina, diminuindo a reatividade pozolânica, sendo esta reação favorecida pela desordem na estrutura cristalina ou pelo estado amorfo²⁰. Complementa ainda que, os materiais argilosos do tipo caulinite e montmorilonite adquirem propriedades pozolânicas sob temperatura de calcinação

²⁰ É designação dada à estrutura que não têm ordenação especial a longa distância (em termos atômicos), como os sólidos regulares.

entre 540°C e 980°C. O aumento da reatividade é explicado, assim, como um mecanismo puramente físico, onde o aumento ou diminuição da reatividade de uma pozolana está condicionado ao aumento ou diminuição da temperatura de calcinação.

Quanto às pozolanas artificiais, em função da origem, Velosa (2006), Velosa e Veiga (2007), as definem de acordo com a tabela 8.

Tabela 8- Pozolanas artificiais.

Materiais argilosos cozidos a temperaturas específicas	Sub-produtos industriais	Materiais de origem orgânica cozidos a temperaturas específicas
Argila cozida a cerca de 800°C (pó de tijolo)	Cinzas volantes	Cinzas de casca de arroz
Metacaulim resultante de caulino cozido a cerca de 750/800°C	Sílica de fumo	Cinzas de caule de trigo
		Cinzas de madeira

Fonte: Adaptado de Velosa (2006) e Velosa e Veiga (2007).

Os materiais pozolânicos são classificados segundo a ABNT NBR 12653 (2012) em três classes, da seguinte forma:

- **Classe N:** Pozolanas naturais e artificiais que obedecem aos requisitos aplicáveis nesta Norma, como certos materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido, “cherts” silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas;
- **Classe C:** Cinza volante produzida pela queima de carvão mineral em usinas termoelétricas que obedece aos requisitos aplicáveis nesta Norma;
- **Classe E:** Qualquer pozolana cujos requisitos diferem das classes anteriores, conforme estabelecido nesta Norma.

Quanto às exigências químicas e físicas a ABNT NBR 12653: 2012 estabelece que as pozolanas devem estar em conformidade com os requisitos expostos nas tabelas 9 e 10.

Tabela 9- Requisitos químicos para os materiais pozolânicos.

Propriedades	Classe de material pozolânico		
	N	C	E
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	≥ 70	≥ 70	≥ 50
SO_3	≤ 4	≤ 5	≤ 5
Teor de umidade	≤ 3	≤ 3	≤ 3
Perda ao fogo	≤ 10	≤ 6	≤ 6
Álcalis disponíveis em Na_2O	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$
Valores expressos em porcentagem (%)			

Fonte: ABNT NBR 12653: 2012.

Tabela 10- Requisitos físicos para os materiais pozolânicos.

Propriedades ^a	Classe de material pozolânico		
	N	C	E
Material retido na peneira 45 μm	$\leq 34\%$	$\leq 34\%$	$\leq 34\%$
Índice de atividade pozolânica: - com cimento aos 28 dias, em relação ao controle - com a cal aos 7 dias - água requerida	$\geq 75 \%$ $\geq 6 \text{ MPa}$ $\leq 115 \%$	$\geq 75 \%$ $\geq 6 \text{ MPa}$ $\leq 110 \%$	$\geq 75 \%$ $\geq 6 \text{ MPa}$ $\leq 110 \%$

^a Critérios de uniformidade: a massa específica e a finura das amostras individuais não podem ter variação, em relação à média estabelecida em dez ensaios consecutivos, superior a no máximo 5 %, em todos os casos.

Fonte: ABNT NBR 12653: 2012.

2.2.3.1 Reação pozolânica

Velosa (2006) menciona que o conceito de reação pozolânica tem variado desde a publicação de Vicat, em 1837, até os dias de hoje. Nesta publicação, Vicat afirma que as pozolanas naturais e artificiais, são compostas principalmente por sílica e alumina e, as reações dos silicatos e aluminatos de cálcio são os responsáveis pela hidraulicidade de determinadas cales. Para a autora, a reação pozolânica é entendida da seguinte forma:

Entende-se por reacção pozolânica, a reacção química entre um dado material, vulgarmente designado como pozolânico, e o hidróxido de cálcio, na presença da água, formando compostos hidráulicos. É a existência desta reacção que permite classificar os materiais como pozolânicos (ou não) e a sua extensão determina o grau de pozolanicidade (ou a reactividade pozolânica) de um dado material (VELOSA, 2006, p. 29).

Para Mehta e Monteiro (2008) a reação pozolânica ocorre devido à reação entre a cal (básica) e os óxidos (ácidos) da pozolana, responsáveis pelo incremento das propriedades mecânicas.

Além da condição essencial da quantidade de aluminatos (Al_2O_3) e silicatos (SiO_2) em estado amorfo capazes de reagir com o Ca(OH)_2 em presença de água, outros fatores afetam a reação pozolânica, sendo estes: a área superficial, temperatura de calcinação, relação cal/pozolana, condições de cura entre outros (VELOSA, 2006).

Castro e Pandolfelli (2009), também, pontuam que a taxa da reação pozolânica é dependente de vários fatores, tais como a origem, a composição química e mineralógica, a morfologia e a granulometria da adição mineral.

Rodrigues (2004) complementa, que a reatividade pozolânica está correlacionada com a superfície por unidade de volume, ou seja, quanto maior for a superfície específica da pozolana maior será sua reatividade, sendo a reação facilitada porque ocorre o aumento da superfície de contato entre sílica e a alumina e o hidróxido de cálcio.

A reação pozolânica, de forma esquemática, pode ser representada segundo a figura 3.



Figura 3- Esquema de reação pozolânica.

Cajun Shi e Robert L. Day (2000 *apud* Velosa, 2006) definem os vários passos desta reação, descrevendo o início da reação pozolânica pela hidrólise do hidróxido de cálcio, conforme equação 6.



Segundo Villar-Cociña *et al.* (2003) a interação entre os íons Ca^{2+} e os grãos de pozolana da seguinte ocorre da seguinte forma:

- difusão de íons Ca^{2+} da solução para a partícula de pozolana;
- adsorção dos íons Ca^{2+} na superfície da partícula;
- difusão dos íons Ca^{2+} através da camada exterior constituída pelo produto de reação;
- reação dos íons Ca^{2+} com a partícula de pozolana.

É citado pelos autores Cajun Shi e Robert L. Day (2000 *apud* Velosa, 2006) e por Moropoulou; Bakolas e Aggelakopoulou (2004) que a partir do terceiro dia de idade as argamassas de cal e pozolana apresentam gel de CSH. Para Velosa (2006) o silicato de cálcio hidratado precipita à volta das partículas da pozolana e os aluminatos de cálcio hidratados precipitam mais afastados destas partículas.

Cardoso (2013) cita as principais fases cristalinas da reação pozolânica como sendo as formadas por silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), aluminatos de cálcio hidratados (C-A-H) e silico-aluminatos de cálcio hidratados (C-S-A-H). Os silicatos e aluminatos são compostos que tem em geral uma estrutura tetraédrica, em que no seu interior se posicionam os íons de silício ou alumínio e nos vértices o oxigénio, a reação ocorre levando o tetraedro ao desequilíbrio, permitindo uma forte atração com a água, rompendo as ligações superficiais e libertando os íons silicato ou aluminato. A partir das concentrações destes íons e a presença dos íons de Ca^{2+} , ocorre uma instabilidade termodinâmica, que origina a cristalização dos hidratos de cálcio.

Para Nita e John (2007), Castro e Pandolfelli (2009) e Walker e Pavía (2010) mesmo o material pozolânico que não reagiu com o hidróxido de cálcio terá a função de fíler servindo de material particulado, preenchendo os vazios intersticiais, promovendo aumento da densidade sem repercutir em aumento da resistência nas idades iniciais.

Este efeito físico, conhecido como fíler, está relacionado ao processo de refinamento dos poros, associado à reação pozolânica, em que o produto da reação de hidratação é bastante eficiente no preenchimento dos espaços capilares grandes, aumentando a resistência e reduzindo a permeabilidade do sistema (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A distribuição granulométrica, segundo Goldman e Bentur (1992 *apud* NITA; JOHN, 2007), influencia, principalmente, no empacotamento e na distribuição das partículas que irão reagir com o hidróxido de cálcio livre ou servirão de material particulado que preencherá vazios intersticiais. Fato este observado por Felgueiras

(2011) em seu estudo, onde a pozolana utilizada atuou apenas como material fino (fíler), sem qualquer atividade pozolânica.

Autores como Taylor (1997), Moropoulou; Bakolas e Aggelakopoulou (2004) e Walker; Pavía (2010) descrevem que a reação pozolânica se baseia no consumo de portlandita, sendo esta uma reação lenta, podendo ser este um fator confiável para a avaliação da reatividade da pozolana e a detecção de produtos pozolânicos.

Quanto a reação pozolânica com a cal, a principal reação envolve a formação de silicato de cálcio hidratado (CSH), similar ao C_3S , produzido pela hidratação do cimento Portland e da cal hidráulica (TAYLOR, 1997; VELOSA, 2006; WALKER; PAVÍA, 2010; SOUZA, 2013).

Moropoulou; Bakolas e Aggelakopoulou (2004) relatam o incremento dos produtos da reação pozolânica em pastas de cal/pozolana a partir do terceiro dia, ocorrendo, simultaneamente, o decréscimo da quantidade de hidróxido de cálcio ou portlandita, sendo que aos 28 dias 80% do total de $Ca(OH)_2$ já havia reagido.

Em seu trabalho Medina (2011) avaliou, entre outros aspectos, a atividade pozolânica para sistemas binários cimento Portland e hidróxido de cálcio com metacaulim através do consumo de portlandita, concluindo que após 56 dias este composto foi gradativamente consumida pela pozolana, sendo totalmente consumido antes de 182 dias.

2.2.3.2 Metacaulim

Dentre os materiais pozolânicos artificiais a utilização do metacaulim vem se destacando em diversos estudos e aplicações práticas, tanto no uso em argamassas como em concreto (MOROPOULOU; BAKOLAS; AGGELAKOPOULOU, 2004; VELOSA, 2006; VELOSA; VEIGA, 2007; VELOSA; ROCHA; VEIGA, 2009a; VELOSA; VEIGA; ROCHA, 2009b; MOTA *et al.*, 2010; MOTA *et al.*, 2011; SOUZA, 2013; VEIGA, 2013; GAMEIRO *et al.*, 2014; TEODORO; CASCUDO; CARASEK, 2016).

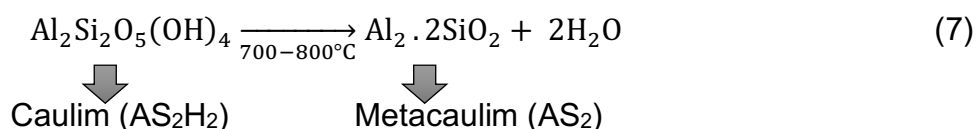
Como nessa tese foi utilizada como pozolana artificial o metacaulim, fez-se um estudo mais específico sobre o mesmo, envolvendo a análise dos compostos formados, resultantes da reação pozolânica entre a cal aérea e o metacaulim, sendo estes os silicatos de cálcio hidratados, os aluminatos e aluminosilicatos de cálcio hidratados (geralmente a stratlingita, C_2ASH_8).

Velosa (2006) menciona que o termo caulim deriva da palavra chinesa Kau-ling, significando alta cordilheira, local de onde era extraído este material.

O metacaulim é obtido da argila caulinítica²¹, composto, predominantemente, por silicatos de alumínio hidratado ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), que após ser calcinado à temperatura entre 700 e 800°C provoca a desidroxilação da estrutura cristalina, sendo posteriormente moído até a obtenção da granulometria desejada. O produto final é a metacaulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$), constituído por partículas lamelares com estrutura, predominantemente, não cristalina e com elevada finura (CUNHA *et al.*, 2010 *apud* MEDINA, 2011).

Segundo Rodrigues (2004), a metacaulinita, que é uma estrutura amorfa, converte-se em mulite cristalina a temperatura próxima de 1080°C e, o quartzo e a anatase (óxido de titânio- TiO_2) presentes na caulinita mantem-se inalterados após o tratamento térmico e em pasta de cal aérea e material argiloso calcinado, funcionam como filler.

A perda de massa teórica para um caulim puro no processo de calcinação corresponde a 13,76% em massa (SHVARZMAN *et al.*, 2003 *apud* NITA; JOHN, 2007) conforme equação 7.



Massazza (1998 *apud* MEDINA, 2011) cita que a atividade pozolânica do metacaulim está relacionada com a sua composição mineralógica e sua superfície específica, ratificando a influência da moagem nas primeiras idades e na aceleração da atividade pozolânica com o desenvolvimento das resistências. Cardoso (2013) concorda que o metacaulim deve ser moído para se obter uma elevada superfície específica e, conseqüente, aumento de pozolanicidade.

Velosa; Rocha; Veiga, (2009a), Velosa; Veiga e Rocha (2009b), Mota *et al.* (2011) e Cardoso (2013) relatam que, a finura do metacaulim e a superfície específica influenciam na reatividade, onde a maior superfície específica contribui favoravelmente com os aspectos reológicos, otimizando a curva granulométrica,

²¹A argila caulinítica é também denominada de caulinita ou caulim, e tem origem da palavra Caulim que vem do chinês 'Kao-Ling' que significa "alta cordilheira", onde se situavam as jazidas de extração do material (VELOSA, 2006).

determinando maior retenção e coesão, promovendo incremento na durabilidade e no desempenho dos materiais cimentícios.

Frias e Cabrera (2001 *apud* RODRIGUES, 2004) destacam que as características mais importantes do metacaulim são a composição química ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 \sim 90\text{-}95\%$), a finura (superfície específica $\sim 15\text{-}20 \text{ m}^2/\text{g}$) e a natureza pouco cristalina, conferindo, assim, uma alta reatividade.

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 gellenita hidratada, C_4AH_{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 C_3AH_6 –hidrogranada (SABIR; WILD; BAI, 2001; RODRIGUES, 2004; GAMEIRO *et al.*, 2012a, 2012b; CARDOSO, 2013; SILVA *et al.*, 2014; GRILO *et al.*, 2014, GAMEIRO *et al.*, 2014).

Ratificando na sua pesquisa a observação de diversos autores, Rodrigues (2004) relata que os principais compostos formados pela reação entre a cal e o metacaulim são os sílico-aluminatos bicálcicos hidratados (gellenita hidratada), os silicatos de cálcio hidratado do grupo da tobermoritas (CSH) do grupo I, aluminatos de cálcio hidratados e aluminatos tricálcicos ou stratlingita.

Para Nita e John (2004) existe uma controvérsia quanto à estabilidade das fases C_2ASH_8 e C_4AH_{13} resultantes da reação pozolânica, visto que para alguns pesquisadores estas fases sofrem conversão para a fase hidrogranada quando sujeitas a elevadas temperaturas e tempos longos de cura. Mesmo fato é mencionado por Massazza (1993 *apud* NITA; JOHN, 2004) e Gameiro *et al.* (2012a, 2012b, 2014), relatando que, em elevadas temperaturas e tempo de cura, a stratlingita e o aluminato tetracálcico hidratado, convertem-se em hidrogranada (C_3AH_6), sendo este composto identificado por realizar efeitos negativos nas matrizes, acarretando enfraquecimento e um grande impacto no desempenho da resistência mecânica e durabilidade das argamassas.

Serry *et al.* (1984 *apud* SOUZA, 2013) confirmam que os produtos resultantes da reação entre o hidróxido de cálcio e o aluminato presente no metacaulim, em temperatura ambiente, são os CSH e a gellenita hidratada (C_2ASH_8) ou stratlingita e pequenos teores de hidrogranada (C_3AH_6).

Diversos estudos neste sentido também foram desenvolvidos por Gameiro *et al.* (2012a, 2012b, 2014) com pasta de cal e metacaulim, em temperatura ambiente, a fim de avaliar os compostos formados com diferentes proporções de cal:metacaulim e em diversas condições de cura. Os autores encontraram como resultado da reação cal/metacaulim, a stratlingita, aluminato de cálcio hidratado e monocarboaluminato, sendo este derivado da reação entre a alumina reativa do metacaulim e a portlandita livre encontrada nas argamassas na presença de CO₂. Nas composições com menor teor de metacaulim (<17%) não foi detectado a presença de stratlingita (C₂ASH₈). Nestes casos foi identificada a presença de monocarboaluminatos e de portlandita.

No mesmo sentido Moropoulou; Bakolas e Aggelakopoulou (2004) relatam a presença de stratlingita (C₂ASH₈) e de CSH em apenas três dias de cura nas pastas de cal hidratada e metacaulim, e pequena presença de aluminato tetracálcico hidratado (C₄AH₁₃). Velosa (2006) cita que apenas um autor das referências consultadas em seu estudo, menciona o aparecimento de C₄AH₁₃ nas reações entre metacaulim e hidróxido de cálcio.

De acordo com Taylor (1997) existem diversos tipos de CSH, sendo este um dos principais produtos resultantes da hidratação do cimento e da cal hidráulica, bem como, da reação pozolânica, tendo em conta suas estruturas cristalinas e suas propriedades. Os 17 tipos cristalinos conhecidos de CSH que podem ser encontrados, influenciados pelas condições em que são formados, possuem diversas designações sendo os mais comuns os grupos das tobermorites e wollastonites (tobermoritas e wollastonitas). Sendo do tipo tobermorita, existe a possibilidade de formação de duas fases semi-cristalinas, o CSH tipo I e CSH tipo II, em que se apresentam com morfologia alveolar o tipo I e fibrosa o tipo II.

Para Murat (1983 *apud* NITA; JOHN, 2007) e Rodrigues (2005) uma das três reações apresentadas nas equações 8, 9 e 10, se desenvolvem na presença de água, de acordo com a variação da relação (em massa) entre o hidróxido de cálcio e o metacaulim, resultando em aluminato tetracálcico hidratado, aluminato tricálcico hidratado e gelenita hidratada.



Velosa (2006), a partir de diversas referências bibliográficas, descreve os silicatos de cálcio hidratado e os aluminatos de cálcio ou silico-aluminatos de cálcio formados a partir da reação pozolânica com hidróxido de cálcio, analisando diferentes tipos de pozolanas (naturais e artificiais). Por ser de interesse deste estudo apenas o metacaulim, a tabela 11 apresenta os produtos formados com esta pozolana artificial.

Tabela 11- Compostos formados a partir da reação da pozolana metacaulim com hidróxido de cálcio.

Pozolana	Silicatos de cálcio hidratados	Aluminatos e silico-aluminatos de cálcio hidratados
Metacaulim		C_4AH_6
	$C_3S_2H_n$	C_4AH_{13}
	CSH	C_2ASH_8
		C_2ASH_n
		C_3AH_6

Fonte: Adaptado de Velosa (2006).

Em todas as pesquisas acima citadas, as fases cristalinas foram identificadas através de difração de raios X (DRX) e/ou análises termogravimétricas (TG) e análise térmica diferencial (DTG).

2.3 Argamassas de cal aérea com metacaulim

O processo de reabilitação dos revestimentos históricos visa a compatibilidade entre o material novo e o antigo, de modo que, as argamassas de reabilitação aplicadas aos substratos antigos devam possuir: baixa resistência à compressão, baixo módulo de elasticidade, alta permeabilidade ao vapor de água e ausência de sais solúveis (LANAS; ALVAREZ, 2003; RODRIGUES, 2004; VEIGA, 2005; VELOSA, 2006; FARIA; MARTINS, 2011, 2013; GRILO *et al.*, 2014).

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_2 , 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 (COLLEPARDI, 1990; GIBBONS, 1997; MAGALHÃES; MUÑOZ; ANDRADE, 2017).

O uso da cal aérea, como já mencionado, como aglutinante único em argamassa envolve alguns inconvenientes, como tempo de cura, carbonatação lenta, surgimento de fissuras por retração, baixa durabilidade na presença de água e umidade e, também, 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 (AGGELAKOPOULOU; BAKOLAS; MOROPOULOU, 2011; GAMEIRO *et al.*, 2014).

As argamassas de reabilitação para serem utilizadas em intervenções de conservação ou restauro, tem se constituído o foco de diversas pesquisas, em que a adição de metacaulim em argamassas de cal tem sido considerada uma opção promissora, uma vez que estas possuem compatibilidade química, em relação ao tipo de ligante e ao comportamento mecânico, entre as argamassas antigas e as novas, além de promover incremento na durabilidade (RODRIGUES, 2004; VELOSA, 2006; VELOSA; VEIGA; ROCHA, 2009b, AGGELAKOPOULOU; BAKOLAS; MOROPOULOU, 2011; MOTA *et al.*, 2011; GAMEIRO *et al.*, 2012a, 2012b; VEIGA, 2013; GAMEIRO *et al.*, 2014; GRILO *et al.*, 2014; MAGALHÃES; MUÑOZ; ANDRADE, 2017).

Assim, a formulação e propriedades destas argamassas dependem de diversos fatores, entre os quais se destacam: aplicação a que se destinam, processo de cura, características e quantidade do aglomerante, características das areias e características dos componentes pozolânicos.

Para Velosa e Veiga (2007), o uso de maiores percentagens de pozolana, não implica, necessariamente, em melhorias nas características das argamassas, sendo necessário uma formulação específica, para cada pozolana, que produz melhores resultados, para determinada aplicação.

Segundo Ashurst (2007 *apud* JAPIASSÚ *et al.*, 2012), não é indicado acrescentar metacaulim na produção de argamassas de cal aérea em quantidades superiores a 10% da pasta de cal. Em seu trabalho, Japiassú *et al.* (2012) informa que porcentagem de metacaulim em relação aos materiais secos utilizadas por diversos pesquisadores foi, em média, de 13%.

De acordo com a literatura existente, verifica-se que existem muitos estudos realizados no âmbito das argamassas de cal para fins de restauro, principalmente, realizados no Laboratório Nacional de Engenharia Civil- LNEC em Lisboa, Portugal.

No Anexo B, estão compiladas as características mecânicas e coeficiente de capilaridade de argamassas, com respectivos traços em volume e em massa, de alguns trabalhos que se afinam com a presente tese. No intuito de estabelecer uma relação entre eles definiu-se a apresentação apenas da cura denominada “standard” de acordo com a CEN EN-1015- 11²², embora possa ter sido analisado esta e outras condições de cura em cada trabalho.

Desta forma, é possível observar que diversas são as composições analisadas, tanto em volume como em massa, conduzindo a diferentes resultados e a convicção da complexidade do tema. Assim, as características das matérias-primas empregadas e a cura adotada, provavelmente, são os fatores a ser observados para o entendimento dos resultados obtidos, conforme sintetizado por Japiassú (2012) na tabela 12.

Tabela 12- Resumo dos fatores que influenciam na reação pozolânica.

Fatores	Influência
Tipo de pozolana	Cada tipo de pozolona tem uma correlação entre a combinação da pozolana com a cal e o endurecimento das argamassas, relacionada à composição química do material.
Superfície específica	Quanto maior a superfície específica, maior a reatividade do material.
Temperatura de calcinação	Tempo e a temperatura de calcinação influenciam o desenvolvimento de cristais de sílica e alumina, se elevados, diminuem a reatividade pozolânica. Estes parâmetros são variáveis para cada tipo de pozolana.
Relação cal/pozolana	Varia de acordo com a pozolana, teor de sílica e alumina.
Quantidade de água	Quanto maior a quantidade de água maior a velocidade de reação.
Condições de cura	Temperatura mais elevada tende a aumentar a reação pozolânica e, baixa umidade tende a provocar decréscimo da resistência mecânica das argamassas de cal/pozolana condicionadas ao ar livre.
Compactação	Boa compactação propicia melhoria na resistência das argamassas.

Fonte: Adaptado de Japiassú, 2012.

²² CEN, EN 1015-11- Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar, 1999. Esta norma estipula a manutenção dos provetes à temperatura de 20°C±2°C e com uma de humidade relativa 95%±5% nos primeiros 7 dias, dos quais os primeiros 5 são dentro do molde, e os restantes, depois de desmoldados, a temperatura é mantida, mas a humidade relativa desce para 65%±5%.

2.3.1 Condições de cura para efetivação da reação cal-metacaulim

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 (FELGUEIRAS, 2011; FARIA; MARTINS, 2011, 2013; CARDOSO, 2013; SILVA *et al.*, 2014; GRILO *et al.*, 2014).

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 fíler (agregado) e não mais como ligante (VEIGA, 2013).

Em ambiente úmido a reação de hidratação é favorecida, com valores de umidade relativa superiores a 95% impedindo, desta forma, a reação de carbonatação. Esta última ocorre em ambiente seco, mas se não for demasiado seco, permite a difusão e dissolução do CO₂ através da estrutura porosa da argamassa (CARDOSO, 2013).

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 (SILVA *et al.*, 2014; GRILO *et al.*, 2014).

Nas argamassas de cal com incorporação de metacaulim, Cizer (2009 *apud* CARDOSO, 2013) verificou uma diminuição das resistências mecânicas após os 28 ou 90 dias de cura. Esta redução de resistência também foi verificada por Gameiro *et al.* (2014), que relacionou este fato a instabilidade do aluminato de cálcio hidratado, mas que esta instabilidade deva desaparecer devido a reação pozolânica ou a reação de carbonatação, pelo consumo da portlandita, mesmo em condições de cura úmida.

Velosa (2006) cita as análises realizada por Lea onde são utilizadas diversas pozolanas, sendo monitorizada a sua reação com a cal em diferentes temperaturas. Para a cura de pastas de cal e metacaulim, com temperaturas entre 20°C e 60°C, evidenciou uma reatividade superior para o caso da temperatura mais elevada, com uma taxa de combinação de hidróxido de cálcio muito superior.

Com relação ao teor de umidade, Sousa Coutinho (1958 *apud* VELOSA, 2006) realizou ensaios de pastas de cal com diversas pozolanas conservadas em água e temperaturas oscilando entre 10°C e 24°C, observando um acréscimo de resistência dos 7 aos 28 dias de cura das pastas, com acréscimo da temperatura. A autora expõe desta forma, que diante de diversos ensaios realizados, pode-se concluir que as pastas contendo pozolana devem ser mantidas a cerca de 100% U.R.

Murat (1983 *apud* SOUZA, 2013) informa que o processo de cura influencia no endurecimento e nas reações das misturas e, que durante o estudo, constatou-se que as amostras conservadas em temperatura ambiente a 20°C, o desenvolvimento da resistência é muito limitado devido à evaporação da água contida e pela rápida carbonatação do hidróxido de cálcio.

3 Materiais e métodos

3.1 Considerações iniciais

Existem diversas normas e recomendações, nacionais e internacionais, para a caracterização de argamassas de revestimentos. No entanto, estas não apresentam parâmetros e procedimentos para serem utilizadas no âmbito das argamassas para aplicação na conservação do patrimônio histórico edificado.

As normas brasileiras, em especial, se referem à caracterização de argamassas com base em outros ligantes, como o cimento, não sendo específicas para argamassas de cal aérea. A mesma situação se aplica quando se destina para fins de restauro, pois não existem informações a respeito da adequação do emprego de uma determinada argamassa para uma condição de serviço específica.

Desta forma, a pesquisa desenvolvida nessa tese foi norteadada com procedimentos mencionados nas normas nacionais e internacionais e, nas situações de impossibilidade de procedimentos não normalizados, usou-se métodos devidamente fundamentados em referenciais bibliográficos.

O desenvolvimento proposto e executado nesse trabalho está apresentado no fluxograma da figura 4.

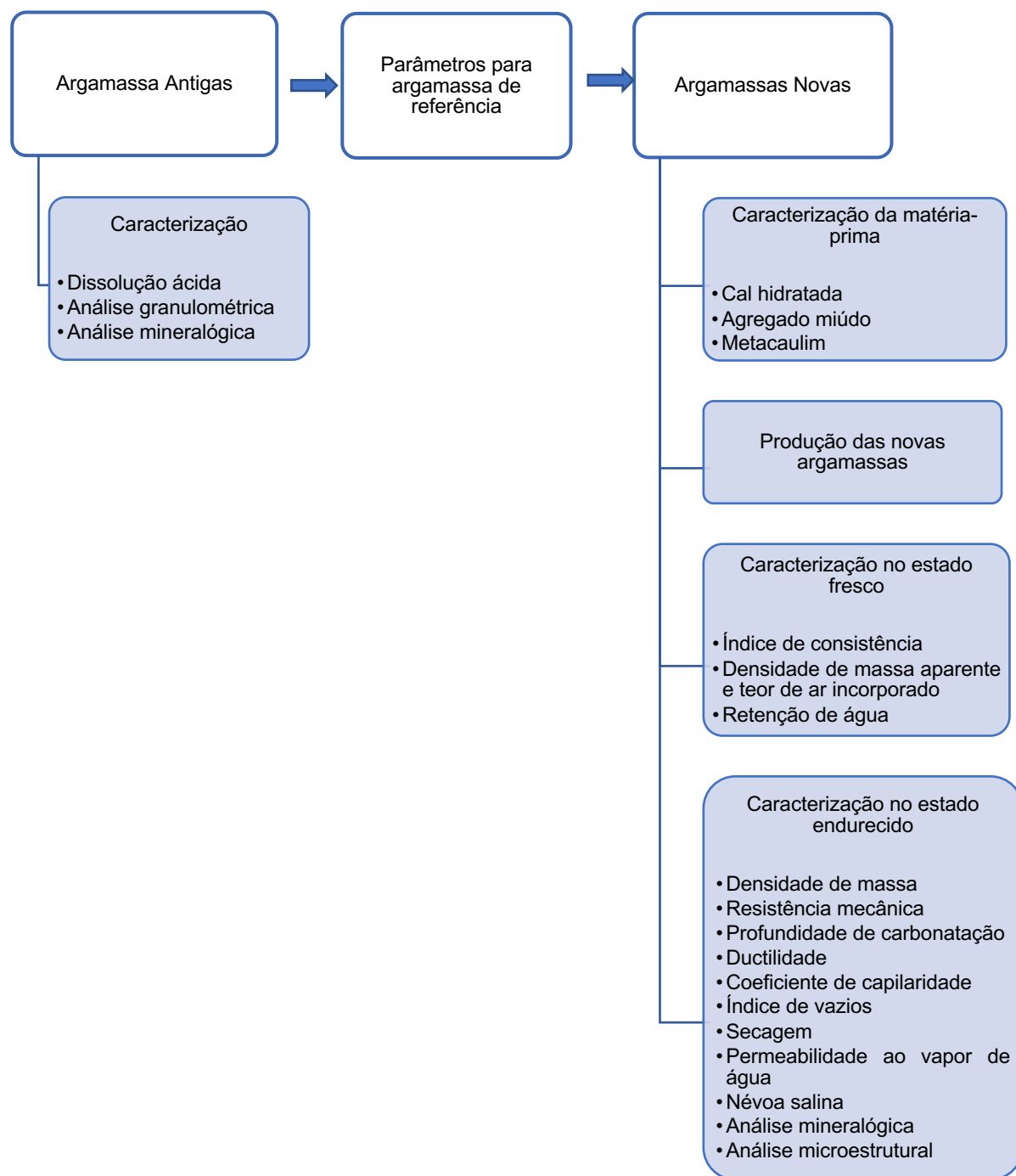


Figura 4- Etapas desenvolvidas na parte experimental da pesquisa.

3.2 Caracterização das argamassas antigas

Nesta etapa buscou-se identificar características físicas de argamassas antigas a partir de amostras extraídas de revestimentos externos existentes em prédios históricos, visando à obtenção de novas argamassas com propriedades similares.

No trabalho, de forma a obter conhecimento mínimo sobre as argamassas de revestimento externo dos prédios antigos, foram escolhidos prédios que datam do final do século XIX e início do século XX, identificados nas figuras 5, 6, e 7, e coletadas amostras que foram caracterizadas para definir os parâmetros para a reprodução de uma argamassa de comportamento similar a ser testada e usada como referência/padrão na pesquisa.



Figura 5- Centro Municipal de Cultura (1914), prédio localizado na Rua Marechal Floriano Peixoto, 91. Imagens do local e da posição de extração da amostra do revestimento.

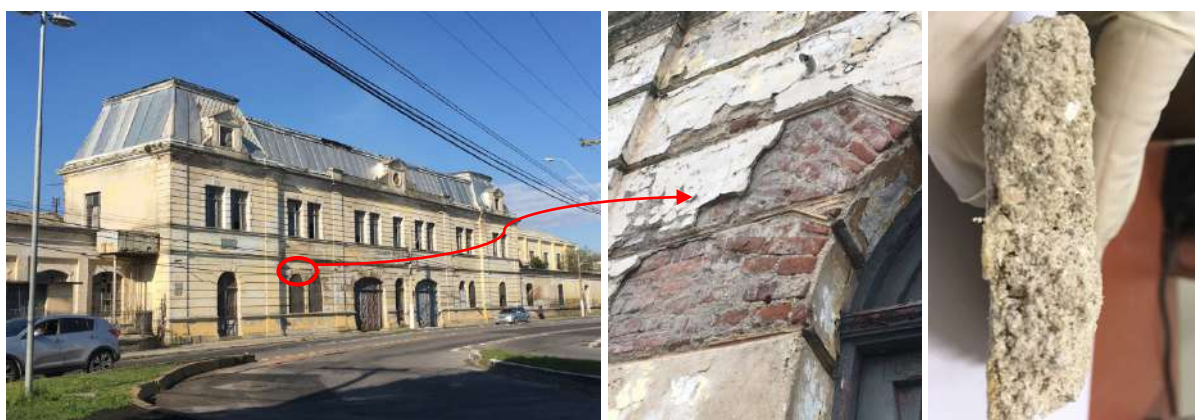


Figura 6- Fábrica Rheingantz (1873), prédio localizado na Avenida Rheingantz. Imóvel Tombado pelo IPHAE. Processo nº2778-1100/95-1. Imagens do local e da posição de extração da amostra do revestimento.



Figura 7- Creche da fábrica Rheingantz, prédio localizado na Avenida Rheingantz. Imóvel Tombado pelo IPHAE. Processo nº2778-1100/95-1. Imagens do local e da posição de extração da amostra do revestimento.

As amostras das argamassas originais foram coletadas em locais já degradados do revestimento externo, tendo o cuidado de provocar o mínimo dano possível aos paramentos, conforme demonstrado nas figuras 5, 6 e 7. Estas foram caracterizadas quanto à composição, provável, do traço, a granulometria do agregado miúdo e composição mineralógica.

3.2.1 Dissolução ácida

Para a determinação da composição do traço utilizou-se o método de dissolução ácida que permite a determinação, aproximada, da composição em peso, podendo não corresponder de forma precisa ao traço utilizado originalmente, visto que ao longo da vida útil pode ocorrer a dissolução de alguns constituintes pela água da chuva ou a decomposição por causas naturais.

O procedimento adotado foi o descrito no Caderno Técnico 8, do Programa Monumenta do IPHAN de autoria de Kanan (2008). No documento, a autora descreve que a cor, as características físicas e a granulometria da areia, determinadas através desta técnica, representam importantes parâmetros para a formulação das novas argamassas de reconstituição.

No processo, após a identificação, secagem e pesagem, as amostras foram maceradas e colocadas em um becker de vidro (Figura 8), com uma solução de ácido clorídrico (HCl 14%) para a dissolução dos carbonatos. As amostras ficaram submersas por 24 horas até que não houvesse mais a formação de bolhas.



Figura 8- Dissolução ácida das amostras coletadas.

Posteriormente, adicionou-se água destilada e agitou-se a mistura por alguns minutos, para que as partículas sólidas ficassem em suspensão. Na sequência a solução foi passada em um filtro de papel faixa branca (Figura 9) no qual os sólidos ficaram retidos. O processo de lavagem foi repetido até que a solução filtrada não apresentasse mais matéria em suspensão e a água filtrada apresentasse transparência.



Figura 9- Filtragem do resíduo através de lavagem.

Depois, o aglomerante foi descartado na forma dissolvida e o agregado, identificado pelo material retido nos filtros. O material retido e os filtros (Figura 10) foram secos em estufa a $100\pm 5^{\circ}\text{C}$ por 48 horas e, posteriormente, pesados.



Figura 10- Resíduo insolúvel das argamassas.

Ao final, a areia foi submetida a um ensaio de granulometria e o aglomerante determinado pela diferença do peso total da argamassa menos o peso da areia e dos finos (não solúveis no ácido).

A tabela 13 apresenta os resultados da dissolução ácida, sendo possível verificar alguma semelhança em termos de relação resíduo/fração solúvel nas argamassas dos prédios analisados. No entanto, de acordo com Velosa (2006) esta relação não é definidora de um traço, mas dentro dos limites esperados para argamassas antigas que variam entre 1:2 a 1:4 (aglomerante:agregado).

Tabela 13- Fração solúvel e resíduo insolúvel das argamassas antigas, após ataque ácido.

Amostra	Fração solúvel (%)	Resíduo (%)
*CM	21	79
**Fábrica	20	80
***Creche	22	78

*CM – Centro Municipal; ** Fábrica Rheingantz; *** Creche da fábrica Rheingantz

3.2.2 Análise granulométrica

A granulometria da areia, que corresponde ao resíduo proveniente da dissolução ácida, foi determinada conforme o prescrito pela ABNT NBR NM 248: 2003.

Esta norma, descreve e caracteriza parâmetros de análise das curvas granulométricas, a dimensão máxima característica do grão e o módulo de finura, conforme tabela 14.

Tabela 14- Resultados da análise granulométrica.

Ensaio	Amostras		
	Centro Municipal	Fábrica Rheingantz	Creche Rheingantz
Módulo de finura	2,66	2,87	2,45
Dimensão máxima característica (mm)	4,8	4,8	2,4

A figura 11 apresenta as curvas granulométricas das amostras analisadas.

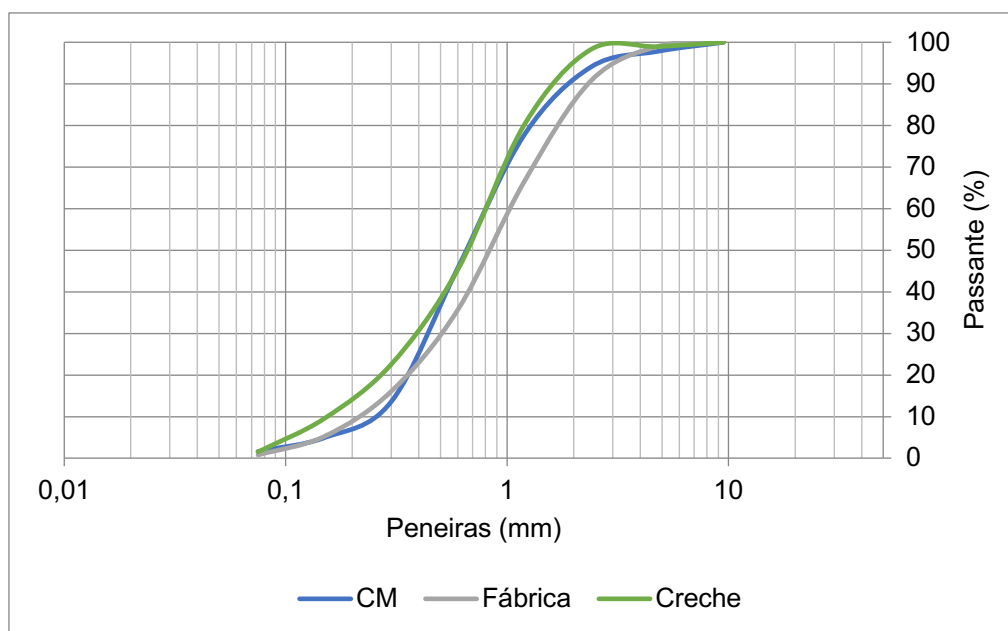


Figura 11- Curvas granulométricas dos agregados das amostras obtidas dos prédios analisados.

3.2.3 Análise mineralógica

As fases cristalinas dos materiais podem ser estudadas através da difração de raios X (DRX), que é uma das técnicas de caracterização de materiais que permite determinar a composição mineralógica de vários constituintes cristalinos.

A técnica consiste na incidência de um feixe de raios X sobre o material a ser estudado e detecta-se o feixe de raios que emerge dele. Ao interagir com a estrutura atômica da amostra, o feixe é difratado pelos seus átomos, transmitindo, como resultado, informações sobre a estrutura atômica dos mesmos, determinantes para sua completa caracterização (CALLISTER, 2007).

A análise mineralógica nas argamassas antigas foi realizada em um equipamento da marca Bruker, modelo D8 Advance, no Centro de Microscopia Eletrônica da Zona Sul- CEME-SUL na FURG, com os seguintes parâmetros:

voltagem de 40 kV, corrente de 40 mA, tubo de cobre (Cu) com comprimento de onda (λ): 1,5418Å. Os difratogramas foram registrados entre 3° e 90° (2 θ).

O resultado da caracterização mineralógica (Figura 12) indicou como fases cristalinas predominantes nas argamassas antigas o quartzo, na forma de sílica (SiO_2) e a calcita e a dolomita, na forma de carbonato de cálcio (CaCO_3) e carbonato de cálcio e de magnésio ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$).

Este resultado remete a observação quanto ao tipo de cal utilizada nas argamassas, sendo indicativo do uso de cal dolomítica, figura 12.

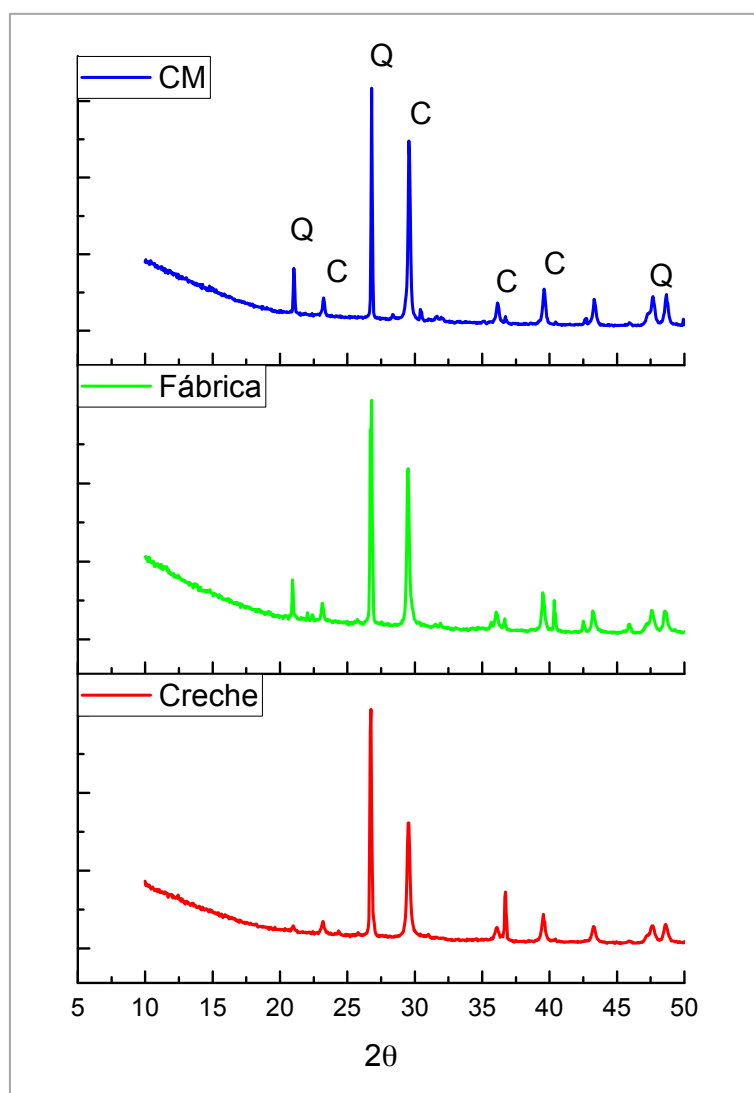


Figura 12- Difratogramas das amostras das argamassas antigas.
Notação: Q- quartzo, C- calcita/dolomita.

3.3 Caracterização das argamassas novas

3.3.1 Matéria-prima

3.3.1.1 Cal hidratada

No desenvolvimento do trabalho utilizou-se como aglomerante a cal hidratada tipo II, obtida comercialmente, que foi caracterizada de acordo com o organograma da figura 13.

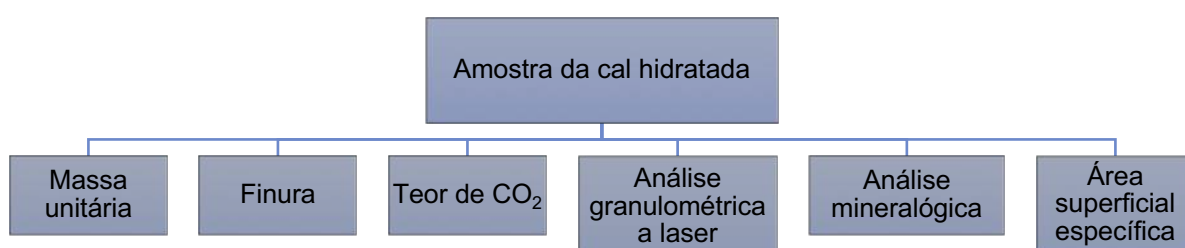


Figura 13- Organograma de ensaios para a cal hidratada.

A determinação da massa unitária foi realizada de acordo com a ABNT NBR NM 45: 2006, sendo adotado o método "C" descrito na norma. Este ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais e Construção Civil da Escola de Engenharia na FURG.

O ensaio foi realizado com a pesagens de material seco em balança de precisão e, do total foi subtraído o valor do recipiente. O resultado final apresentou o valor de 0,61 kg/cm³ para a massa unitária da cal hidratada, obtido pela média das medições dividido pelo volume do recipiente.

A finura da cal foi determinada segundo a norma ABNT NBR 9289: 2000 que estabelece os requisitos necessários para as diversas classificações das cales, onde estão definidas as porcentagens retidas nas peneiras de abertura 0,600 mm (n° 30) e de 0,075 mm (n° 200).

Este ensaio também foi realizado no Laboratório de Materiais e Construção Civil da Escola de Engenharia na FURG e apresentou como resultado o valor igual a 0,02% para a peneira n°30 e 5,58% para a peneira n°200, ambos dentro dos limites estabelecidos pela norma.

O teor de anidrido carbono (CO_2) da cal foi determinado de acordo a metodologia proposta por Paiva *et al.* (2007) e, também adotada por Souza (2013), na qual os autores informam que através deste procedimento, é possível obter o mesmo nível de precisão com maior simplicidade na execução que o obtido seguindo os critérios da norma ABNT NBR 6473: 2003, tendo-se a impossibilidade de aplicação desta.

A metodologia é descrita pelos autores da seguinte forma:

O método consiste em pesar uma amostra da cal hidratada e colocar em um frasco de Erlenmeyer. Em seguida, pesar um volume (± 25 ml) de uma solução de ácido clorídrico de concentração 50 %, juntamente com a cal. Com cuidado, os dois recipientes são retirados da balança e o ácido é adicionado à cal, devendo-se aguardar o tempo necessário para que a reação se processe e a temperatura da reação se reduza para a ambiente, durante aproximadamente 10 min. Em seguida, efetuar nova pesagem do conjunto e calcular, por diferença, a massa de CO_2 liberada (PAIVA *et al.*, 2007, p. 6).

O processo descreve as reações da titulação do carbonato de cálcio (CaCO_3) e do hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{O})$) com o ácido clorídrico (2HCl), que ocorre com desprendimento do anidrido carbônico (CO_2), conforme figura 14.

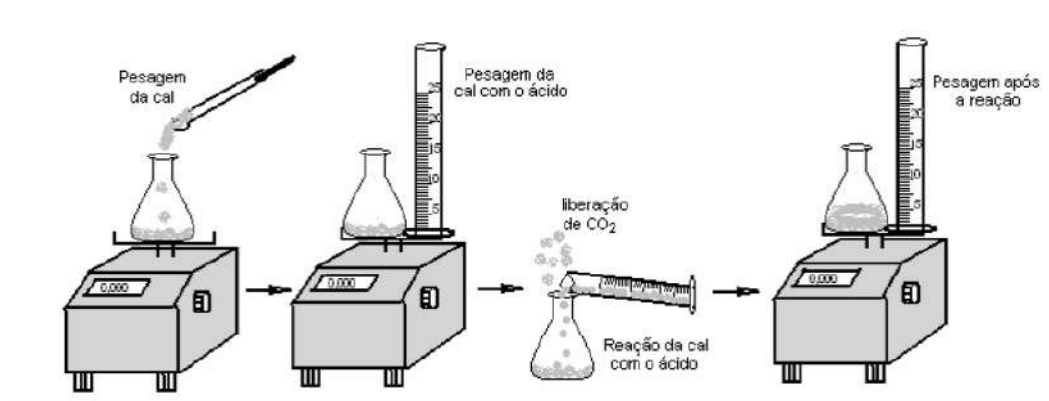


Figura 14- Esquema de determinação do teor de CO_2 .

Fonte: Paiva *et al.* (2007).

Assim, o teor de CO_2 quando aumentado, indica que a cal não sofreu uma calcinação adequada ou durante seu armazenamento entrou em contato com o CO_2 .

O valor encontrado nesse ensaio para a cal hidratada utilizada foi igual a 6,48%, abaixo do valor limite estabelecido pela norma.

A técnica adotada para a obtenção da curva granulométrica foi a granulometria a laser, que permite a determinação do tamanho de partículas para materiais que vão desde centenas de nanômetros a milímetros.

O equipamento utilizado na granulometria a laser foi o Analisador de Tamanho de Partículas MICROTAC S3000/3500, com comprimento de onda do laser de 780 nm, com faixa de determinação de tamanho de partícula por via seca de 0,24 μm até 1400 μm . Este ensaio foi realizado no laboratório da Engenharia de Oceânica da Escola de Engenharia na FURG.

O gráfico da figura 15 apresenta a curva granulométrica obtida para a cal hidratada utilizada, que apresenta como tamanho médio de partícula valor igual a 45,35 μm .

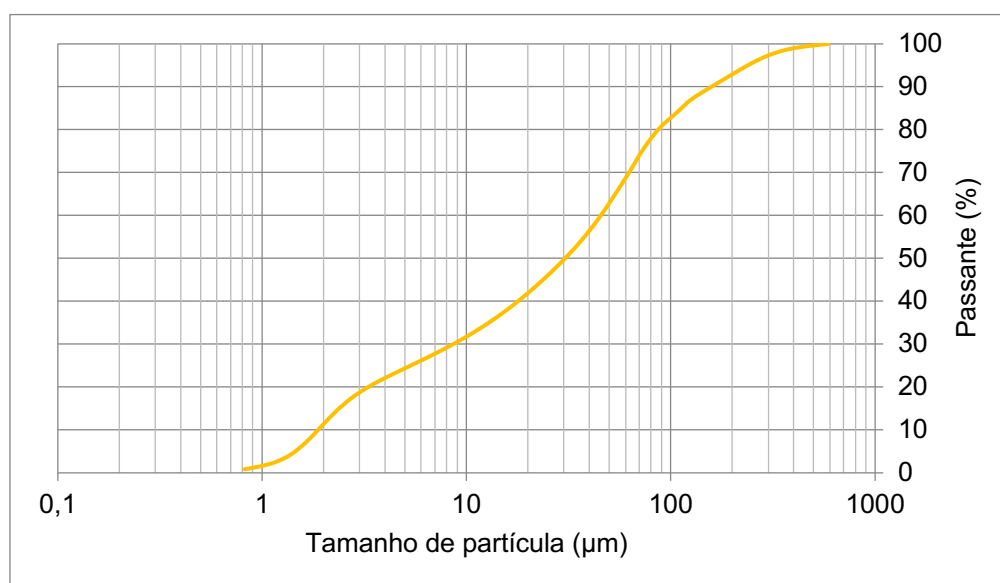


Figura 15- Curva granulométrica da cal hidratada.

A caracterização mineralógica, realizada através da técnica de difração de raio X (DRX) descrita no item 3.2.3, revelou a presença de calcita (CaCO_3), portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), brucita ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) e periclásio (MgO), conforme figura 16.

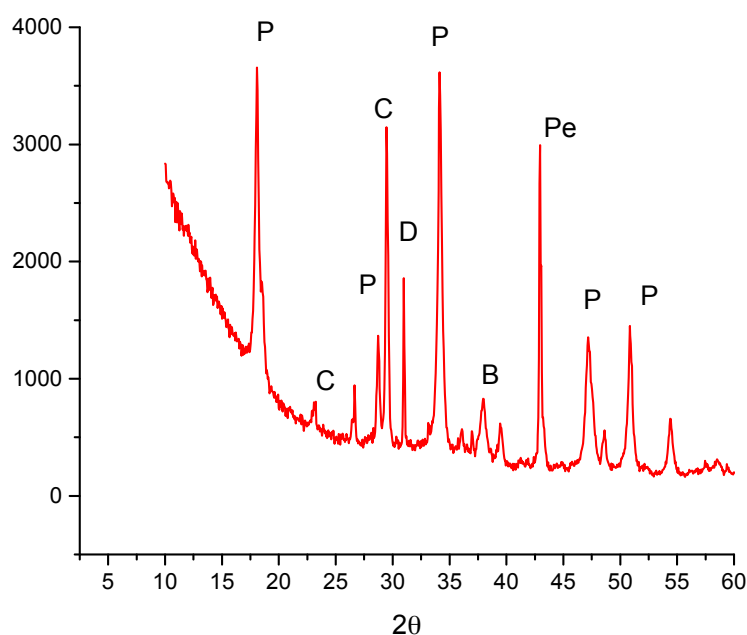


Figura 16- Difração de raio X da cal hidratada.

Notação: P- portlandita, C- calcita, D- dolomita, B- brucita, Pe- periclásio.

Estes compostos indicam se tratar de cal dolomítica, com a presença de óxido de magnésio, justificando o processo de maturação adotado no preparo das argamassas.

A metodologia para obtenção da área superficial específica foi através do ensaio B.E.T, desenvolvido por Stephen Brunauer, Paul Hugh Emmett e Edward Teller. O resultado apontou uma área superficial específica igual a 15,5 m²/g.

O equipamento utilizado foi o Analisador de superfície e de tamanho de poros ASAP (Accelerated Surface Area and Porosimetry System) 2420 da Micrometrics. Os ensaios foram realizados no Departamento de Química Analítica e Físico-Química da Universidade Federal do Ceará.

Os resultados da caracterização da cal hidratada estão expostos da tabela 15.

Tabela 15- Características físicas da cal hidratada.

Resultados	
Massa unitária (cm ² /g)	0,61
Finura- F ₃₀ (%)	0,02
Finura- F ₂₀₀ (%)	5,58
Anidrido carbono (%)	6,48
Tamanho de partícula (µm)	45,35
Área Superficial específica(m ² /g)	15,5

3.3.1.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado foi caracterizado de acordo com o organograma da figura 17.

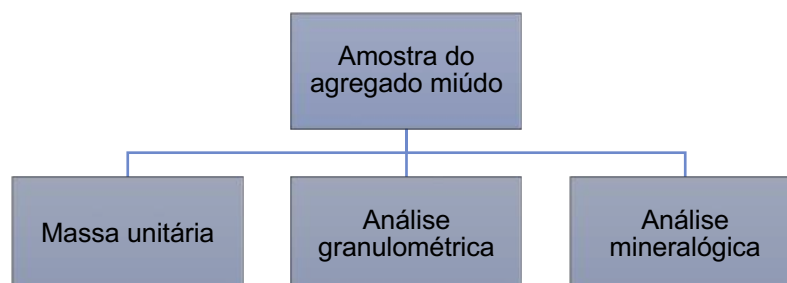


Figura 17- Organograma de ensaios para o agregado miúdo.

A determinação da massa unitária foi realizada de acordo com a ABNT NBR NM 45: 2006, tendo-se obtido para o agregado miúdo utilizado o valor igual a 1,58 kg/cm³.

A granulometria da areia foi determinada conforme a norma ABNT NBR NM 248: 2003.

De acordo com a norma, a dimensão máxima característica é uma grandeza associada à distribuição granulométrica do agregado, que corresponde à abertura nominal, em milímetros, da malha da peneira da série normal, na qual o agregado apresenta uma percentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa. O módulo de finura, corresponde a soma das percentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100.

A classificação quanto ao módulo de finura do agregado, segundo Selmo (1989) é descrita como:

- $(M.F) > 3,0$ - Granulometria grossa;
- $2,0 < (M.F) < 3,0$ - Granulometria média;
- $(M.F) < 2,0$ - Granulometria fina.

Para Carneiro (1999 *apud* BAUER, 2005) o módulo de finura não é um indicador representativo, visto que não considera a distribuição granulométrica da fração fina da areia, sendo possível a obtenção de curvas granulométricas distintas com mesmo valor de módulo de finura. Este autor propõe que a caracterização deva

ser, também, através do coeficiente de uniformidade (C_u) definido como a razão entre os diâmetros correspondentes a 60% e a 10%, tomados na curva granulométrica como a porcentagem passante, conforme equação 11.

$$C_u = d_{60}/d_{10} \quad (11)$$

Onde:

C_u = coeficiente de uniformidade;

d_{60} = diâmetro correspondente a 60% do material passante, obtido na curva granulométrica;

d_{10} = diâmetro correspondente a 10% do material passante, obtido na curva granulométrica.

Bauer (2005) considera a granulometria muito uniforme os agregados que apresentam $C_u < 5$, de uniformidade média se $5 < C_u < 15$ e, desuniforme quando $C_u > 15$. Esta análise permite uma avaliação da continuidade da distribuição granulométrica de uma areia, podendo influenciar no índice de vazios, no consumo de aglomerante e na água de amassamento para se obter a mesma trabalhabilidade. De fato, quanto mais elevado for o volume de vazios a ser preenchido pela pasta aglomerante maior o potencial de retração da argamassa.

O resultado da análise granulométrica do agregado miúdo utilizado, proveniente da cidade de Pelotas-RS, está apresentado na tabela 16 e figura 18.

Tabela 16- Características físicas do agregado miúdo.

Resultados	
Módulo de finura	2,79
Dimensão máxima característica (mm)	2,40
Coeficiente de uniformidade *	3,45
Teor de finos (%) **	0,33
* Coeficiente de uniformidade (C_u) definido como a relação entre as malhas das peneiras correspondentes a 60% e 10% do material passante.	
** Material passante na peneira # 0,075 mm.	

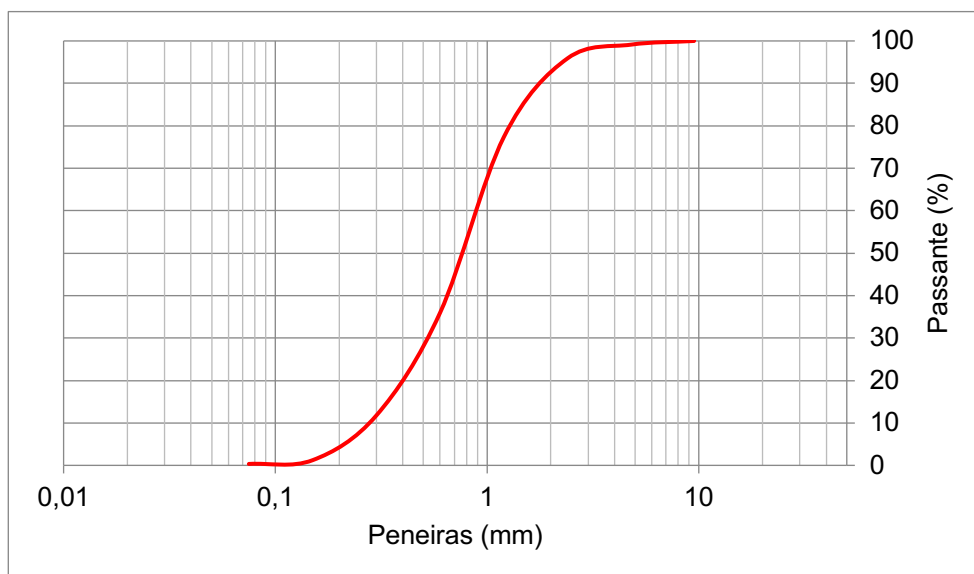


Figura 18- Curva granulométrica do agregado miúdo.

Após as análises, todo agregado foi seco em estufa e armazenado em balde plástico com vedação, a fim de propiciar um condicionamento livre de umidade e contaminação.

A análise mineralógica foi realizada de acordo com o procedimento, anteriormente, descrito e, apresentou como principal fase cristalina (Figura 21) o quartzo (Q), constituinte da areia de rio e, em menor escala, o feldspato (F).

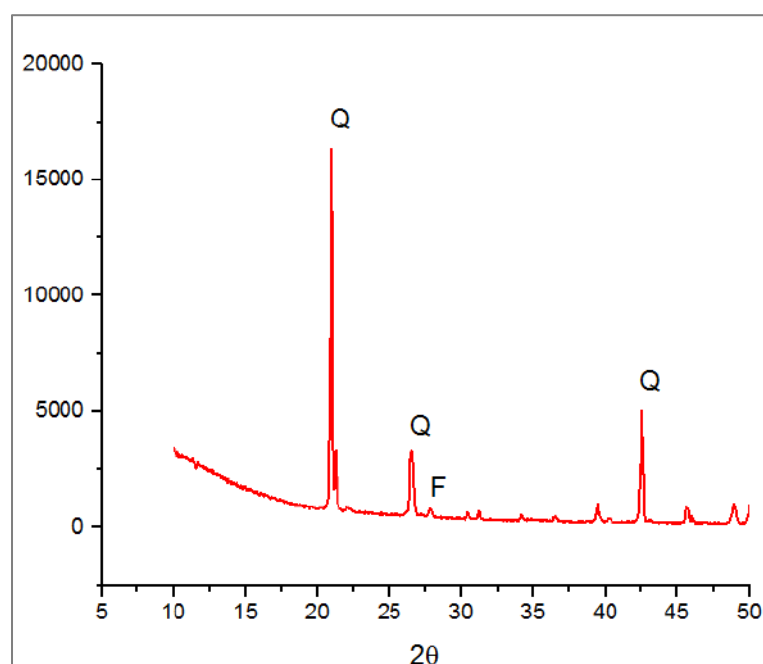


Figura 19- Difração de raio X do agregado miúdo.

3.3.1.3 Metacaulim

Os dois tipos de metacaulim utilizados para a elaboração das argamassas foram caracterizados de acordo o organograma apresentado na figura 20.

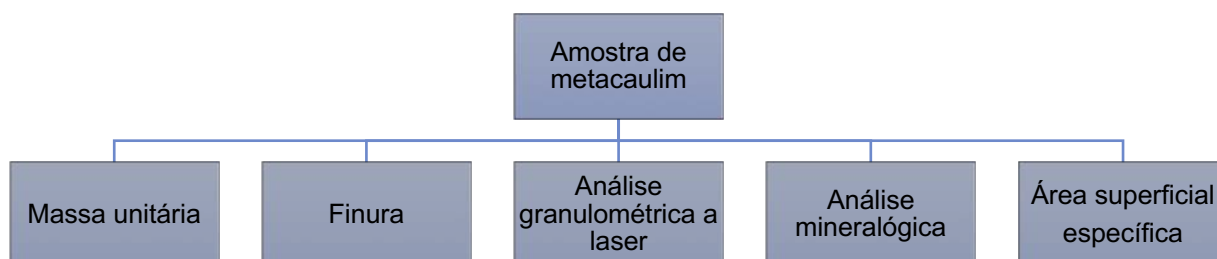


Figura 20- Organograma de ensaios para os metacaulins utilizados.

A figura 21 mostra imagens dos metacaulins utilizados, identificando que estes apresentam diferente coloração. A análise da composição química apresentada na tabela 16, foi fornecida pela empresa Metacaulim do Brasil.



Figura 21- Apresentação dos metacaulins utilizados.

A análise da composição química foi fornecida pela empresa Metacaulim do Brasil, conforme tabela 17.

Tabela 17- Característica química dos metacaulins.

(%)	P.F.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	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

Fonte: Metacaulim do Brasil.

Para os dois tipos de metacaulim o teor de SiO_2 (sílica) e Al_2O_3 (alumina) são os mais elevados. No entanto, o teor de alumina para o MK Max é 8,68% superior ao valor encontrado para o MK Ultra, sendo este dado muito importante porque a alumina é um dos fatores responsáveis pelo desencadeamento da reação pozolânica.

A determinação da massa unitária foi obtida de acordo conforme procedimento descrito para a cal hidratada, apresentando como resultado o valor de $0,56 \text{ g/cm}^3$ para o metacaulim Ultra e $0,46 \text{ g/cm}^3$ para o metacaulim Max.

O procedimento para a identificação da finura dos metacaulins foi realizado de acordo com o prescrito na norma ABNT NBR 15894-3: 2010, na qual a finura é definida pela porcentagem retida na peneira de malha $45 \mu\text{m}$. O resultado obtido foi de 12,40 % para o metacaulim Ultra e 17,45 % para o metacaulim Max, ambos abaixo do limite estabelecido em norma.

A análise granulométrica foi realizada conforme procedimento descrito para a cal hidratada, sendo obtidas para os dois tipos de metacaulim as curvas granulométricas apresentadas na figura 22, com tamanho médio de partículas igual a $32,09 \mu\text{m}$ para o metacaulim MK Ultra e $11,83 \mu\text{m}$ para o metacaulim MK Max.

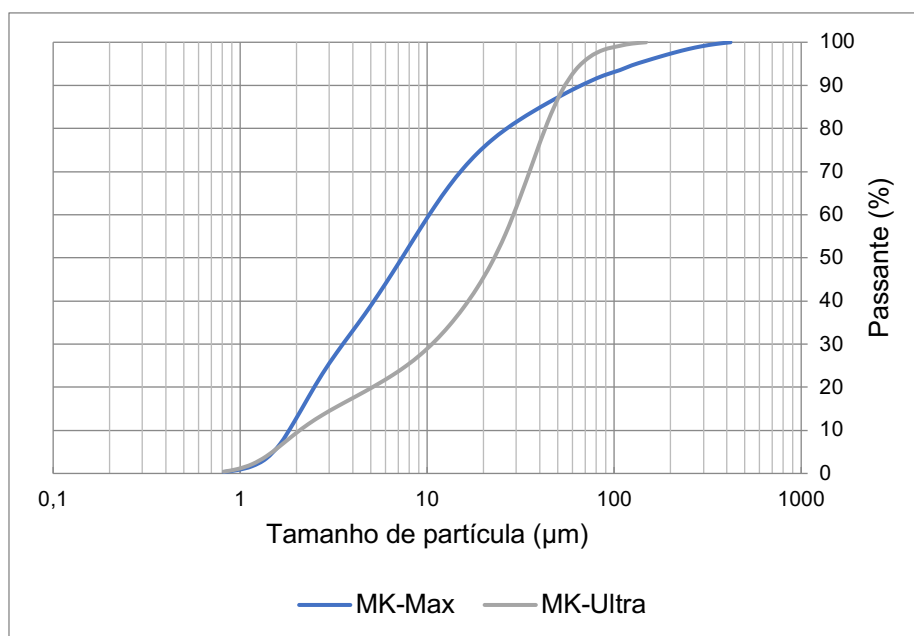


Figura 22- Curvas granulométricas dos metacaulins.

A análise mineralógica foi realizada conforme descrito no item 3.2.3, e nela identificou-se diferentes fases cristalinas para os metacaulins analisados (Figura 23), sendo estas: quartzo, illita, caulim, virgilita e muscovita.

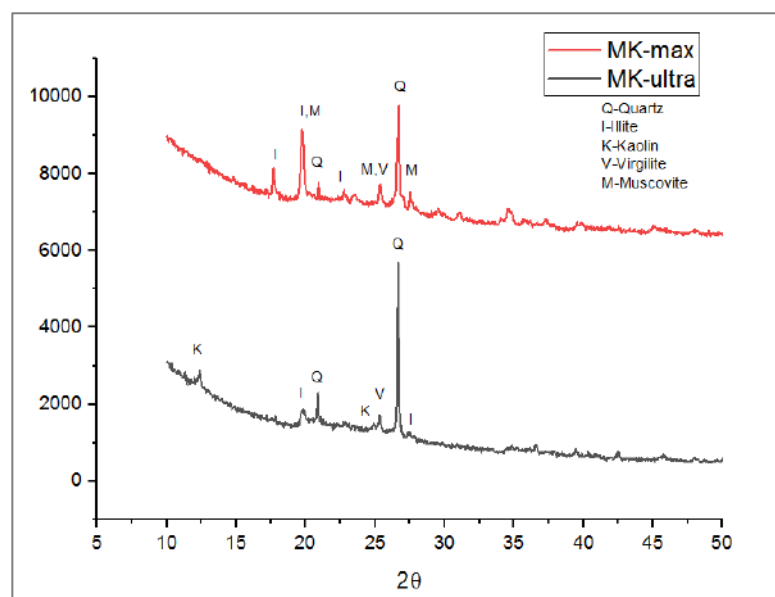


Figura 23- Difração de raio X dos metacaulins.

O valor obtido para a área superficial específica foi igual a 22,5 m²/g para o metacaulim Ultra e 26,5 m²/g para o metacaulim Max.

O resultado das características físicas e químicas dos metacaulins estão expostos da tabela 18.

Tabela 18- Resultados das características físicas e químicas dos metacaulins.

Resultados		
	HP Ultra	HP Max
Diâmetro médio de partículas (µm)	32,09	11,83
Massa unitária (kg/dm ³)	0,56	0,46
Finura (resíduo # 45 µm -%)	12,4	17,45
Área superficial específica (m ² /g)	22,5	26,6
Al ₂ O ₃ + SiO ₂ (%)	91,53	93,74

3.3.2 Produção das novas argamassas

3.3.2.1 Formulação e preparo

Na formulação das novas argamassas utilizou-se cal hidratada tipo II maturada, areia quartzosa com granulometria semelhante às das areias das argamassas originárias dos prédios históricos analisados e, os metacaulins Ultra e Max como substitutos parciais (10%) da massa da cal hidratada maturada.

Ainda que para a cal hidratada produzida industrialmente seja pouco provável, teoricamente, a necessidade de nova hidratação, foi realizada nova maturação para garantir a obtenção de propriedades nas argamassas obtidas, somente, a partir da total extinção da cal aérea, tais como: melhora na facilidade de mistura, trabalhabilidade e retenção de água.

Na nova maturação, para a determinação da quantidade de água a ser adicionada a cal hidratada foram feitos alguns testes prévios, até se obter o percentual que possibilitou uma consistência pastosa à mistura, que foi de 60% de água em relação à massa de cal.

No processo utilizou-se um balde plástico de 18 litros com tampa e foram executadas as seguintes etapas:

- colocou-se 5,0 quilos de cal hidratada tipo II em um recipiente plástico (balde plástico com tampa de 18 litros);
- adicionou-se a cal 3,0 quilos de água, de forma lenta e gradual, até que todo o pó ficasse umedecido;
- homogeneizou-se a mistura mecanicamente (Figura 24A), utilizando-se de um misturador de tinta adaptado a uma furadeira;
- ao final, tampou-se o recipiente e a mistura permaneceu em repouso por sete dias, data em que foi utilizada na produção das argamassas. A figura 24B apresenta a consistência final da pasta de cal.



(A)



(B)

Figura 24- Processo de maturação da cal. (A) Homogeneização da cal hidratada com água, (B) Consistência final da pasta.

A utilização da cal maturada possibilitou, também, similaridade com os tratados antigos que recomendavam a utilização da cal em pasta ou viva em pedra, forma em que este constituinte se apresentava para o uso (MARGALHA *et al.*, 2013).

Para a escolha do agregado miúdo utilizou-se as curvas granulométricas das argamassas antigas e a pretensão de se adotar um traço facilmente reproduzível com materiais locais, com economia em relação ao custo da matéria-prima e do frete, repercutindo em menor impacto ambiental.

A figura 24 apresenta a compatibilidade entre a curva granulométrica da areia selecionada e utilizada nas novas argamassas e as curvas granulométricas das areias das argamassas antigas.

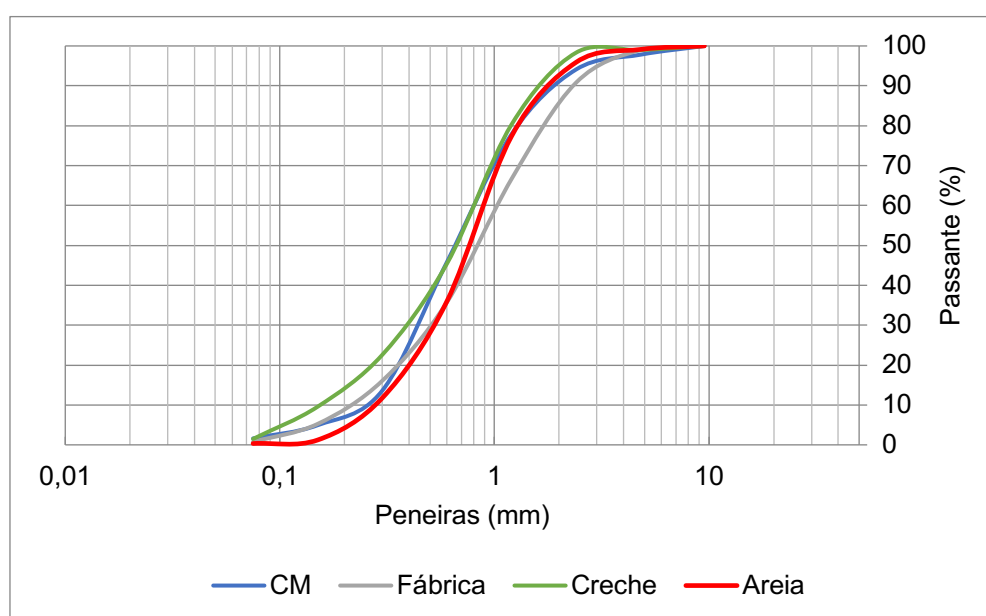


Figura 25- Curvas granulométricas da areia utilizada e dos prédios históricos analisados.

Na definição do traço das novas argamassas escolheu-se a composição em volume igual a 1:4, que representa valores muito próximos aos referenciais bibliográficos sobre argamassas antigas.

Da mesma forma, a escolha do percentual de substituição da cal por metacaulim foi pautada na análise de resultados obtidos em estudos constantes na bibliografia, em que a adoção do percentual equivalente a 10% se enquadra na faixa de melhores resultados físicos e mecânicos obtidos pelos pesquisadores Siddique e Klaus (2009), Japiassú (2011) e Figueiredo *et al.* (2014).

Na análise em conjunto das curvas granulométricas dos materiais (Figura 26), se observa que todos apresentam curvas contínuas. Com exceção, o metacaulim

Max que possui curva com distribuição uniforme, formada por grãos de tamanhos muito próximos, e menores que os grãos dos demais materiais.

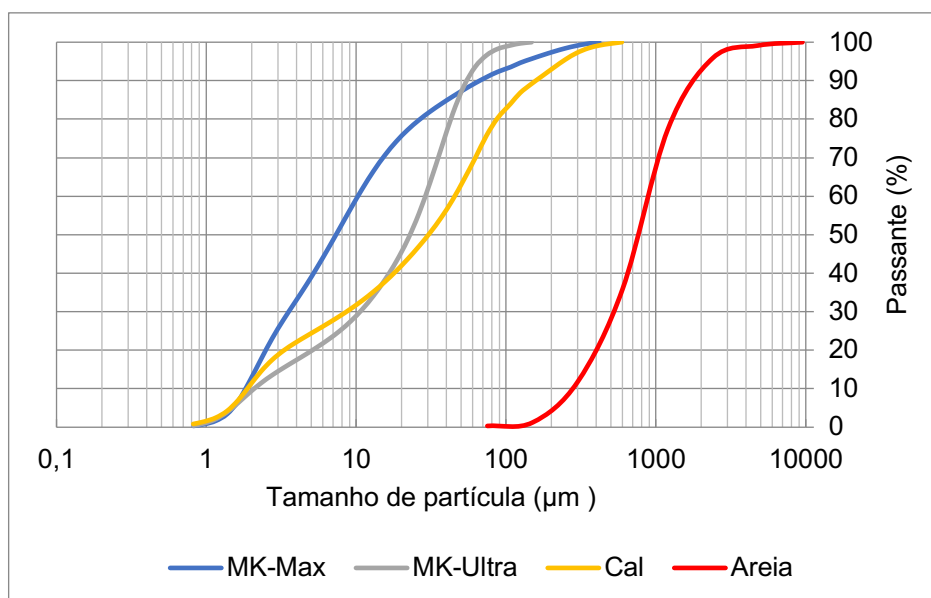


Figura 26- Curvas granulométricas dos materiais utilizados na formulação das novas argamassas.

Com as premissas acima, elaborou-se as novas argamassas cujas formulações encontram-se apresentadas na tabela 19.

Tabela 19- Identificação e composição em volume das famílias das novas argamassas.

Argamassas / Traço	Cal hidratada em pó	Metacaulim		Areia
		MK Ultra	MK Max	
A -1:4	1,00	-	-	4,0
B -1:4 (10 % MK)	0,9	0,1	-	4,0
C -1:4 (10% MK)	0,9	-	0,1	4,0

A influência das características da matéria-prima é percebida quando se realiza a comparação dos traços em volume e em massa, deste trabalho com os analisados no referencial bibliográfico. No comparativo apresentado no Anexo C, verifica-se que a diferença entre as dosagens em volume, quase na totalidade em 1:3, com maior relação aglomerante/agregado, não permanece a mesma quando se analisa os valores em massa.

A partir da caracterização da matéria-prima, foi realizada a conversão do traço em volume para massa, conforme apresentado na tabela 20.

Tabela 20- Composições em massa utilizadas nas famílias de argamassas.

Argamassas	Proporcionalidade em massa (kg)			
	Cal hidratada em pasta	MK Ultra	MK Max	Areia
A	1	-	-	10,194
B	1	0,096	-	11,326
C	1	-	0,082	11,326

A preparação das argamassas teve como base a norma ABNT NBR 13276: 2005. No entanto, como esta norma se destina às argamassas de cimento, o procedimento diferiu em termos de sequência na mistura dos materiais e no tempo de amassadura, que é tradicionalmente, um dos segredos de uma boa argamassa de cal aérea. No processo utilizou-se uma argamassadeira da marca EMIC, cuja capacidade de cubagem fez com que os traços das três famílias de argamassas fossem realizados em três bateladas consecutivas. Para tanto, todo o material utilizado foi previamente pesado em balança de precisão e adotado o seguinte procedimento:

- inicialmente, a pasta de cal hidratada maturada foi colocada na argamassadeira com 60% da água restante (Figura 29A), quantidade definida para a obtenção da consistência estabelecida, com velocidade de agitação lenta pelo tempo de 2 minutos, visando a formação de uma pasta mais fluida;

- formada a pasta, juntou-se a ela a areia e os metacaulins (Figura 27B), previamente misturados e homogeneizados, adicionando-se aos poucos o restante (40%) da água e mantendo a agitação lenta por mais 2 minutos;

- após, com o auxílio de uma espátula, raspou-se o material retido nas paredes da cuba e da pá da argamassadeira e procedeu-se dois ciclos de homogeneização (Figura 27C), ocorrendo o primeiro com agitação por 3 minutos e repouso por 3 minutos e o segundo, com agitação por 4 minutos.

- finalizados os ciclos, as argamassas foram imediatamente utilizadas na produção dos corpos de prova.



Figura 27- Processo de mistura e homogeneização das matérias-primas utilizadas nas formulações das novas argamassas.

3.3.2.2 Obtenção dos corpos de prova

Após o preparo, para cada tipo de argamassa (A, B e C), foram moldados 9 corpos de prova cilíndricos com dimensões de 5 cm x 10 cm (diâmetro e altura), 18 corpos de prova prismáticos com dimensões de 4 x 4 x 16 cm e 3 discos com 10 cm de diâmetro e 2 cm de espessura.

Os corpos de prova prismáticos foram moldados conforme a norma ABNT NBR 13279: 2005 e utilizados para os ensaios de resistência mecânica à tração na flexão e à compressão, capilaridade, índice de vazios e absorção de água; os corpos de prova cilíndricos foram moldados conforme a norma ABNT NBR 7215: 1997 e utilizados nos ensaios de salinização, durabilidade e resistência à compressão e; os corpos de prova circulares (discos) foram moldados conforme a norma CEN EN 1015-19: 1998 e utilizados para o ensaio de permeabilidade ao vapor de água.

O preenchimento dos moldes (Figura 28) foi realizado em duas etapas: primeiramente colocou-se a argamassa até a metade da altura do molde e fez-se o adensado de forma manual, ou seja, o molde foi elevado a uma altura de aproximadamente três centímetros e deixado cair, por três vezes, sobre uma superfície rígida; na sequência, preencheu-se o restante do molde até o topo, sendo este novamente adensado de forma manual; ao final, a argamassa em excesso foi removida com uma espátula.

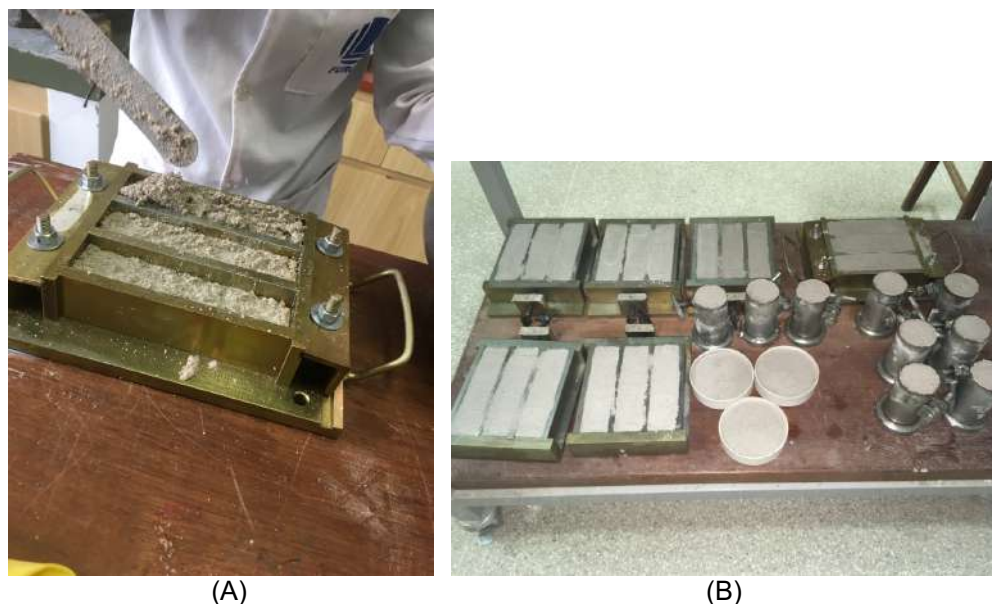


Figura 28- Processo de moldagem dos corpos de prova. (A) preenchimento e adensamento, (B) corpos de prova preenchidos: prismáticos, cilíndricos e circulares.

Como acima relatado, o processo de mistura foi realizado em 3 bateladas para cada família, sendo necessário, para fins de rastreamento, uma identificação mais aprimorada dos corpos de prova, com a numeração da batelada, a numeração da fôrma e da posição dentro da fôrma. A figura 29 apresenta, esquematicamente, a identificação adotada.

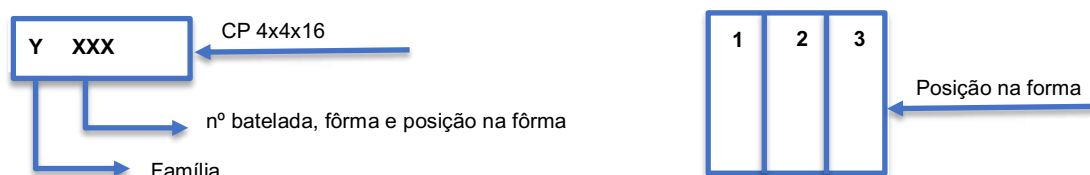


Figura 29-Identificação esquemática dos corpos de prova.

3.3.2.3 Cura dos corpos de prova

O sistema de cura adotado foi o que possibilitou obter as condições mais próximas da realidade. Assim, nos primeiros 7 dias de cura todos os corpos de prova foram mantidos nas formas em ambiente laboratorial com umidade e temperatura de $60 \pm 5\%$ e $20 \pm 2^\circ\text{C}$, respectivamente. Para garantir um maior teor de umidade, os corpos de prova foram mantidos cobertos com um filme plástico (Figuras 30A e 30B), durante os quatro primeiros dias de cura.

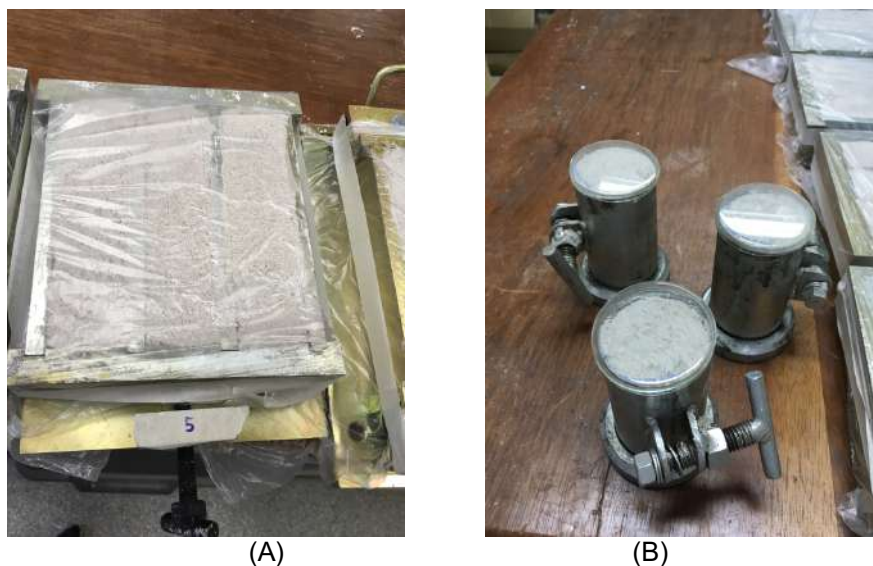


Figura 30- Processo inicial de cura dos corpos de prova. (A) fôrmas prismáticas cobertas com filme plástico, (B) fôrmas cilíndricas cobertas com tampa acrílica.

Após os sete dias, ocorreu a desforma dos corpos de prova e estes permaneceram em uma sala climatizada com umidade e temperatura de $80\pm 5\%$ e $20\pm 2^\circ\text{C}$, respectivamente, até completar 28 dias, momento em que foram expostos ao ar livre, protegidos apenas da incidência direta da chuva, conforme demonstrado nas figuras 31A e 31B. Os corpos de prova da argamassa de referência foram desformados com sete dias de atraso em relação aos corpos de prova das argamassas com metacaulim (B e C), devido a fragilidade em que se encontravam neste momento.



Figura 31- Processo de cura dos corpos de prova. (A) ambiente interno no laboratório, (B) ambiente externo ao laboratório.

O método de cura adotado com a utilização de elevada umidade ($80\pm 5\%$) e temperatura ($20\pm 2^\circ\text{C}$) teve como objetivo a viabilização de condições de cura capazes de propiciar a efetivação da reação pozolânica e de carbonatação, conforme mencionam alguns autores como, Felgueiras, 2011; Faria e Martins, 2011, 2013; Cardoso, 2013; Veiga, 2013; Silva *et al.*, 2014; Grilo *et al.*, 2014.

3.3.3 Caracterização das novas argamassas no estado fresco

As novas argamassas foram caracterizadas no estado fresco seguindo o organograma da figura 32.



Figura 32- Organograma dos ensaios realizados nas argamassas no estado fresco.

3.3.3.1 Índice de consistência

Para as argamassas no seu estado fresco, avaliou-se a influência da água na sua trabalhabilidade, através do ensaio de consistência por espalhamento, de acordo com a norma ABNT NBR 13276: 2005. Este ensaio traduz a fluidez das argamassas frescas, dando informação sobre a deformabilidade quando submetidas a determinado tipo de tensão.

Em fase de pré-testes, foi analisado o quantitativo de água a ser adicionado na mistura a fim de se obter o índice de consistência em 260 ± 5 mm, tendo em vista que parte da água já havia sido incorporada na formulação da pasta de cal. Foram analisados os percentuais entre 15 e 22% de água sobre a massa dos materiais secos (MS). O resultado conduziu ao valor de 20% para a argamassa A e 19% para a B e C, conforme apresentado na tabela 21.

Tabela 21- Teor de água utilizado no ensaio de consistência das argamassas testadas.

Argamassas	Cal hidratada em pasta (g)	Areia (g)	MK Ultra (g)	MK Max (g)	Água (g)	Água/MS (%)
A	0,480	3.058,00	-	-	0,491	0,20
B	0,432	3.058,00	0,026	-	0,475	0,19
C	0,432	3.058,00	-	0,022	0,474	0,19

3.3.3.2 Densidade de massa de massa e teor de ar incorporado

O ensaio foi baseado na norma ABNT NBR 13278: 2005, sendo a densidade de massa obtida pela razão entre o valor da massa total do conjunto (argamassa e recipiente, subtraído da massa do recipiente) e, o volume do recipiente. O teor de ar incorporado também é obtido pela razão entre o somatório da massa seca de cada componente da argamassa, mais a água e, o somatório da massa específica de cada um dos componentes.

3.3.3.3 Retenção de água da argamassa

A retenção de água das argamassas é a capacidade que o material tem, no estado fresco, de manter sua consistência e trabalhabilidade quando sujeito a solicitações que provocam perda de água, como evaporação, sucção ou absorção pelo substrato (CINCOTTO *et al.*, 1995 apud BREITENBACH, 2013).

Esta propriedade influi diretamente nas características das argamassas tanto no estado fresco como endurecido, sendo responsável pelo tempo disponível para a aplicação e acabamento, bem como, pelo nível de carbonatação no processo de endurecimento das argamassas.

A norma que estabelece o procedimento de ensaio é a ABNT NBR 13277: 2005. No entanto, devido a indisponibilidade do equipamento denominado Funil de Büchner utilizado na referida norma, utilizou-se a versão antiga da norma ABNT NBR 13277: 1995.

3.3.4 Caracterização das novas argamassas no estado endurecido

Para as novas argamassas caracterizadas no estado endurecido, os ensaios iniciaram após 28 dias de cura e se estenderam por até 540 dias.

O organograma da figura 33 apresenta os ensaios e as respectivas idades em que estes foram realizados e, na sequência, é descrita a metodologia desenvolvida.

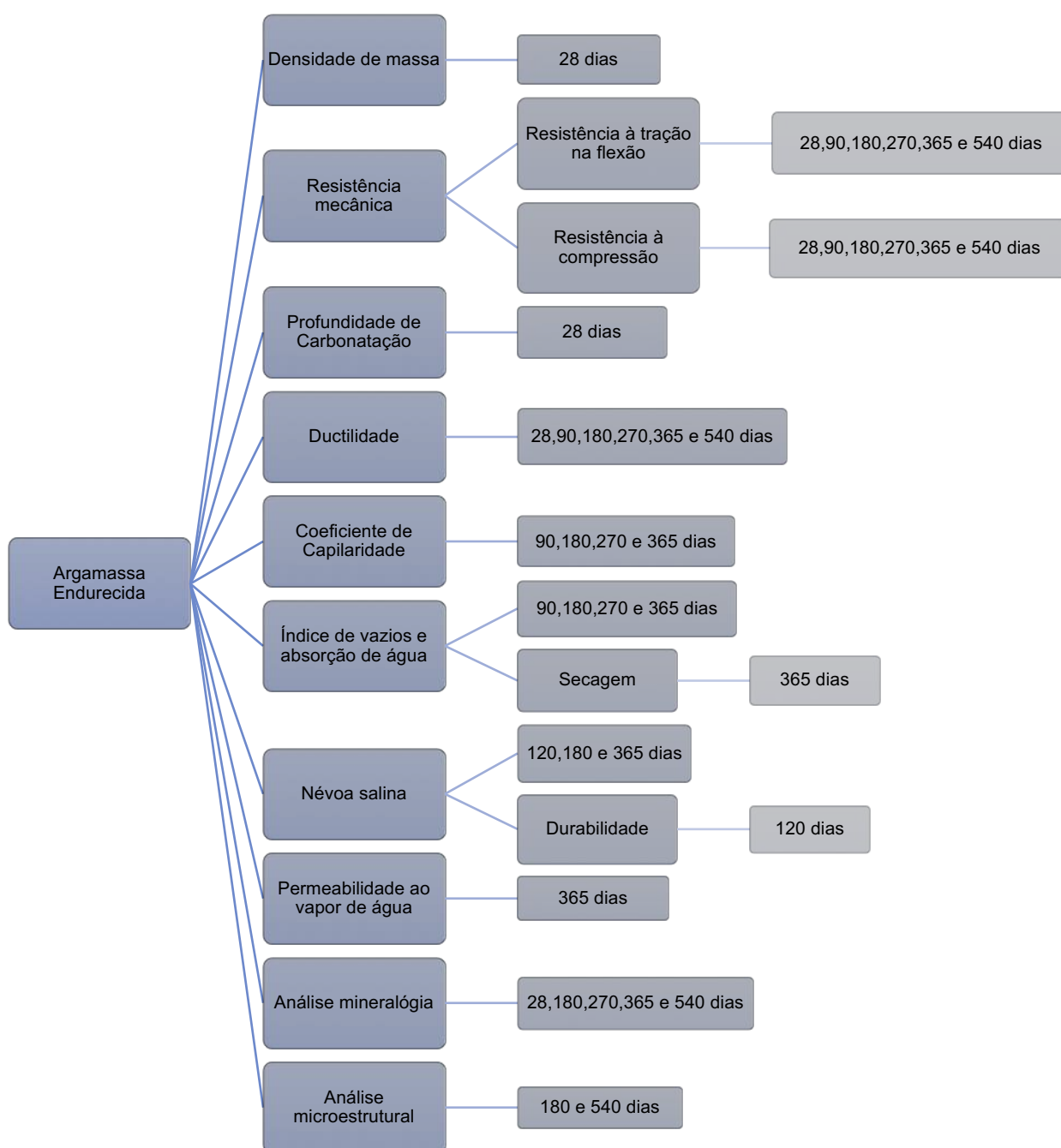


Figura 33- Organograma dos ensaios realizados nas argamassas no estado endurecido.

3.3.4.1 Densidade de massa aparente

O ensaio de densidade de massa aparente no estado endurecido foi realizado conforme a ABNT NBR 13280: 2005, utilizando-se a média dos 18 corpos de prova, aos 28 dias de cura, a partir dos quais se verificou a variação de massa, analisando a perda de massa decorrente da evaporação de água e das reações de hidratação. A partir deste momento, a análise ocorreu com os corpos de prova disponíveis até os 180 dias de cura, visto que ao longo do período em análise fez-se ensaios destrutivos.

3.3.4.2 Resistência mecânica à tração na flexão e à compressão

Nas argamassas endurecidas a resistência à tração na flexão (Figura 34A) e a resistência à compressão (Figura 34B) foram determinadas utilizando-se 3 corpos de prova prismáticos por cada formulação de argamassa, conforme descrito na ABNT NBR 13279: 2005. Neste ensaio utilizou-se uma prensa universal da marca INSTRON, modelo 8801, existente no Laboratório de Análise de Tensões- POLICAB do curso de Engenharia Mecânica da FURG.



Figura 34- Ensaio de resistência mecânica. (A) Tração na flexão, (B) Compressão.

3.3.4.3 Profundidade de Carbonatação

Em amostras obtidas após a ruptura dos corpos de prova ensaiados à compressão, fez-se a análise da profundidade de carbonatação que seguiu o procedimento RILEM CPC-18: 1988.

As medidas de profundidades de carbonatação foram realizadas com paquímetro, após a aspersão da solução de fenolftaleína (1% de fenolftaleína, 70 % álcool etílico e 29% de água destilada) sobre a superfície fraturada.

3.3.4.4 Ductilidade

A ductilidade das argamassas foi avaliada através da relação entre a resistência à tração na flexão e resistência à compressão (R_t/R_c) (RODRIGUES, 2004). Esta propriedade, também mencionada por Moropoulou *et al.* (2005a), relaciona de forma indireta o módulo de elasticidade, indicando que baixas relações são caracterizadas por um comportamento elástico ou módulos de elasticidade reduzidos.

3.3.4.5 Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade

Para realização do ensaio de absorção de água por capilaridade seguiu-se o método de ensaio descrito na ABNT NBR 15259: 2005, sendo utilizados três corpos de prova para cada formulação de argamassa. O ensaio foi realizado no laboratório de Materiais e Construção Civil da Escola de Engenharia da FURG.

Devido ao lapso temporal entre a execução dos ensaios (um ano), em que haveria uma grande probabilidade de alguns ensaios serem realizados em época de alta umidade relativa do ar (meses de inverno), optou-se por secar os corpos de prova por 24 horas na estufa a $100 \pm 5^\circ\text{C}$, evitando o eventual teor de umidade que pudessem adquirir no ambiente externo, inviabilizando a análise comparativa ao longo do tempo.

As leituras foram realizadas nos tempos de 0, 4, 10, 16, 36, 64 e 90 minutos, permitindo a representação gráfica dos resultados em função da raiz quadrada do tempo. As figuras 35A, 35B, 36A e 36B exemplificam a execução do ensaio.



(A)

(B)

Figura 35- Ensaio de absorção de água por capilaridade. (A) nivelamento do cesto, (B) aferição da lâmina de água.



(A)

(B)

Figura 36- Ensaio de absorção de água por capilaridade. (A) após 4 minutos iniciais do início do ensaio, (B) término do ensaio.

O valor da absorção de água por capilaridade (g/cm^2) foi obtido através do quociente entre a variação de massa pela área da seção transversal do corpo de prova ($4 \times 4 \text{ cm}$) em contato com a água e, o coeficiente de capilaridade ($\text{g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$ ou $\text{Kg/m}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$) calculado através do coeficiente angular da reta que passa pelos pontos representativos, aos 10 e 90 minutos.

3.3.4.6 Índice de vazios e absorção de água

Para a determinação do índice de vazios das argamassas seguiu-se o método de ensaio descrito na ABNT NBR 9778: 2005, sendo utilizados três corpos de prova prismáticos para cada família de argamassa.

Os materiais porosos possuem vazios ocupados por ar, água ou vapor de água, e de acordo como estes poros estão interligados pode-se constituir uma porosidade aberta, com uma rede contínua de poros, ou fechada, quando não há interligação entre eles. A análise desta propriedade é muito significativa, pois envolve o mecanismo de circulação de água no interior da argamassa e de acordo com a volume, geometria e dimensão dos poros, influencia a velocidade de secagem.

Para a realização do ensaio usou-se o mesmo critério apresentado acima, os corpos de prova foram condicionados por 24 horas na estufa a $100\pm 5^{\circ}\text{C}$. A pesagem hidrostática foi realizada conforme apresentado na figura 37.



Figura 37- Pesagem hidrostática dos corpos de prova após o processo de imersão total e fervura.

Sendo a água um dos principais agentes de degradação dos revestimentos em argamassa, na continuidade deste ensaio, foi analisada a capacidade de secagem das argamassas, visto que esta é uma característica essencial para o adequado desempenho frente à ação da água da chuva. Para os revestimentos externos, pretende-se que a absorção seja lenta e a secagem rápida.

Desta forma, o ensaio foi executado após os corpos de prova terem sido submetidos a saturação por imersão. A secagem ocorreu no ambiente interno ao laboratório com temperatura e umidade constante ($T=20\pm 2^{\circ}\text{C}$ e $UR= 60\pm 5\%$) e, as leituras das medições executadas a cada 24 horas, durante 120 horas, a fim de produzir a curva de secagem, também denominada, curva de evaporação.

Para Brito (2009), a curva de secagem (Figura 38) expressa o teor de água da amostra, dado em porcentagem sobre a massa seca como função do tempo e, o declive da curva corresponde a taxa de secagem.

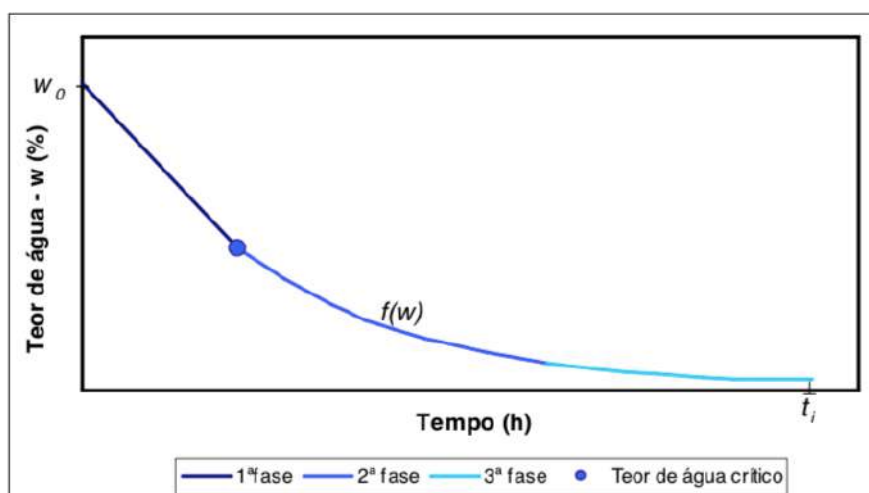


Figura 38- Curva típica de secagem de materiais porosos

Fonte: Brito (2009)

As curvas de secagem representam o processo pelo qual a água abandona o material, que envolve o transporte do líquido a partir da evaporação até a propagação do vapor para ambiente. A secagem depende das propriedades do material, das condições ambientes, forma das amostras, teor de água inicial e se o processo ocorre com a evaporação uni ou multidirecional (BRITO, 2009).

Para a determinação do teor de água dos corpos de prova foi utilizada a equação 12:

$$W_{t=} = \frac{m_i - m_0}{m_0} * 100 \quad (12)$$

Onde:

W_t = teor de água no instante t_i (%);

m_i = massa do CP no instante t_i (g);

m_0 = massa do CP seco (g).

O procedimento adotado permitiu uma secagem multidirecional homogênea em todas as faces dos corpos de prova, que ficaram apoiados sobre um suporte metálico gradeado, facilitando o transporte de umidade do interior do material, sendo virados a cada pesagem. O índice de secagem foi calculado através da equação 13.

$$I.S. = \frac{\int_{t_0}^{t_i} f(W_i) * dt}{W_0 * t_i} \quad (13)$$

Onde:

I.S.= índice de secagem;

$f(w_i)$ = teor de água do corpo de prova (%) em função do tempo

W_0 = teor de água inicial (%);

t_i = tempo total do ensaio (h).

Este ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais e Construção Civil da Escola de Engenharia na FURG.

3.3.4.7 Permeabilidade ao vapor de água

O ensaio de permeabilidade ao vapor de água foi realizado com o objetivo de determinar a quantidade de vapor de água que se difundiu por unidade de tempo, quando a argamassa esta sujeita a uma diferença de pressão de vapor entre duas superfícies, em que o transporte de vapor pode ser descrito como um processo de difusão, regido pela lei de Fick (RODRIGUES, 2004; FARIA; MARTINS, 2011; CARBONE *et al.*, 2013).

Devido as limitações, no que se refere ao funcionamento da câmara climatizada, este ensaio sofreu algumas alterações, não seguindo na íntegra os procedimentos expostos nos normativos internacionais como, American Society For Testing And Materials - ASTM E96: 2016 e European Committee For Standardization - CEN EN 1015-19: 1998. Rodrigues (2004) em seu trabalho também realizou adaptações às normas, recorrendo a ficha de ensaio Fe 05 UNL/DEC, descrita por Veiga e Santos (2016).

As diferenças de pressões e a temperatura de ensaio foram adaptadas de acordo com os recursos disponíveis no laboratório, sendo, por isso que, os resultados obtidos foram usados apenas na comparação entre a argamassa de referência e as novas argamassas.

Para a realização do ensaio foram utilizadas 3 amostras circulares (discos) para cada tipo de argamassa, sendo este o resultado da média da espessura de três pontos de medições. O ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais e Construção Civil da Escola de Engenharia na FURG.

Dois métodos podem ser utilizados para a execução deste ensaio: o Método do dessecante ou copo seco e o Método da água ou do copo úmido. O primeiro é utilizado para identificar o fluxo do vapor de água do exterior para o interior do copo e o segundo mede o vapor do interior para o exterior do copo. Para este estudo foi adotado o método do dessecante (copo seco), onde foram criados dois ambientes distintos nas faces da amostra, com umidade relativa e pressão parcial de vapor de água diferentes. O fluxo de vapor de água ocorreu do exterior do copo (ambiente mais úmido) para o interior (ambiente mais seco), conforme figura 39.

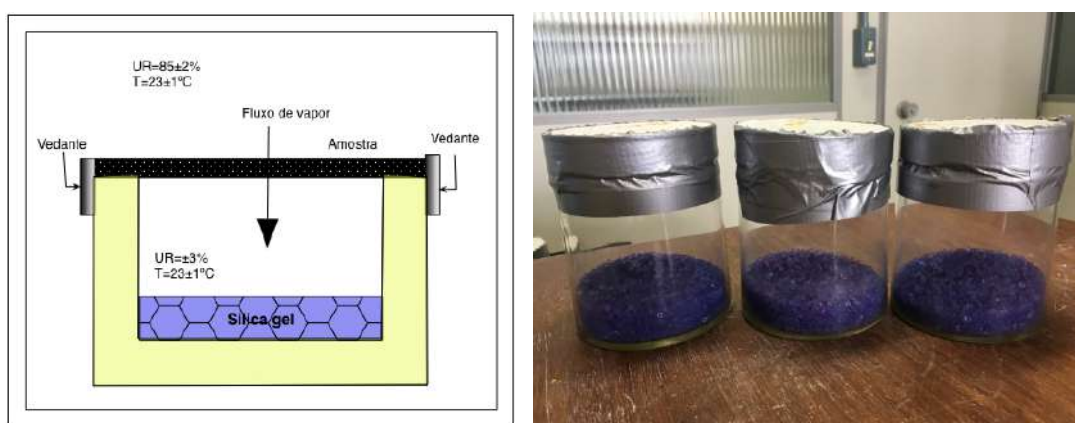


Figura 39- Esquema adotado para o ensaio de permeabilidade ao vapor e imagem das amostras preparadas para o ensaio.

Conforme apresentado (Figura 39), depois de secas em estufa a $100\pm5^{\circ}\text{C}$, as amostras de argamassa, foram apoiadas nas bordas de frascos de vidro contendo em material dessecante (sílica-gel) e os pontos de contato entre o vidro e a amostra foram vedados com massa de calafetar e fita “Silver Tape”. O uso de sílica-gel garantiu que a umidade relativa do ar no interior do recipiente ficasse entre 0 e 3%.

Os conjuntos (frasco+amostra) foram pesados e acondicionado no interior da câmara climatizada, que devido a problemas técnicos não estava em operação, garantido apenas no seu interior uma condição de contorno de $23\pm1^{\circ}\text{C}$ de temperatura e umidade relativa do ar de $85\pm2\%$ (mantida com o emprego de um recipiente com água no seu interior). Foram realizadas pesagens periódicas, a cada 24 horas durante 10 dias, de modo a aferir ganho de massa durante o ensaio, figura 40.



Figura 40- Ensaio de permeabilidade ao vapor. Corpos de prova no interior da câmara de climatização.

O fluxo de vapor unidirecional que atravessa a amostra, corresponde ao declive da reta que se obtém durante o ensaio, representado pelo gráfico que apresenta a variação de massa (kg) em função do tempo decorrido (s).

De acordo com a norma CEN EN 1015-19: 1998, a permeabilidade ao vapor de água (π) é função da permeância de água (Λ).

3.3.4.8 Resistência à névoa salina

Os ensaios acelerados procuram simular uma determinada condição de exposição que ocorre naturalmente, ao longo da vida útil das construções, diminuindo o intervalo de tempo entre as ocorrências das continuas exposições à determinada solicitação ou por meio do aumento da agressividade associada à determinada condição de exposição (KAZMIERCZAK *et al.*, 2016).

Devido ao fato de não existir normativas para a análise de resistência à salinidade em argamassas, o ensaio de névoa salina (Salt spray) foi realizado conforme especificações da ABNT NBR 8094:1983, norma que analisa a exposição de material metálico revestido e não revestido à corrosão por névoa salina.

Para este ensaio foi utilizado o equipamento marca Equilan-CCT-600, figura 41A e B, com solução de NaCl a 5%, ficando os corpos de prova expostos no equipamento pelo período de 336 horas, conforme metodologia adotada por Rocha *et al.* (2006), Mota; Oliveira e Carneiro (2016) e Azevedo *et al.* (2018). O ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais e Construção Civil da Escola de Engenharia na FURG.

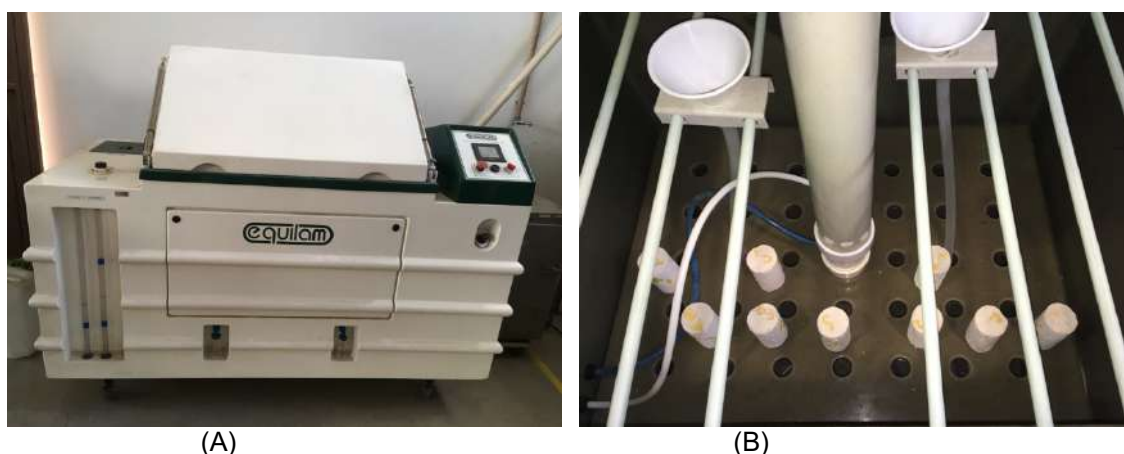


Figura 41- Ensaio de exposição à névoa salina. (A) equipamento de ensaio, (B) amostras na câmara de salinização.

A coleta de dados ocorreu aos 120, 180 e 365 dias. Após, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão, realizado conforme a norma ABNT NBR 7215: 1997, utilizando 3 corpos de prova cilíndricos por cada formulação de argamassa, rompidos em uma prensa universal da marca EMIC - modelo DL-50, existente no Laboratório de Engenharia Civil e Geotecnia do curso de Engenharia Civil da FURG.

A análise da quantidade de cloretos retidos nos corpos de prova foi feita conforme metodologia de Rodrigues (2004) e Rodrigues (2005), a partir do cálculo da diferença entre a massa seca inicial dos corpos de prova e a massa seca dos corpos de prova após a exposição à névoa salina.

Complementando a verificação da durabilidade quanto à degradação física e a variação de massa, após o primeiro ensaio na câmara de salinização (120 dias) as amostras foram submetidas a 23 ciclos semanais de saturação e secagem. Este ensaio foi realizado em ambiente do laboratório ($T=20\pm2^{\circ}\text{C}$ e $UR=60\pm5\%$) onde as amostras ficaram por dois dias em um recipiente fechado imersas em uma lâmina de água, a fim de provocar ascensão da água por capilaridade e os outros cinco dias fora do recipiente, no mesmo ambiente, determinando semanalmente a variação de massa e avaliação visual do estado de integridade. Depois deste período, as amostras ficaram expostas por 60 dias neste mesmo ambiente e, também, submetidas ao ensaio de resistência à compressão.

Este ensaio não normalizado foi nortado pelos estudos de Rodrigues (2005) e Carvalho e Carasek (2015).

Para a verificação da presença de cloretos e da eventual formação do sal de Friedel, após a exposição à névoa salina, fez-se a análise mineralógica no difratômetro de raio -X das amostras salinizadas.

3.3.4.9 Análise mineralógica

Para a execução deste ensaio foram obtidas amostras de corpos de prova ensaiados à compressão, em que uma pequena amostra do corpo de prova foi triturada e moída em um almofariz e, após, foi utilizada a fração passante na peneira #200 (0,075 mm).

3.3.4.10 Análise da microestrutura

Utilizou-se da microscopia eletrônica de varredura para a obtenção de informações sobre a microestrutura (morfologia e textura) das amostras em forma de imagem eletrônica. A principal razão para a utilização desta técnica é a alta resolução que pode ser obtida quando as amostras são observadas, valores da ordem de 2 a 5 nanômetros, e a possibilidade de identificação pontual da composição química das amostras por espectroscopia por dispersão de energia (EDS) a partir do auxílio de uma sonda acoplada ao microscópio.

O equipamento utilizado foi um microscópio eletrônico de varredura, em modo alto e baixo vácuo, da marca Jeol, modelo JSM - 6610LV, com microsonda de EDS, no Centro de Microscopia Eletrônica da Zona Sul na FURG.

Para a visualização no microscópio, foi necessário obter uma amostra com a superfície, relativamente, plana e que não tivesse recebido nenhum tipo de atrito, para não alterar as tensões superficiais do material, apenas foi fraturada, manualmente.

4 Resultados e Discussão

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos em atendimento aos objetivos específicos da tese.

4.1 Caracterização no estado fresco

Na caracterização do índice de consistência das novas argamassas obteve-se os resultados apresentados na tabela 22, os quais apresentam valores para o espalhamento dentro do estabelecido pela norma (260 ± 5 mm), conferindo trabalhabilidade adequada às argamassas.

Tabela 22- Índice de consistência das argamassas testadas.

Argamassas	Índice de consistência (mm)	Água/MS	Água/Agl.
A	261	0,20	2,23
B	256	0,19	2,15
C	260	0,19	2,18

Notação: MS- Material Seco, Agl.- Aglomerante (cal+Mk)

Nos resultados, percebe-se que as argamassas A e C possuem praticamente o mesmo índice de consistência, ainda que na primeira se tenha utilizado mais água de amassamento. Este resultado se justifica pela presença das partículas mais finas do metacaulim Max ($11,83 \mu\text{m}$) que melhoraram as condições de coesão interna da argamassa, com a diminuição da tensão superficial da pasta aglomerante e a adesão ao agregado, como relatado por Cardoso (2013) e Mergulhão (2014).

Na caracterização da densidade de massa e do teor de ar incorporado das novas argamassas obteve-se os resultados apresentados na tabela 23, que mostram

que são, praticamente, iguais, indicando que houve um processo similar de mistura, moldagem e adensamento

Tabela 23- Densidade de massa e teor de ar incorporado das argamassas testadas.

Argamassas	Densidade de massa (kg/m³)	Teor de ar incorporado (%)
A	1998	3
B	1999	3
C	2015	2

Na análise da tabela 23, também, observa-se que para as argamassas A e B, os valores foram menores, possivelmente ocasionado pelo tamanho de partícula da cal (45,35 μm) e do metacaulim Ultra (32,09 μm), maiores que o tamanho da partícula do metacaulim Max (11,89 μm). Para a argamassa C observou-se que houve densificação da massa e menor quantidade de ar incorporado, indicando que o menor tamanho de partícula do metacaulim influenciou reduzindo a formação de bolhas de ar, próprias do processo de mistura.

Como já visto pelos pesquisadores Carasek (2007) e Recena (2015), o maior teor de ar incorporado nas argamassas propicia melhor trabalhabilidade, porém, pode trazer consequências negativas às suas resistências mecânicas e à sua aderência ao substrato.

Quanto à retenção de água, fator responsável pelo grau de carbonatação da cal no processo de endurecimento das argamassas, para as novas argamassas obteve-se os resultados apresentados na tabela 24, na qual é possível identificar que para os três tipos de argamassa ocorreu elevada retenção de água.

Tabela 24- Retenção de água das argamassas.

Argamassas	Retenção de água (%)
A	98
B	96
C	97

Os resultados obtidos mostraram que teor de água utilizado nas diferentes formulações das argamassas (sem e com metacaulins) possibilitará um adequado processo de carbonatação. Além disto, a maior retenção de água é favorável para evitar a sucção rápida pelo suporte e por evaporação, promovendo as reações de hidratação do aglomerante, com ganho progressivo de resistência e aderência ao

substrato, conforme mencionado por Silva; Brito e Veiga (2007) e Recena (2015). A capacidade de retenção de água é um fator muito importante quando se considera que as alvenarias dos edifícios antigos absorvem maior quantidade de água, devido a sua elevada porosidade, influenciando, desta forma, o processo de secagem.

O conjunto de propriedades analisadas no estado fresco, tabela 25, permite observar que não ocorreu alteração relevante entre a argamassa de referência e as demais, com a presença de metacaulim, sendo indicativo que o maior teor de finos, com maior área superficial, não comprometeu o desempenho no estado fresco.

Tabela 25- Retenção de água das argamassas.

Argamassas	Índice de consistência (mm)	Água/MS	Densidade de massa (kg/m³)	Teor de ar incorporado (%)	Retenção de água (%)
A	261	0,20	1998	3	98
B	256	0,19	1999	3	96
C	260	0,19	2015	2	97

4.2 Caracterização no estado endurecido

4.2.1 Densidade de massa

A tabela 26 apresenta a densidade de massa das argamassas aos 28 dias de cura, onde percebe-se que densidade de massa das argamassas com metacaulim são superiores à de referência, em torno de 3%. Este resultado se justifica pela inserção das partículas finas dos metacaulins Ultra e Max, que propiciaram um maior empacotamento, preenchendo os vazios da mistura aglomerante/agregado.

Tabela 26- Resultado do ensaio de densidade de massa aos 28 dias de cura.

Argamassas	Densidade de massa (kg/m³)
A	1763
B	1816
C	1811

Este fato já foi relatado por Japiassú (2011) e Breitenbach (2013), quando mencionaram que os valores mais altos de densidade são devido ao aumento do teor de finos, provocando maior grau de empacotamento nas argamassas. Para as

autoras, a densidade de massa se constitui um indicativo da compactidade do conjunto da mistura agregado/aglomerante.

Devido o longo processo de carbonatação das argamassas de cal, fez-se a análise da variação da densidade de massa, desde a desforma (aos 7 dias) dos corpos de prova até a idade de 180 dias, conforme demonstrado na figura 42.

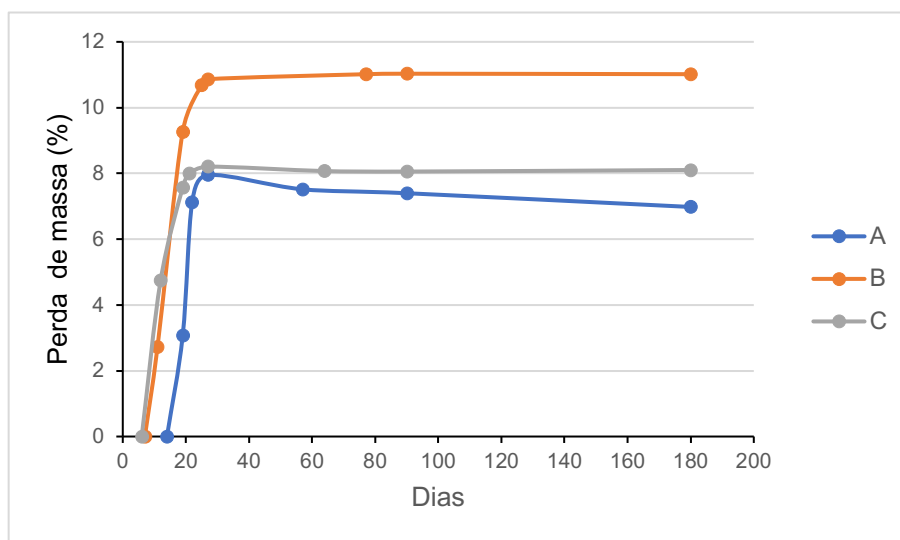


Figura 42- Variação de massa das argamassas durante o período de 180 dias.

Como pode-se ver no gráfico (Figura 42), as densidades de massa no estado endurecido tendem a reduzir até que ocorra a estabilização da saída de água por secagem e depois, devido ao processo de carbonatação, tendem a estabilizar ou elevar-se gradualmente.

A densidade de massa endurecida em relação a densidade no estado fresco apresenta reduções mais acentuadas nos primeiros 28 dias de cura, com perda de 11,76% para argamassa A; 9,15% para a argamassa B e 10,12% para a argamassa C, que podem ser atribuídas a evaporação da água em excesso e, também, pelas reações de carbonatação e, eventuais reações pozolânicas devido a presença do metacaulim.

Após os 28 dias, as argamassas B e C mantiveram-se estáveis ao longo do período de análise e a argamassa A, apresentou ganho de massa no valor de 1,05%. Japiassú (2011) também verificou este aumento em sua pesquisa, relacionando este fato com a carbonatação da argamassa, visto que nesse processo ocorre a transformação do hidróxido de cálcio em carbonato de cálcio, cuja massa molecular é superior à do hidróxido de cálcio.

4.2.2 Resistência mecânica

Na análise da resistência à compressão das argamassas sem (A) e com metacaulim (B e C), ocorrida no período de 28 a 540 dias de cura, foram obtidos os resultados apresentados na tabela 27.

Tabela 27- Resistência à compressão das argamassas testadas.

Idade	A		B		C	
	MPa	DV	MPa	DV	MPa	DV
28	0,35	0,08	0,47	0,02	0,47	0,02
90	1,11	0,15	0,59	0,04	0,72	0,08
180	1,38	0,09	0,73	0,08	0,71	0,10
270	1,66	0,14	0,75	0,03	0,99	0,02
365	2,00	0,26	0,64	0,05	1,02	0,07
540	2,79	0,05	0,85	0,02	0,99	0,13

- DV – Desvio padrão

Analisando-se os resultados (Tabela 27) verifica-se que aos 28 dias de idade a argamassa A foi a que apresentou o menor valor (0,35 MPa) e que as argamassas com metacaulim B e C, apresentaram acréscimo de resistência na ordem de 34%, em relação a primeira.

A reduzida resistência da argamassa A aos 28 dias já era esperada, porque no momento da desforma dos corpos de prova, que aconteceu com sete dias de atraso em relação aos corpos de prova das argamassas com metacaulim (B e C), foi observada a sua fragilidade e falta de endurecimento. Na ocasião, foi possível identificar a influência positiva da presença do metacaulim nas argamassas B e C cujos corpos de prova foram, facilmente, desformados com 7 dias de idade.

Para uma melhor observação do crescimento da resistência à compressão das argamassas, até a idade de 540 dias, plotou-se a figura 43.

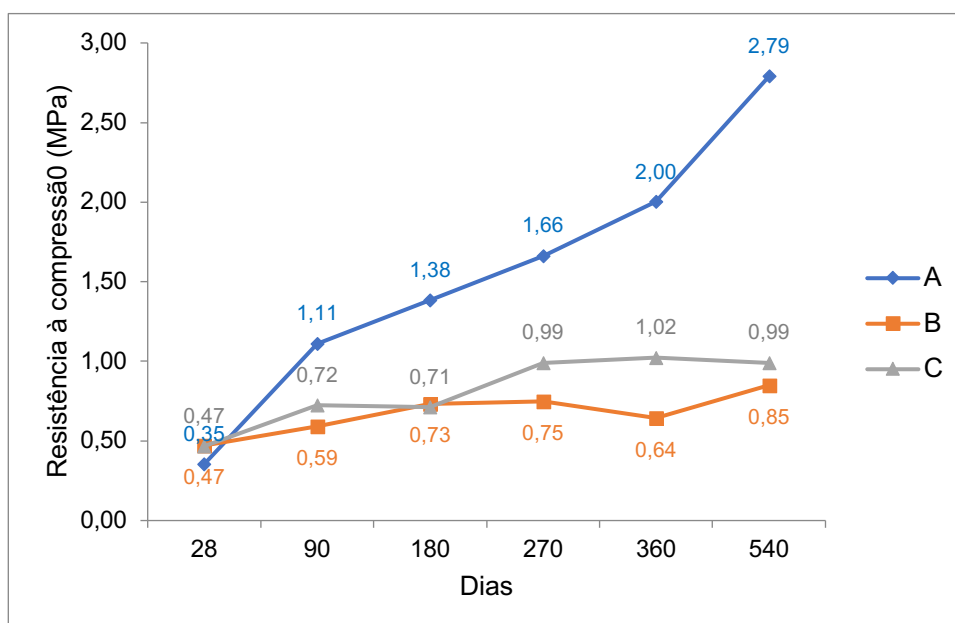


Figura 43- Evolução da resistência à compressão ao longo de 540 dias.

Na análise do crescimento da resistência (Figura 43), considerando todo o período de cura, verificou-se que na argamassa A, ainda que esta tenha iniciado com menor valor, ocorreu elevado ganho (cerca de 690%) e que nas argamassas B e C o ganho foi contínuo, mas em proporção bem menor, aumentando em 80% para a argamassa B e 110% para a argamassa C.

Ainda foi possível observar que os ganhos de resistência na argamassa A foram crescentes e contínuos e os das argamassas B e C ocorreram até 270 dias de cura, quando, na sequência, apresentaram oscilação de resistência (no caso da argamassa B) e estabilização de valor (no caso da argamassa C).

Na análise da resistência à tração na flexão das argamassas sem e com metacaulim foram obtidos os resultados apresentados na tabela 28.

Tabela 28- Resistência à tração na flexão das argamassas testadas

Idade	A		B		C	
	MPa	DV	MPa	DV	MPa	DV
28	0,30	0,04	0,12	0,02	0,16	0,02
90	0,50	0,01	0,17	0,01	0,21	0,04
180	0,50	0,02	0,16	0,02	0,20	0,02
270	0,51	0,03	0,17	0,01	0,21	0,01
365	0,56	0,03	0,17	0,02	0,23	0,03
540	0,72	0,20	0,18	0,01	0,23	0,02

- DV – Desvio padrão

Na tabela 28 é possível identificar que os valores de resistência à tração na flexão das argamassas analisadas até os 540 dias de cura foram, consideravelmente, maiores para a argamassa A que apresentou aumento progressivo (140%) e pouco significativo para as argamassas com metacaulins, sendo de 50% para a argamassa B e de 43,75% para a argamassa C.

Quanto à evolução no aumento de resistência à tração na flexão, a figura 44 mostra que houve acréscimo efetivo em todas as argamassas, sendo este mais acentuado para a argamassa A. Além disto, também, verificou-se que passados 90 dias de cura para a argamassa A ocorreu um continuado crescimento de resistência e para as argamassas B e C, estabilização no valor.

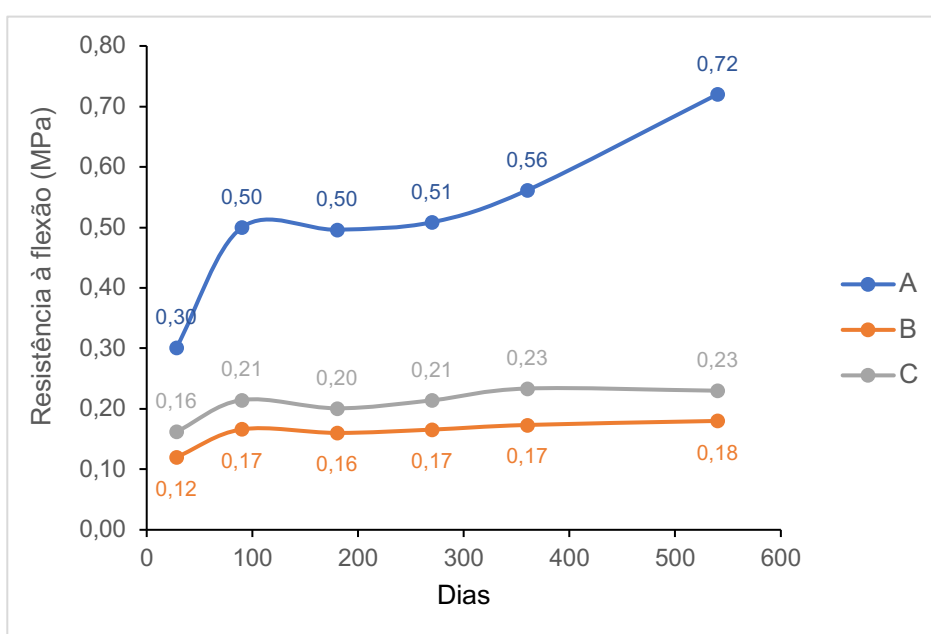


Figura 44- Evolução da resistência à tração na flexão ao longo de 540 dias.

Os valores de resistência mecânica obtidos nas argamassas testadas foram comparados aos valores recomendados por Veiga (2003, 2005) para argamassas de substituição de revestimentos de paredes antigas com idade de 90 dias de cura, sendo estes entre 0,4 MPa e 2,5 MPa para a resistência à compressão e de 0,2 MPa e 0,7 MPa para a resistência à tração na flexão. A análise mostrou que as argamassas testadas se enquadram na faixa recomendada pela autora, com exceção da argamassa B.

O fato da argamassa A apresentar valores mais elevados em idade mais avançada, pode ser atribuído a colmatagem dos poros devido a reação de carbonatação, com aumento de volume pela cristalização do carbonato de cálcio,

preenchendo os vazios, conforme descrito por Velosa (2006). Esta constatação mostra a grande influência do processo de carbonatação da cal (endurecimento) dessas argamassas, que embora seja lento, repercute ao longo do tempo em resistências elevadas (MARGALHA *et al.*, 2013).

Quanto aos menores valores de resistência mecânica das argamassas B e C, a justificativa, provável, conforme mencionado por Velosa; Rocha e Veiga (2009a) e por Aggelakopoulou; Bakolas e Moropoulou (2011), se encontra na presença de microfissuras internas, devido ao processo de retração, sendo menos percebido na argamassa A pelo maior teor de cal e carbonatação mais lenta.

Também, de acordo com Cardoso (2013) e Silva *et al.* (2014) a menor resistência mecânica pode ser atribuída a formação de alguns compostos hidratados de cálcio e alumínio instáveis, resultados da reação entre a cal e o metacaulim. Somase as justificativas acima apresentadas o fato do emprego da cal hidratada dolomítica no desenvolvimento do trabalho, que pode ter contribuído para as baixas resistências mecânicas até a idade analisada (ARIZZI; CULTRONE, 2012b).

Em estudo realizado por Lanas *et al.* (2006) sobre as propriedades mecânicas de argamassas à base de cal dolomítica, é mencionado que a resistência mecânica aumenta com o tempo de cura, entretanto, ainda são desconhecidos alguns fatores para este fato como: a idade em que as argamassas à base de cal dolomítica atingem sua resistência máxima, quais as reações e transformações da brucita e quais compostos de magnésio são formados, qual o grau de carbonatação da portlandita e a possível transformação da brucita em função do tempo de cura.

Estes resultados estão alinhados com o que foi observado por Felgueiras (2011) e Cardoso (2013), que utilizaram traços semelhantes com substituição de 9% da massa da cal hidratada por metacaulim, constando que embora a cura tenha sido úmida (UR>90%) não ocorreu aumento na resistência das argamassas, admitindo que este fato seja devido ao baixo teor desta pozolana, apresentando efeito benéfico apenas no período inicial de cura, como verificado no presente estudo.

Na análise comparativa da resistência à tração na flexão das argamassas com metacaulim, entre corpos de prova com 180 dias de idade e com 365 dias de idade, verificou-se que nas argamassas com menor idade de cura ocorreu aumento de 33% para a argamassa B e 25% para a argamassa C e que para argamassas com maior tempo de cura, o percentual de crescimento foi na ordem de 50% e 44%, para a argamassa B e C, respectivamente.

Quanto a resistência à compressão o ganho foi de 55% para a argamassa B e 51% para a argamassa C, aos 180 dias de cura. Na análise aos 365 dias, o ganho foi de 36% e 111%, para as argamassas B e C, respectivamente.

Os resultados obtidos podem estar associados à reação de carbonatação, conforme relatado de Felgueiras (2011), onde menciona que a umidade relativa entre 50 e 70% conduz a maiores velocidades de carbonatação, justamente na faixa que a cura ocorreu.

Veiga (2013) analisou argamassas de cal aérea e metacaulim em diferentes proporções, em laboratório, 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 as do presente trabalho, para o traço mais fraco em seu estudo.

Também, foi feita uma análise comparativa das resistências mecânicas obtidas nas argamassas testadas com resultados de resistência mecânica de argamassas de cal encontradas no referencial bibliográfico (Tabela 29). A análise mostrou que os resultados obtidos para as resistências mecânicas das argamassas testadas neste estudo estão em sintonia com os estudos apresentados no referencial bibliográfico.

Tabela 29- Análise comparativa entre a resistência mecânica das argamassas testadas e as identificadas em trabalhos analisados no referencial teórico.

Estudo		Traço em volume	Resistência à tração na flexão (MPa)			Resistência à compressão (MPa)		
			28d	90d	180d	28d	90d	180d
Tese	Argamassa A	1:4	0,30	0,50	0,50	0,35	1,11	1,38
	Argamassa B	1:4 (10% MK)	0,12	0,17	0,16	0,47	0,59	0,73
	Argamassa C	1:4 (10% MK)	0,16	0,21	0,20	0,47	0,72	0,71
Velosa, 2006		1:3	0,27	0,26	0,58	0,50	0,84	2,46
		1:3 (10% MK)	0,19	0,22	0,18	0,48	0,43	0,38
Aggelakopoulou; Bakolas e Moropoulou 2011		1:3 (9% MK)	1,20	1,30	0,80	3,20	4,20	4,20
Felgueiras, 2011		1:3	0,20	0,38	-	0,49	0,92	-
		1:3 (10% MK)	0,09	0,09	-	0,18	0,30	-
Faria e Martins, 2013		1:3	-	0,20*	-	-	0,50*	0,90**
		1:3 (20% MK)	-	0,30*	-	-	0,40*	1,00**
Cardoso <i>et al.</i> , 2013		1:3	0,20	0,37	-	0,45	0,90	-
		1:3 (9% MK)	0,08	0,08	-	0,18	0,58	-

* 60 dias **120dias

4.2.3 Profundidade de carbonatação

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 45 mostra a profundidade de carbonatação identificada pela área acinzentada. No processo, a área ainda não carbonatada apresenta-se na cor rosa, que é a cor do indicador utilizado, a fenolftaleína. As medidas de profundidade de carbonatação foram feitas com um paquímetro.

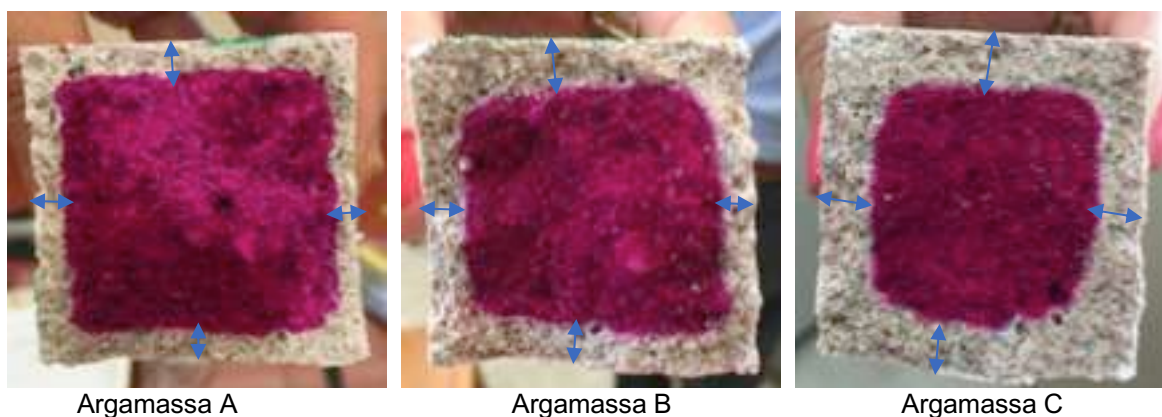


Figura 45- Profundidade de carbonatação das argamassas testadas.

Na 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 CO_2 e de certo grau de umidade para permitir a dissolução do 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 CO_2 , justificando o atraso no

processo de carbonatação que se dá de forma lenta ao longo de vários meses ou anos, conforme já constado por Cardoso (2013) e Veiga (2017).

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

4.2.4 Ductilidade

Outro aspecto analisado a partir das resistências mecânicas foi a ductilidade, que representa a capacidade das argamassas de se deformarem mediante às solicitações mecânicas, definida pelo quociente entre a resistência à tração na flexão e à compressão (R_t/R_c). Quanto maior for este coeficiente, mais dúctil será a argamassa.

Foi observado que a argamassa A é mais dúctil que as demais aos 28 dias de cura e que sua ductilidade se equipara às das argamassas B e C ao final de um ano. Resultado semelhante também foi obtido por Rodrigues (2004), Veiga (2013), Felgueiras (2011) e Cardoso (2013).

A tabela 30 apresenta os resultados, na qual se verifica que as argamassas com metacaulim, embora menos dúcteis, foram as que apresentaram um comportamento mais estável, em termos da relação R_t/R_c , ao longo do período em análise.

Tabela 30- Evolução da ductilidade das argamassas testadas.

Idade	A	B	C
28	0,85	0,25	0,35
90	0,45	0,28	0,30
180	0,36	0,22	0,28
270	0,31	0,22	0,22
365	0,28	0,27	0,23
540	0,26	0,21	0,23

4.2.5 Coeficiente de capilaridade e de absorção de água por capilaridade

O coeficiente de capilaridade ($\text{g/dm}^2.\text{mim}^{1/2}$) foi determinado na primeira fase de absorção capilar, representado pelo declive da reta tangente ao primeiro trecho do

gráfico de absorção de água ao longo do ensaio. No entanto, devido ao critério de comparação dos dados obtidos com o referencial bibliográfico, foi adotada a unidade $\text{kg/m}^2.\text{mim}^{1/2}$, conforme tabela 31.

Tabela 31- Coeficiente de capilaridade das argamassas testadas.

Idade	A		B		C	
	Média ($\text{Kg/m}^2.\text{mim}^{1/2}$)	DV	Média ($\text{Kg/m}^2.\text{mim}^{1/2}$)	DV	Média ($\text{Kg/m}^2.\text{mim}^{1/2}$)	DV
90	1,68	0,14	2,95	0,14	2,19	0,40
180	1,35	0,16	3,09	0,17	2,75	0,26
270	1,25	0,12	2,97	0,35	2,89	0,08
365	1,11	0,11	2,94	0,21	2,51	0,16

- DV – Desvio padrão

Como mostrado (Tabela 31), a presença do metacaulim nas argamassas, B e C, implicou em aumento dos valores do coeficiente de capilaridade em relação a argamassa A, em todas as idades analisadas.

Sob o ponto de vista de durabilidade das argamassas, a absorção de água por capilaridade é um dos indicadores importantes sobre o mecanismo de degradação, podendo se manifestar sob a ação da água da chuva ou do solo. Normalmente, as argamassas com pior comportamento frente a ação da água são as que apresentam maiores valores do coeficiente de capilaridade (CC), maior velocidade de absorção e maior quantidade total absorvida, ao se comparar as argamassas testadas pode se concluir que as com metacaulim serão as que apresentaram menor resistência à água.

Com relação a absorção de água (g/cm^2) constante na tabela 32 e na figura 46, que traduz a quantidade de água absorvida, é possível observar o comportamento decrescente ao longo dos 365 dias de cura, para as argamassas analisadas.

Tabela 32- Absorção capilar das argamassas testadas.

Dias	A		B		C	
	Média (g/cm^2)	DV	Média (g/cm^2)	DV	Média (g/cm^2)	DV
90	1,89	0,18	3,60	0,13	3,46	0,01
180	1,65	0,17	3,76	0,17	3,39	0,10
270	1,44	0,07	3,60	0,15	3,40	0,01
365	1,39	0,08	3,50	0,13	3,16	0,18

- DV – Desvio padrão

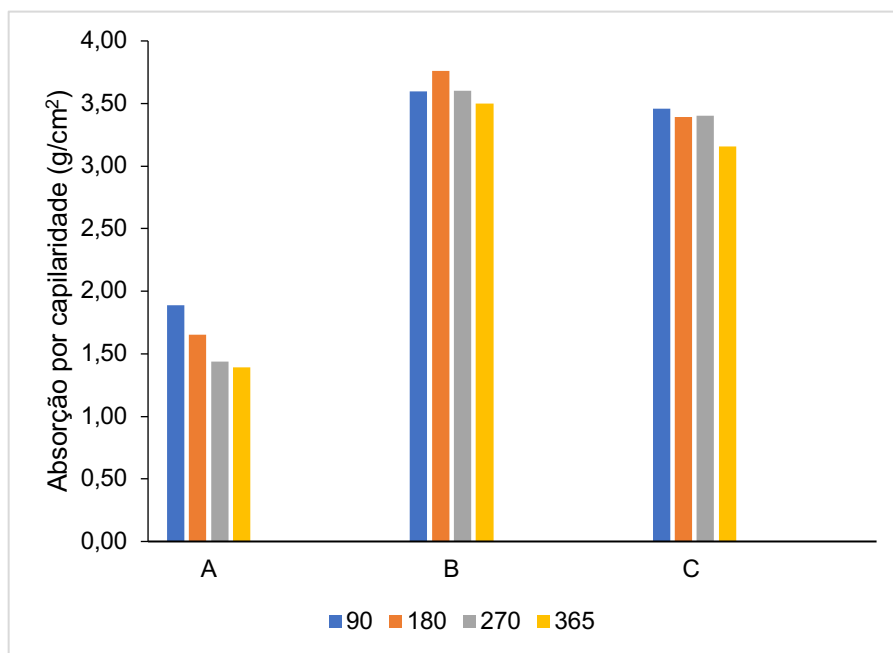


Figura 46 – Absorção de água por capilaridade das argamassas testadas.

O valor referente a absorção capilar corresponde ao período de 90 minutos, tempo de duração do ensaio e, no final deste período, as argamassas com metacaulim apresentaram-se praticamente saturadas. A argamassa sem metacaulim pelo contrário, ainda havia poros livres para a absorção, sendo este fato explicado pela dimensão e volume dos poros, determinando uma absorção de forma mais lenta.

Este comportamento que está vinculado a microestrutura, reforça a consideração sobre o grau de carbonatação das argamassas ao longo dos 365 dias, com alteração na rede porosa, sendo indicativo da existência de poros de menores dimensão para as argamassas com a presença de metacaulim. Resultado mais evidenciado para a argamassa C, que apresenta menor tamanho de partícula.

Salienta-se que ocorreu um decréscimo na absorção de água por capilaridade na ordem de 26,45% para a argamassa A, de 2,77% para a B e, de 8,67% para a C. Ou seja, as argamassas com metacaulim apresentaram-se menos suscetíveis a interferência com o passar do tempo (após 28 dias de cura), como observado também em relação a resistência à compressão, a resistência à tração na flexão, a carbonatação e ductilidade.

As curvas de absorção capilar, figura 47 representam, graficamente, a evolução deste processo em cada uma das idades analisadas.

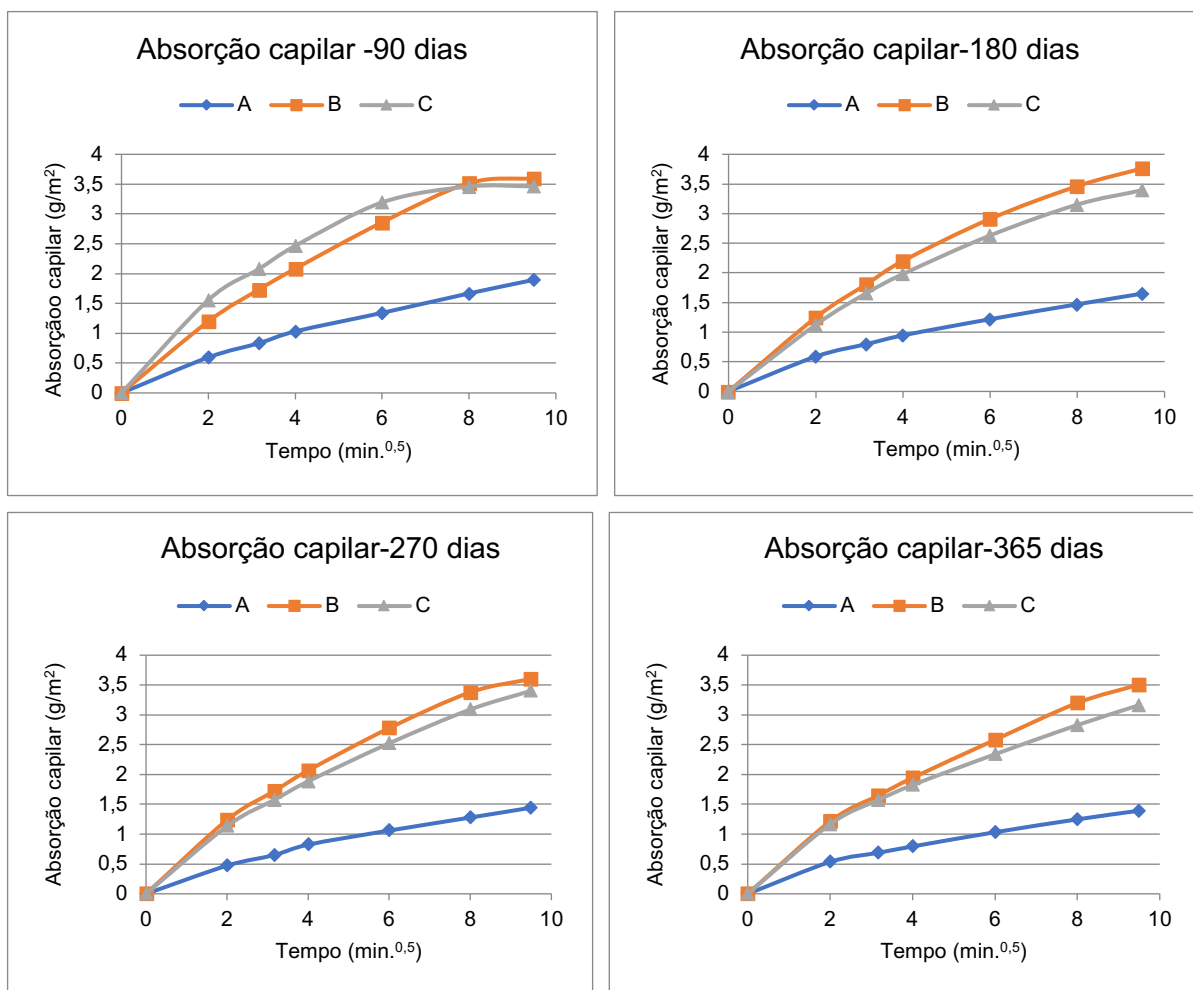


Figura 47- Curvas de absorção de água por capilaridade.

Das configurações das curvas apresentadas (Figura 47), pode-se confirmar que a argamassa sem metacaulim (A) foi a que apresentou absorção de água de forma mais lenta e em menor quantidade no tempo, com declive menos acentuado, resultando em menor coeficiente de capilaridade. As argamassas B e C apresentaram comportamento semelhante entre si, porém a C com menor absorção aos 365 dias.

Outra observação relevante, já mencionada por Brito (2009), diz respeito a forma da curva de absorção, que possui dois segmentos de reta bem definidos, para materiais com poros de dimensão homogênea e interligados. No primeiro momento ocorre a absorção rápida da água que depende da estrutura porosa (quantidade, dimensão e conectividade dos poros) com o preenchimento, inicialmente, dos poros de maior volume e dimensão e no segundo momento a absorção de água ocorre de forma mais lenta e correspondente ao preenchimento adicional dos restantes poros através de difusão, na água, do ar retido no sistema poroso.

A figura 48 apresenta as curvas de absorção de todas as argamassas, nas idades de 90 e de 365 dias de cura.

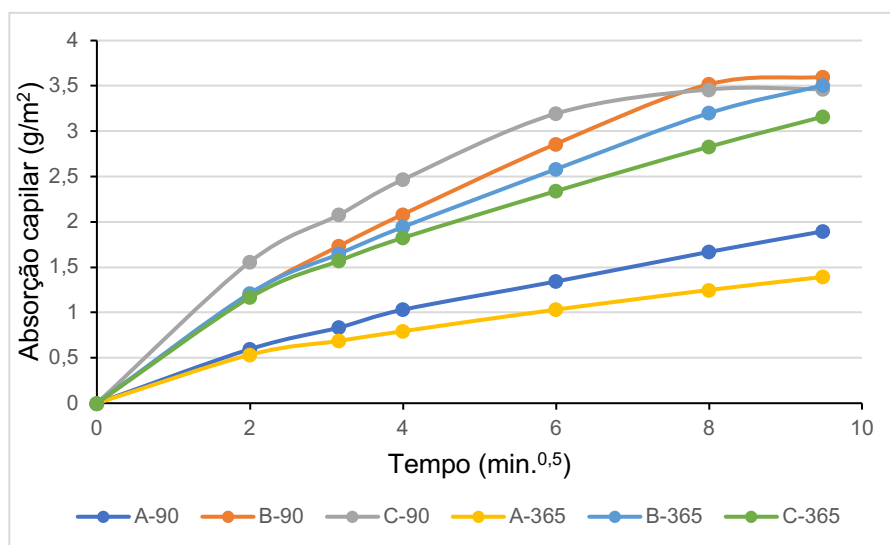


Figura 48- Comparação das curvas de absorção de água por capilaridade nos 90 e 365 dias.

A configuração das curvas de absorção obtidas para as argamassas com metacaulim (Figura 48), como já mencionado, podem ser atribuídas a rede de poros formada pela presença das pozolanas que, possivelmente, reduziram o diâmetro do tubo capilar justificando a altura de ascensão do líquido no tubo capilar, que será tanto maior quanto menor for o raio interno do tubo, ou seja, quanto menor for o diâmetro dos poros maior e mais rápida será a altura atingida (MATTOS; GONÇALVES, 2017).

Nos minutos iniciais, a argamassa A apresentou a mesma inclinação nas duas idades analisadas, 90 e 365 dias, para as demais argamassas (B e C) apenas a argamassa C, aos 90 dias apresentou maior inclinação na primeira fase, com indicativo que a água foi absorvida mais rapidamente.

Os resultados obtidos nas argamassas testadas estão de acordo com as observações de Breitenbach (2013), também, identificando em seu trabalho que o aumento de finos nas argamassas de cal determina aumento no coeficiente de capilaridade e na absorção de água em comparação com a argamassa de referência (cal:areia).

Nas argamassas B e C é provável que a atuação do metacaulim esteja relacionada mais com o efeito físico (fíler) do que com o químico, repercutindo no refinamento dos poros, como observado por Veiga (2013), visto que a efetiva reação

pozolânica entre o metacaulim e a cal, exige a presença de água durante um longo período de tempo.

Devido as condições de cura adotadas, próximas do ambiente real de serviço e passíveis de serem reproduzidas em obra, é razoável admitir que as condições de cura favoreceram a reação de carbonatação em detrimento da pozolânica, visto que ambas concorrem no consumo do hidróxido de cálcio.

O comportamento observado para os coeficientes de capilaridade das argamassas testadas, maior para as argamassas com metacaulim em relação a de referência, estão em sintonia com o observado por Velosa (2006), Felgueiras (2011), Mergulhão (2014) e Magalhães; Muñoz e Andrade (2017).

4.2.6 Índice de Vazios e Absorção de água

A análise desta propriedade é muito significativa, pois envolve o mecanismo de circulação de água no interior da argamassa e influencia na velocidade de secagem de acordo com o volume, geometria e dimensão dos poros.

Para este ensaio foi obtido o resultado para o índice de vazios, expressos pela média e o respectivo desvio padrão, tabela 33.

Tabela 33- Índice de vazios das argamassas testadas.

Idade	A		B		C	
	(%)	DV	(%)	DV	(%)	DV
90	29	0,101	29	0,283	30	0,144
180	24	0,248	27	0,249	27	0,293
270	27	0,483	30	0,085	29	0,170
365	25	0,212	27	0,338	27	0,580

- DV – Desvio padrão

É possível verificar que aos 90 dias de cura (Tabela 33) todas as argamassas possuíam, aproximadamente, o mesmo índice de vazios. Ao decorrer do processo de cura a argamassa A apresentou uma redução na ordem de 14% e as demais uma redução de 7% para a argamassa B e de 10% para a argamassa C. Esta situação,

provavelmente, esteja relacionada com a predominância da evolução da reação de carbonatação.

De forma análoga, a absorção de água possui comportamento similar, com redução de valor com o passar do tempo de cura, como observado na absorção de água por capilaridade. No entanto, quando se analisa apenas as argamassas com metacaulim é possível verificar que para o mesmo índice de vazios, a argamassa C apresenta menor absorção de água que a B (Tabela 34).

Tabela 34- Absorção de água das argamassas testadas.

Idade	A		B		C	
	g/cm ²	DP	g/cm ²	DP	g/cm ²	DP
90	0,99	0,084	0,99	0,176	1,03	0,115
180	0,82	0,160	0,92	0,150	0,90	0,197
270	0,91	0,284	1,02	0,084	0,99	0,143
365	0,83	0,115	0,94	0,243	0,92	0,394

- DV – Desvio padrão

Com relação a massa específica real, tabela 35, não se verifica alteração relevante entre as argamassas com metacaulim, bem como, em relação a argamassa de referência.

Tabela 35- Massa específica real das argamassas testadas.

Idade	A (kg/m ³)	B (kg/m ³)	C (kg/m ³)
90	2.580	2.590	2.590
180	2.430	2.510	2.500
270	2.520	2.570	2.560
365	2.440	2.510	2.500

A análise conjunta destas propriedades (Figura 49) aos 365 dias de cura, são indicativas que a inserção de maior quantitativo de finos resultou em aumento do índice de vazios, no entanto, a absorção de água não acompanha a mesma taxa de crescimento, representada pelo coeficiente angular da equação de regressão.

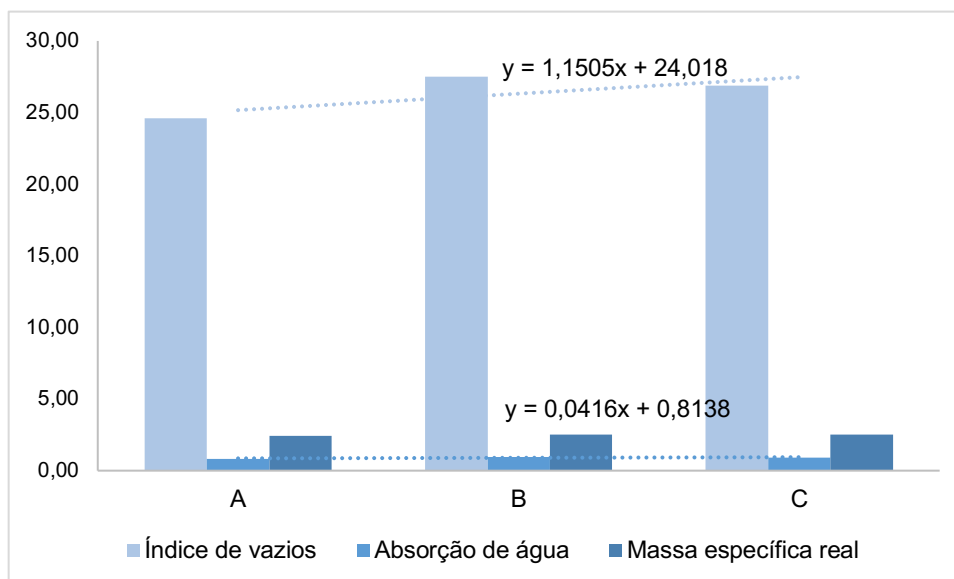


Figura 49- Resultados do índice de vazios, absorção de água e massa específica real aos 365 dias.

Tem-se assim que, o resultado do índice de vazios deve ser analisado em conjunto com outras características, porque é possível para um material poroso com poucos poros de grandes dimensões e o outro com diversos poros de pequenas dimensões ambos apresentarem o mesmo índice de vazios, no entanto, comportamentos distintos no tocante a absorção.

A justifica para esta situação está na dimensão dos poros, classificados em três grupos: os microporos, que não participam no transporte da água devido ao seu tamanho reduzido, que gera elevadas forças capilares que impedem a circulação da água; os mesoporos, em que a água no estado líquido circula na rede formada pelos poros capilares e; os macroporos, que são responsáveis pelo transporte da água no estado de vapor e, nestes poros, a circulação de água líquida não é significativa pois as forças capilares que se geram são muito fracas.

4.2.6.1 Secagem

A curva de secagem apresentada na figura 50, representa a variação do teor de água em relação a massa seca com o tempo.

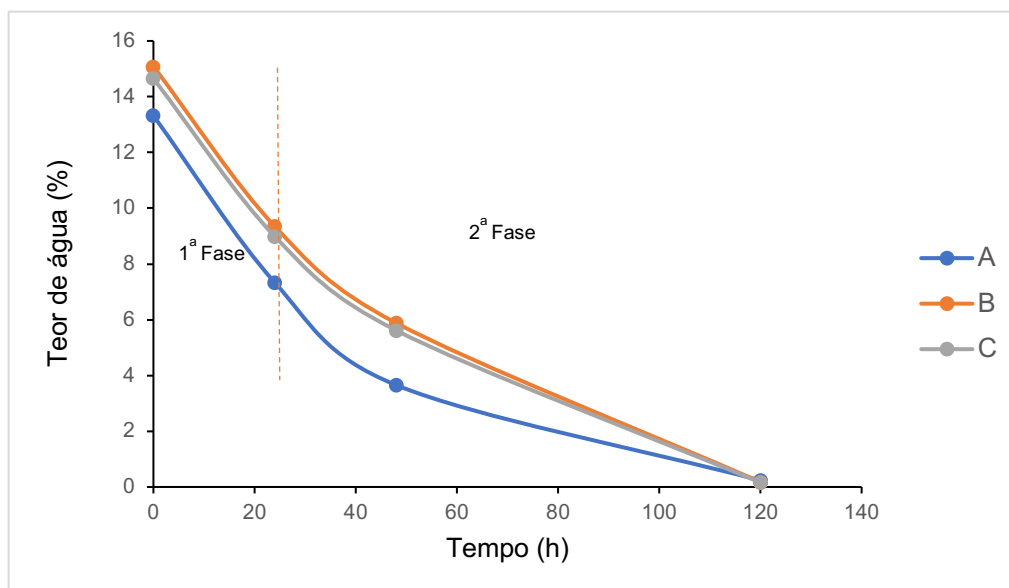


Figura 50- Curvas de secagem das argamassas estudadas com 365 dias de cura.

Na análise das curvas de secagem (Figura 50), verifica-se que as argamassas possuem comportamento muito semelhantes, porém a argamassa sem metacaulim apresenta maior taxa de secagem, indicada pela maior declividade da reta, secando mais rapidamente, em sintonia com o observado no índice de vazios e absorção de água no que se refere a rede de poros.

O índice de secagem foi obtido através da integral da curva de secagem de cada argamassa, considerando o teor de água inicial e o tempo final do ensaio, obtendo-se o valor igual a 0,24 para a argamassa A e, 0,29 para as argamassas B e C. Registra-se que a secagem é tanto mais rápida e fácil quanto menor for o índice de secagem.

4.2.7 Permeabilidade ao vapor de água

O comportamento frente ao vapor de água, representado pelo ganho de massa das amostras ao longo do tempo de ensaio (10 dias), está apresentado na figura 51.

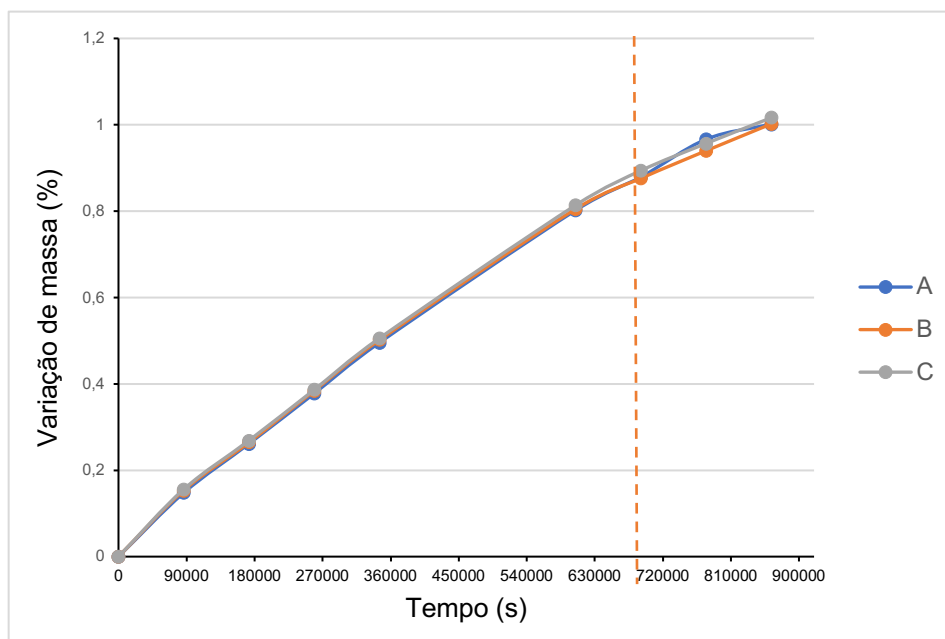


Figura 51- Representação do ganho de massa no ensaio de permeabilidade ao vapor.

Analisando-se as curvas da figura 51, nota-se que existe um comportamento de ganho de massa contínuo e uniforme para as argamassas estudadas, onde a primeira fase demonstra um acréscimo de massa similar a todas, até o sétimo dia de ensaio. A partir do oitavo dia, o ganho de massa pelo sistema é relativamente menor quando comparado aos primeiros dias, porém contínuo. Ressalta-se que apenas a argamassa C no final do ensaio apresentou um valor um pouco maior que as demais.

Devido as limitações na realização do ensaio e as condições de contorno adotadas, os valores referentes a permeância e permeabilidade são comparáveis entre si, não sendo válidos para comparação com outros estudos. Os valores obtidos no ensaio de permeabilidade ao vapor de água estão apresentados na tabela 37.

Tabela 36- Resultado do ensaio de permeabilidade ao vapor de água das argamassas testadas.

Argamassas	Fluxo de vapor (Kg/s)	Permeância (Kg/m ² .s.Pa)	Permeabilidade (Kg/m.s.Pa)
A	9,02111E-09	7,51635E-10	1,50327E-11
B	8,89105E-09	7,35443E-10	1,47089E-11
C	9,0239E-09	7,51985E-10	1,50397E-11

Em sintonia com a figura 51, as argamassas estudadas indicam uma permeabilidade ao vapor de água, praticamente, igual entre si. Vale ressaltar que, embora as argamassas com metacaulim possuam maiores valores de absorção de

água e maior índice de secagem, os valores de permeabilidade podem ser comparados ao da argamassa de referência.

4.2.8 Exposição a névoa salina

A figura 52 apresenta o percentual de íons cloretos retidos nas argamassas A, B e C, obtido em corpos de prova expostos a névoa salina em uma câmara de salinização.

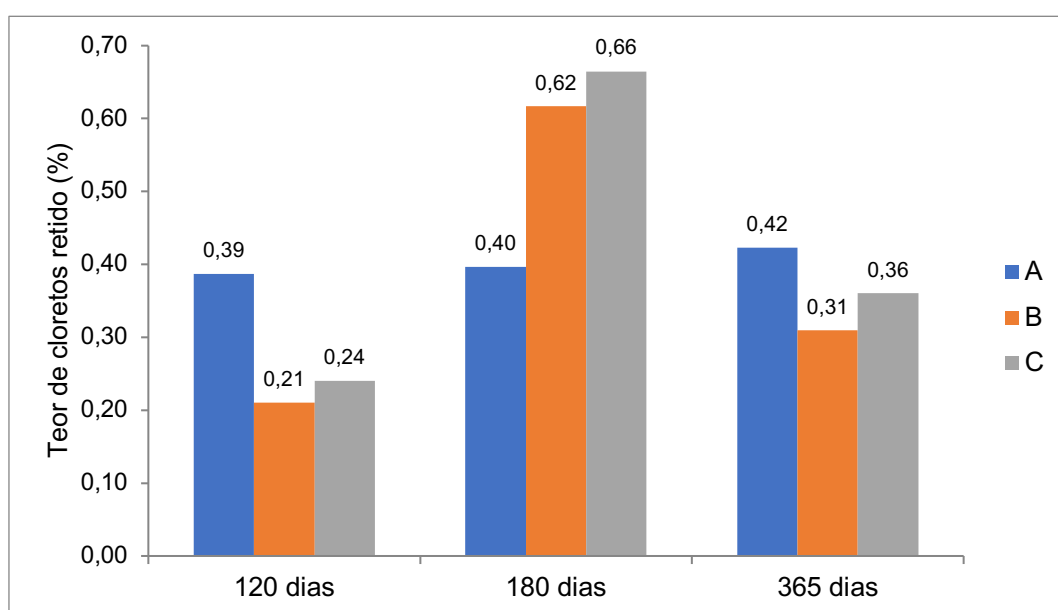


Figura 52- Teor de cloretos retidos nas argamassas estudadas, testadas aos 120,180 e 365 dias de cura.

A análise da figura 52 mostra que as argamassas com metacaulim B e C, aos 120 dias de cura apresentaram os menores percentuais de cloretos retidos, indicando que para estas argamassas, a presença do metacaulim resultou em refinamento dos poros, tornando-os menos interconectados e mais tortuosos, o que dificultou a penetração de cloretos.

Passados 180 dias de cura percebeu-se um acréscimo significativo nos teores de cloretos retidos na argamassa com metacaulim B e C, com posterior decréscimo dos teores nos corpos de prova com um ano de cura (365 dias). Esta condição de instabilidade pode estar associada as reações de carbonatação e de pozolanicidade.

A figura 53 apresenta o resultado da variação de massa dos corpos de prova exposto a névoa salina, aos 120 dias de cura, em que foi realizado o ensaio acelerado

de degradação, verificando a durabilidade das argamassas frente aos ciclos de saturação e secagem (processo de cristalização e dissolução), numa condição de similaridade à ação da água de chuva.

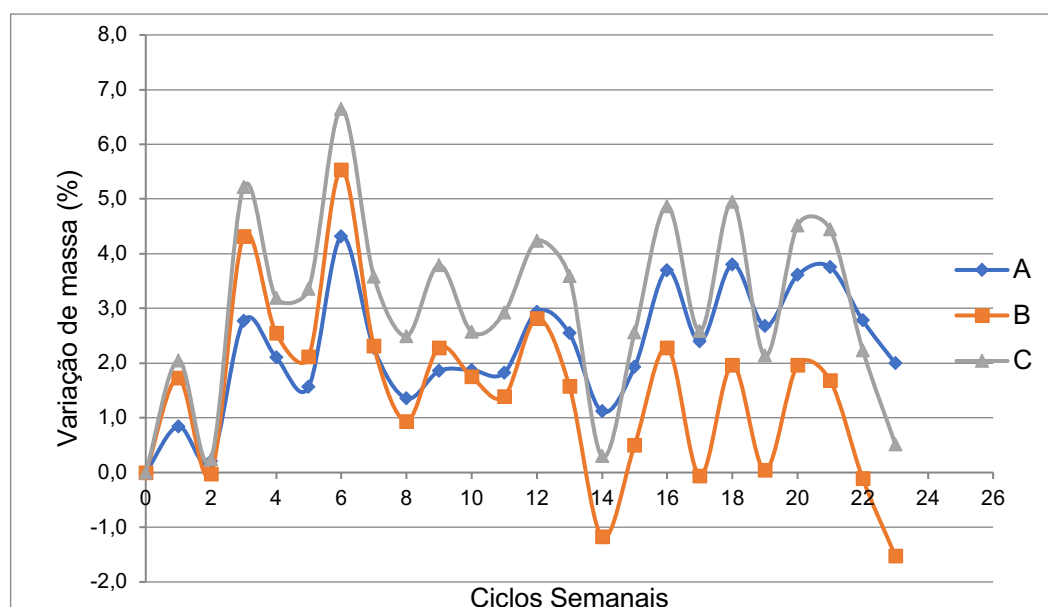


Figura 53- Ciclos de saturação e secagem das argamassas testadas após exposição a névoa salina.

O comportamento dos corpos de prova ao longo dos 23 ciclos de saturação/secagem (Figura 53), demonstra que no 6º ciclo todas as argamassas apresentaram um expressivo aumento de massa e, a partir deste momento foi identificada a desagregação por perda de material superficial das argamassas das famílias B e C, fato também observado por Rocha *et al.* (2006).

A argamassa B com metacaulim de maior tamanho partícula apresentou maior perda de massa a partir do 14º ciclo semanal. A explicação para tal fato está na microestrutura porosa formada na argamassa B, em que a ação exercida pelos cristais de halita, com aumento de volume e consequente aumento de tensão interna, não foi suportada, ocasionando a perda de massa.

Conforme citado por Veiga (2013), nas argamassas porosas o processo de cristalização ocorre inicialmente nos grandes poros e, depois nos poros de menor tamanho, quando o potencial de degradação é mais forte para estruturas com poros de diferentes dimensões, ou seja, pequenos poros alimentando uma variedade de grandes poros.

A argamassa da família A apresentou variação de massa mais elevada do que as demais, devido à maior cristalização da halita na rede de poros, a ser demonstrado através de DRX.

Aos 180 e 365 dias de cura, foram realizados novos ensaios na câmara de salinização e, como na etapa anterior, foi realizado o ensaio de resistência a compressão. A comparação entre as resistências mecânicas de corpos de prova com 365 dias de cura das argamassas que não sofreram ataque salino, as que foram expostas a salinidade e as que sofreram ciclos de saturação/secagem encontra-se apresentado na figura 54.

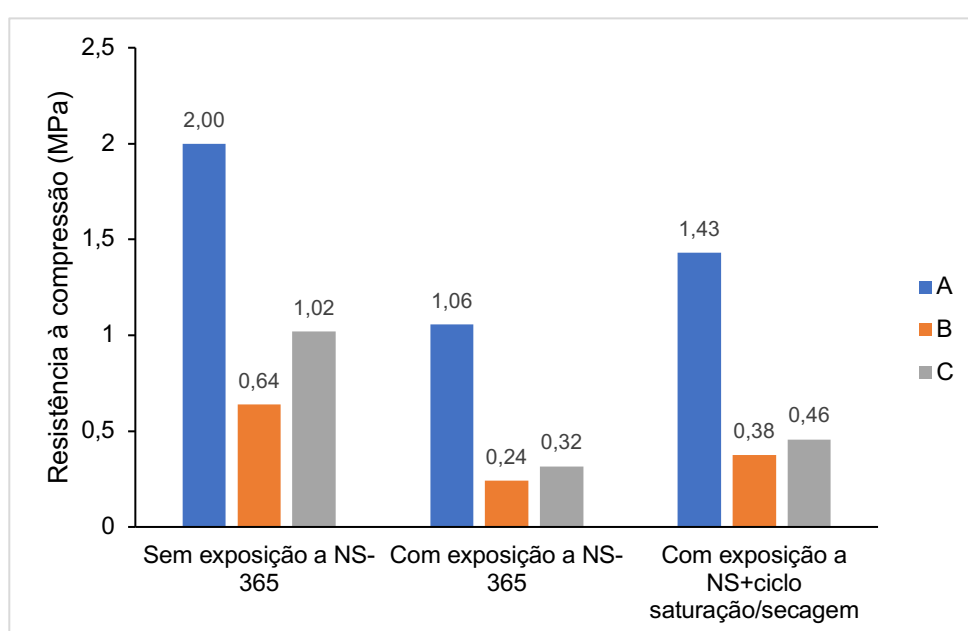


Figura 54- Resistência à compressão das argamassas expostas a diferentes condições de salinidade.

Analisando-se os resultados da figura 54, verifica-se que para todas as argamassas (A, B e C) o efeito da salinização foi danoso, visto que repercutiu numa significativa redução de resistência, sendo estas: 47,2% para a argamassa A; 62,5% para a argamassa B; e 68,9 % para a argamassa C.

No entanto, para o efeito provocado pelos ciclos de saturação/secagem, percebe-se ganho no desempenho mecânico de todas as argamassas, sendo estes de 35,3% para a argamassa A; 56,4% para a argamassa B; e 44,2% para a argamassa C.

Quando se analisa o resultado da resistência à compressão dos corpos de prova com 365 dias de cura em função do teor de cloretos retidos, apresentado na figura 55, tem-se que a argamassa B, que utilizou o metacaulim com maior tamanho

de partícula e menor teor de alumina, reteve menor percentual de cloretos e apresentou menor resistência mecânica, ou seja, o efeito de físico (fíler) do metacaulim teve maior influência do que o químico. Na argamassa C, é provável que o efeito químico tenha preponderado, visto que o metacaulim utilizado apresenta maior teor de alumina, refletindo em ganho de resistência.

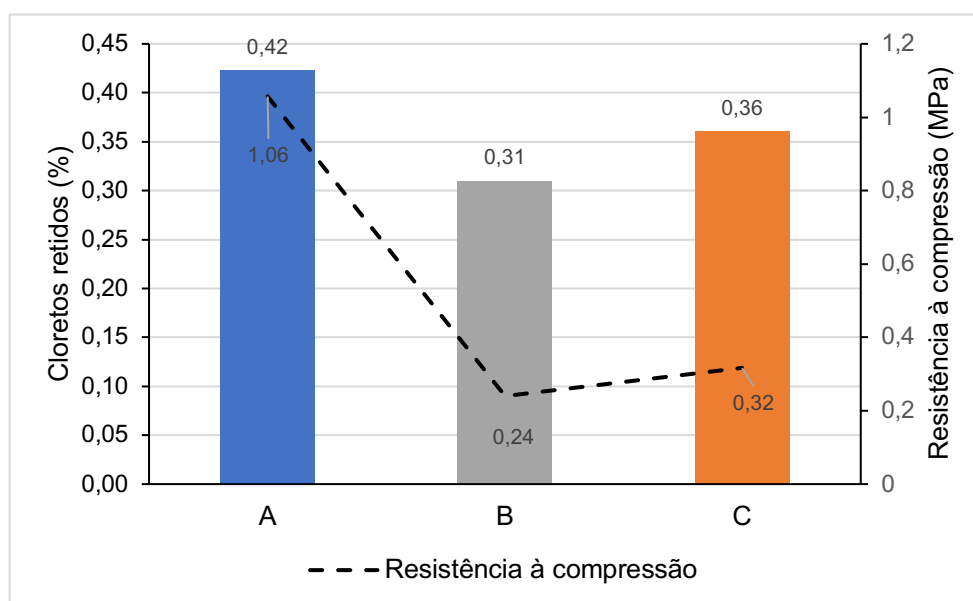


Figura 55- Resistência mecânica (Mpa) x cloretos retidos (%).

Portanto, a explicação para a menor de resistência das argamassas com metacaulim, não está somente vinculada a origem dolomítica da cal, como também, vinculada à condição de cura e a instabilidade dos compostos resultantes da reação pozolânica.

O processo de cura adotado nesse experimento, mais próximo das condições reais de serviço, implicou no favorecimento da reação de carbonatação, precedendo a pozolânica que ocorre de forma lenta e que necessita da presença de água, visto que ambas competem para reagir com o hidróxido de cálcio.

Para a reação pozolânica antecipar à reação de carbonatação, a umidade relativa deve ser superior a 90%, condição que não se alinha com o propósito deste experimento, no qual os corpos de prova estiveram acondicionados durante os 28 primeiros dias de cura em ambiente com umidade e temperatura de $80 \pm 5\%$ e $20 \pm 5^\circ\text{C}$, respectivamente.

No estudo de Rodrigues (2004) foi percebida a influência da cura úmida para a melhoria na resistência aos cloretos, no entanto, esta condição nem sempre está

associada à resistência mecânica, sendo possível atribuir este fato a diferença entre o volume e tamanho dos poros capilares das argamassas. Assim, a formação e dissolução dos cristais de halita poderá se manifestar na rede de poros sem consequência danosa na argamassa que detiver poros capilares em maior tamanho e volume.

Para confirmar a presença de íons cloretos analisou-se, através de difração de raios-X, as argamassas expostas a salinidade e as que sofreram ciclos de saturação/secagem. As figuras 56, 57 e 58 apresentam os resultados obtidos.

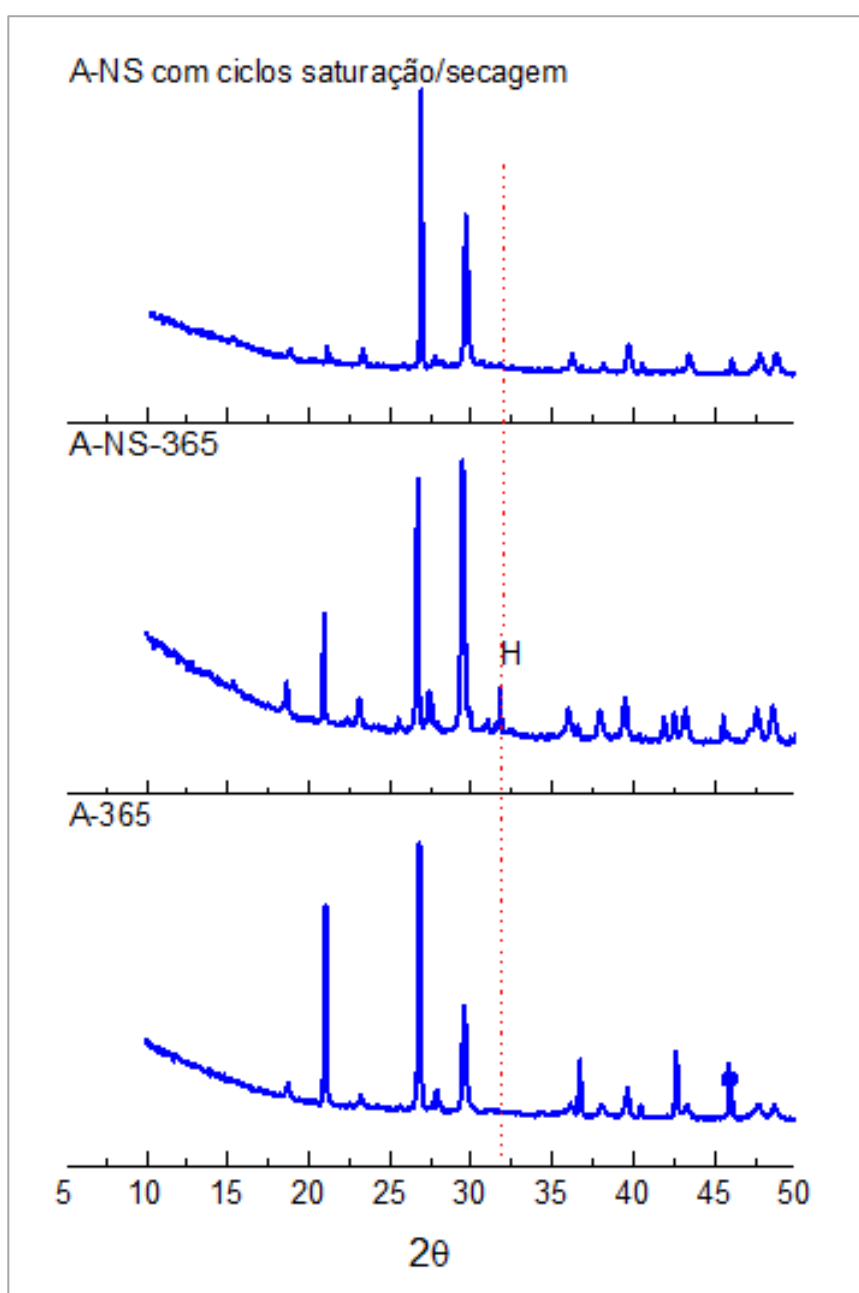


Figura 56- Difração de Raios-X da argamassa de referência (A): H- halita.

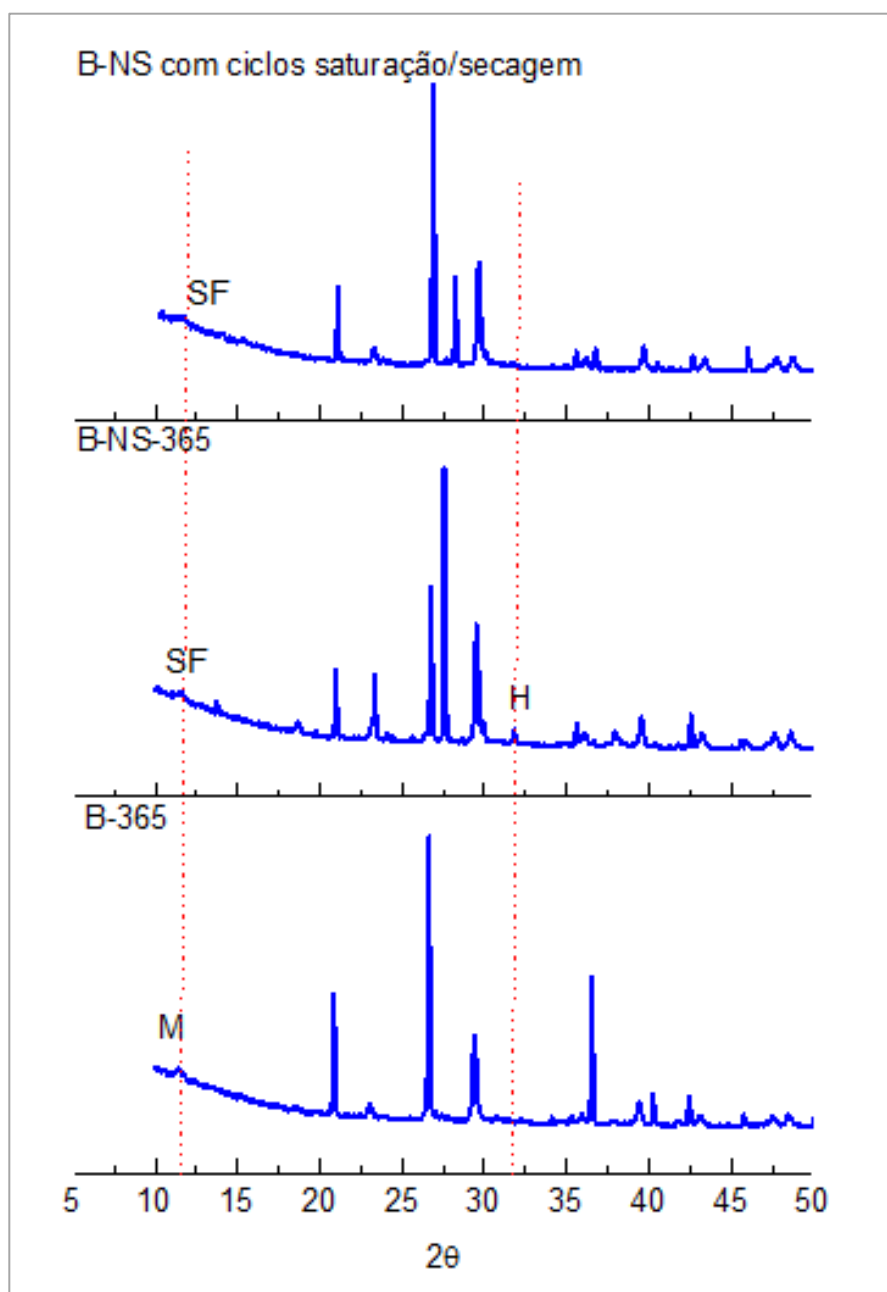


Figura 57- Difração de Raios-X da argamassa com metacaulim (B): H- halita, M-monocarboaluminato, SF- Sal de Friedel.

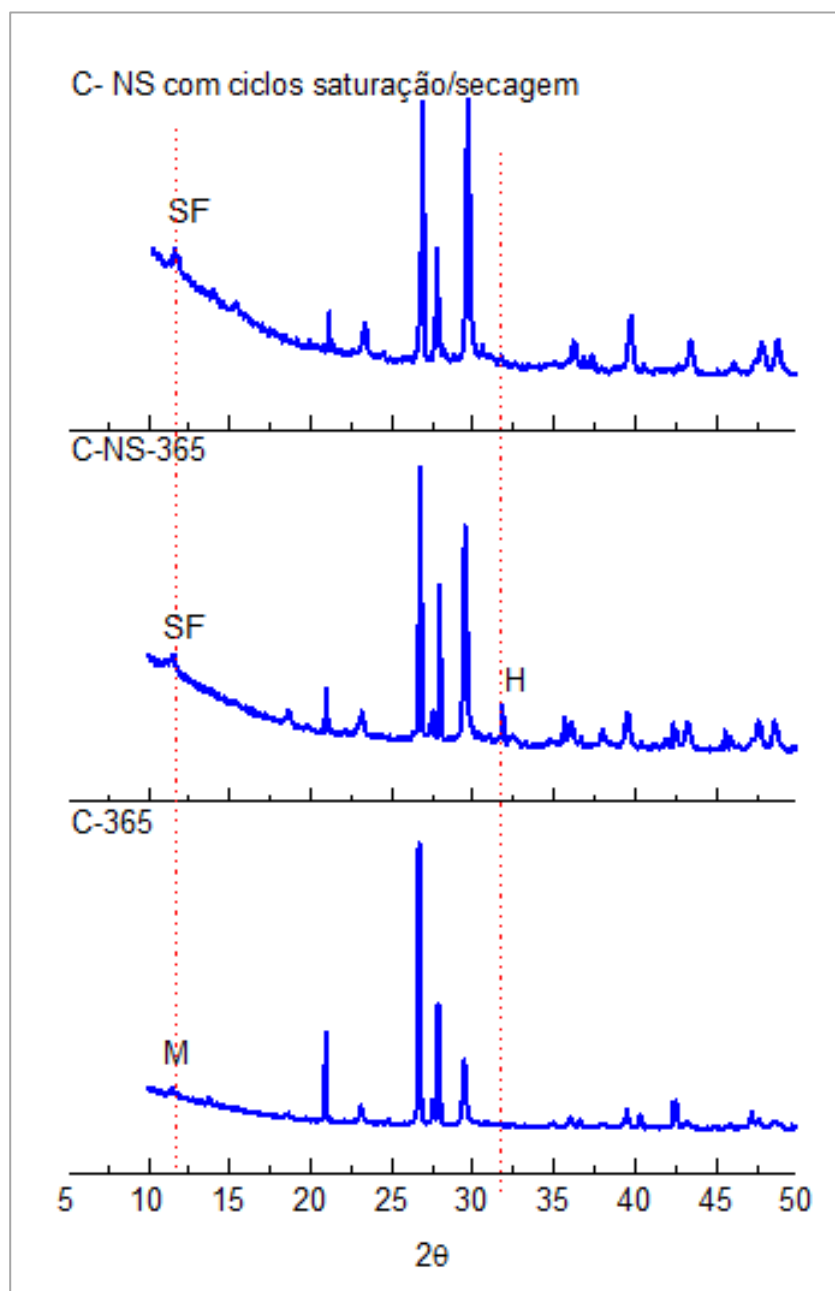


Figura 58- Difração de Raios-X da argamassa com metacaulim (C): H- halita, M-monocarboaluminato, SF- Sal de Friedel.

Analisando-se os difratogramas das figuras 56, 57 e 58, confirma-se a presença da halita, além das fases esperadas como a calcita, o quartzo e, outras fases minoritárias como cloroaluminatos.

É provável que após a exposição à névoa salina as argamassas elaboradas com metacaulim produziram sal de Friedel, resultado da transformação do monocarboaluminato, fato que está em sintonia com o relatado por Zibara *et al.* (2008).

A análise mineralógica após os ciclos de saturação/secagem confirma a hipótese de que os íons cloretos (halita) tenham sido removidos após a exposição a água, com uma similaridade ao efeito de chuva. Resultado semelhante foi observado por Grilo (2014), indicando que os cloretos possam ter sido removidos pela exposição à água.

4.2.9 Análise mineralógica

A partir da análise mineralógica identificou-se os compostos formados nas argamassas testadas. A figura 59 apresenta os difratogramas obtidos, com a análise comparativa entre corpos de prova com 28 dias de cura.

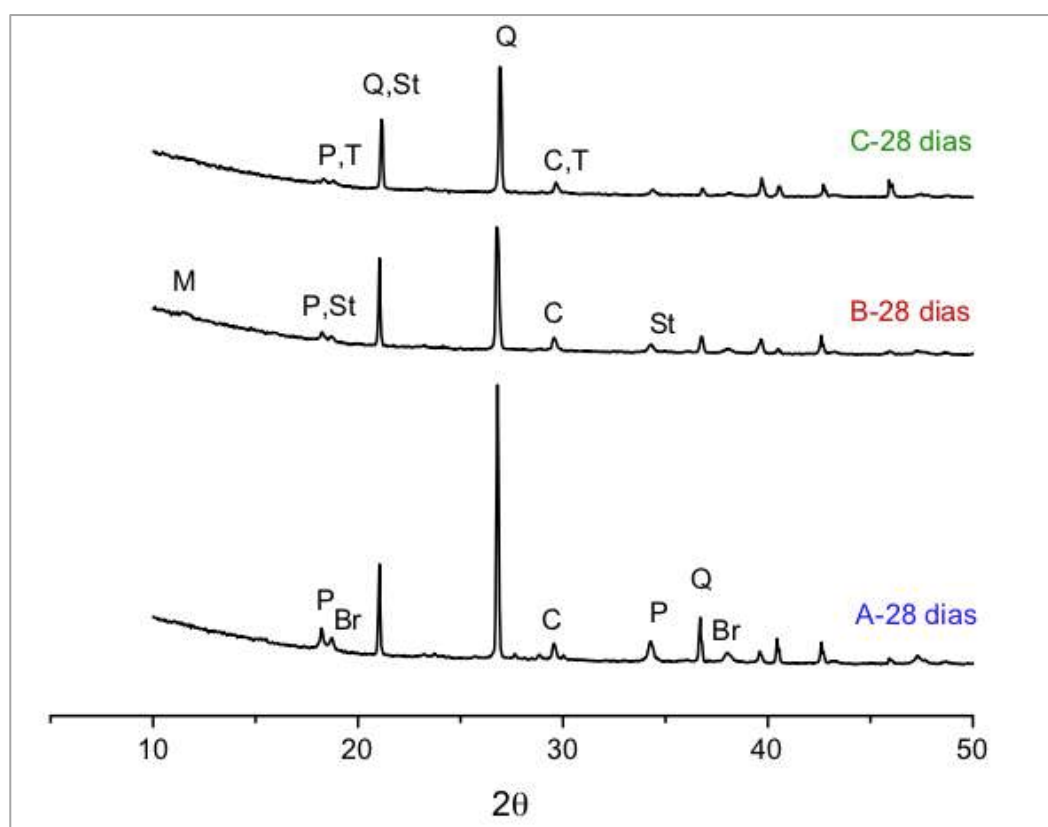


Figura 59- Difratogramas das argamassas testadas, obtidos em corpos de prova com 28 dias de cura.

A análise dos difratogramas permitiu, conforme a bibliografia consultada, identificar os seguintes compostos cristalinos:

- Quartzo – presente nos agregados e nos ligantes (cal e metacaulim);

- Calcita – composto cristalino presente em maior proporção nas argamassas de cal, tanto na forma de carbonato de cálcio como de magnésio, devido a cal aérea ser dolomítica;
- Portlandita – constituinte da cal aérea, produzido na reação de hidratação, hidróxido de cálcio, também identificada na forma de brucita, hidróxido de magnésio;
- Stratlingita – aluminosilicato de cálcio hidratado proveniente da reação entre o metacaulim e a cal;
- Tobermorita – silicato de cálcio hidratado, sendo um dos tipos de CSH, que resulta da reação pozolânica entre a cal e o metacaulim.;
- Monocarboaluminato – aluminato de cálcio hidratado, que resulta da reação pozolânica entre a cal e o metacaulim.

A presença do metacaulim na composição das argamassas, aos 28 dias de cura, consumiu maior teor da portlandita que na argamassa sem a pozolana, indicando que as reações de carbonatação e pozolânica ocorreram. A primeira pelo aumento do teor da calcita e a segunda pela presença de compostos típicos da reação pozolânica (stratlingita, tobermorita e monocarboaluminato), embora em pequena escala.

A fim de se estimar o percentual de calcita presente nestas argamassas (Figura 59) foi realizado o cálculo em função da intensidade do maior pico que corresponde ao quartzo, sendo obtido os seguintes percentuais: argamassa A - 8,3%, argamassa B - 15,6% e argamassa C - 13,2 %, como realizado por Nóbrega *et al.* (2010).

Na análise da figura 60 é possível identificar nas argamassas testada que houve aumento do teor da calcita e a consequente diminuição do teor de portlandita, devido a evolução do processo de carbonatação. Este fato, associado a fraca proporção de compostos hidratados comprova as observações, anteriormente, realizadas sobre a indicação de que reação de carbonatação foi dominante em relação a reação pozolânica.

Figura 60- Difratogramas das argamassas testadas, obtidos em corpos de prova ao longo de 540 dias de cura.

Na análise comparativa entre as argamassas percebe-se que os principais compostos cristalinos identificados foram o quartzo (SiO_2), calcita (CaCO_3) e o carbonato de magnésio (MgCO_3), em razão da cal dolomítica utilizada na composição.

As fases cristalinas minoritárias observadas nas argamassas com metacaulim correspondem a 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 Gameiro *et al.* (2012a, 2012b), Cardoso (2013), Grilo *et al.* (2014), Silva *et al.* (2014).

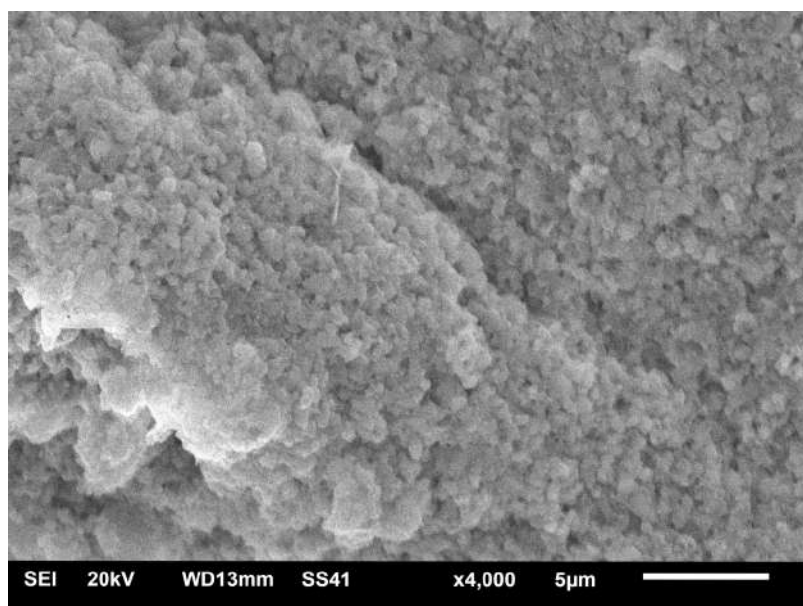
Em relação aos diferentes compostos de aluminato de cálcio formados, Gameiro *et al.* (2012a) e Cardoso (2013), mencionam que a presença é mais intensa quanto maior for o percentual utilizado nas composições e, geralmente, estão presentes até os 28 dias de cura. Para Silva *et al.* (2014), o fato destes aluminatos serem instáveis com o envelhecimento, é possível que se forme uma nova fase hidratada de aluminato de cálcio. Os autores afirmam que o monocarboaluminato modifica seu pico de intensidade com o envelhecimento e com diferentes teores de metacaulim, sendo menos notado para menores percentuais de metacaulim.

De acordo com os resultados das resistências mecânicas e da difração de raios X (DRX), pode-se deduzir que a incorporação do metacaulim na composição das argamassas promoveu a formação de aluminatos, compostos instáveis ao longo do tempo, justificando o decréscimo das resistências à tração e à flexão, fato relatado no trabalho de Cardoso (2013) e Silva *et al.* (2014). Em contrapartida, a argamassa da família A, sem metacaulim, foi verificada a evolução contínua da resistência devido apenas a reação de carbonatação.

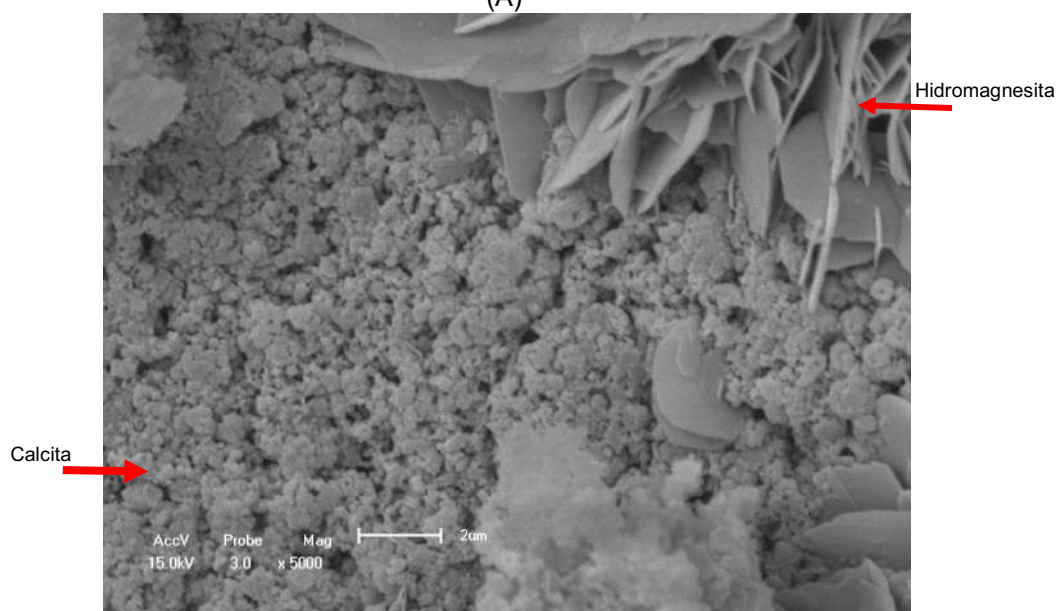
4.2.10 Análise da microestrutura

A formação dos compostos resultantes do processo de cura das argamassas testadas, também, foi verificada através de microestrutura e da análise de composição elementar (EDS).

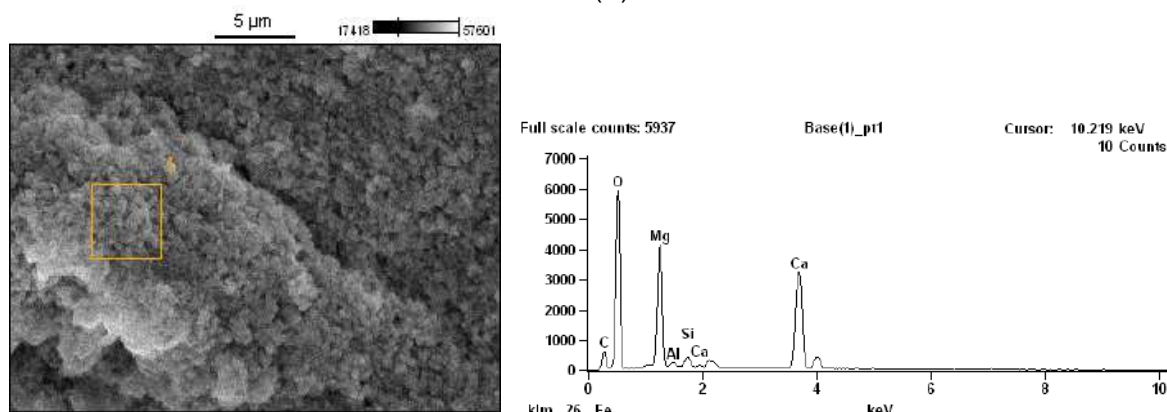
As figuras 61, 62 e 63 mostram as micrografias obtidas em amostras das argamassas A, B e C com 180 e 540 dias de cura.



(A)



(B)



(C)

Figura 61- Micrografias da argamassa A. Amostra com 180 dias na cura (A); amostra com 540 dias de cura (B) e elementos químicos identificados por EDS na amostra com 180 dias (C).

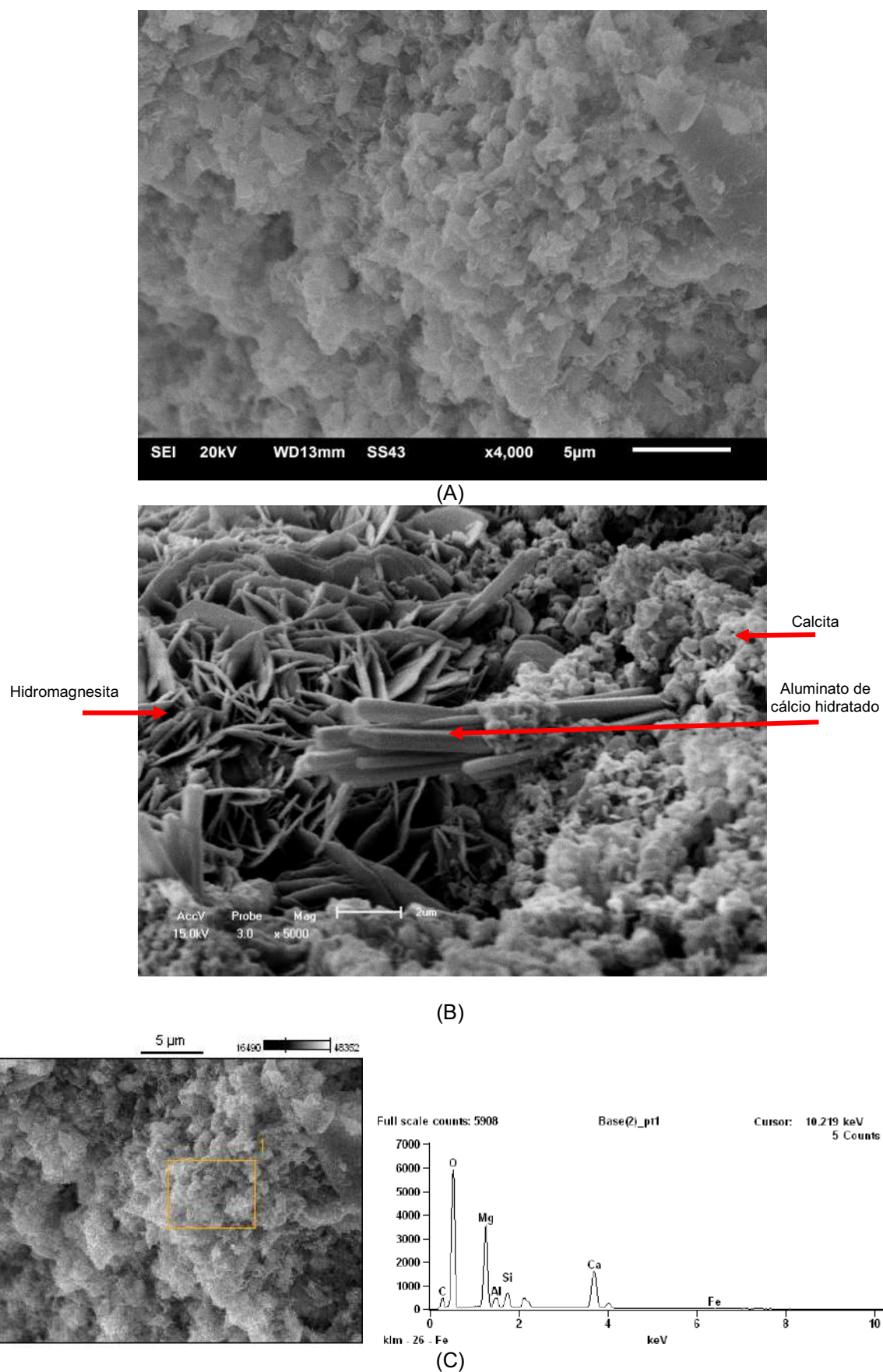


Figura 62- Micrografias da argamassa B. Amostra com 180 dias na cura (A); amostra com 540 dias de cura (B) e elementos químicos identificados por EDS na amostra com 180 dias (C).

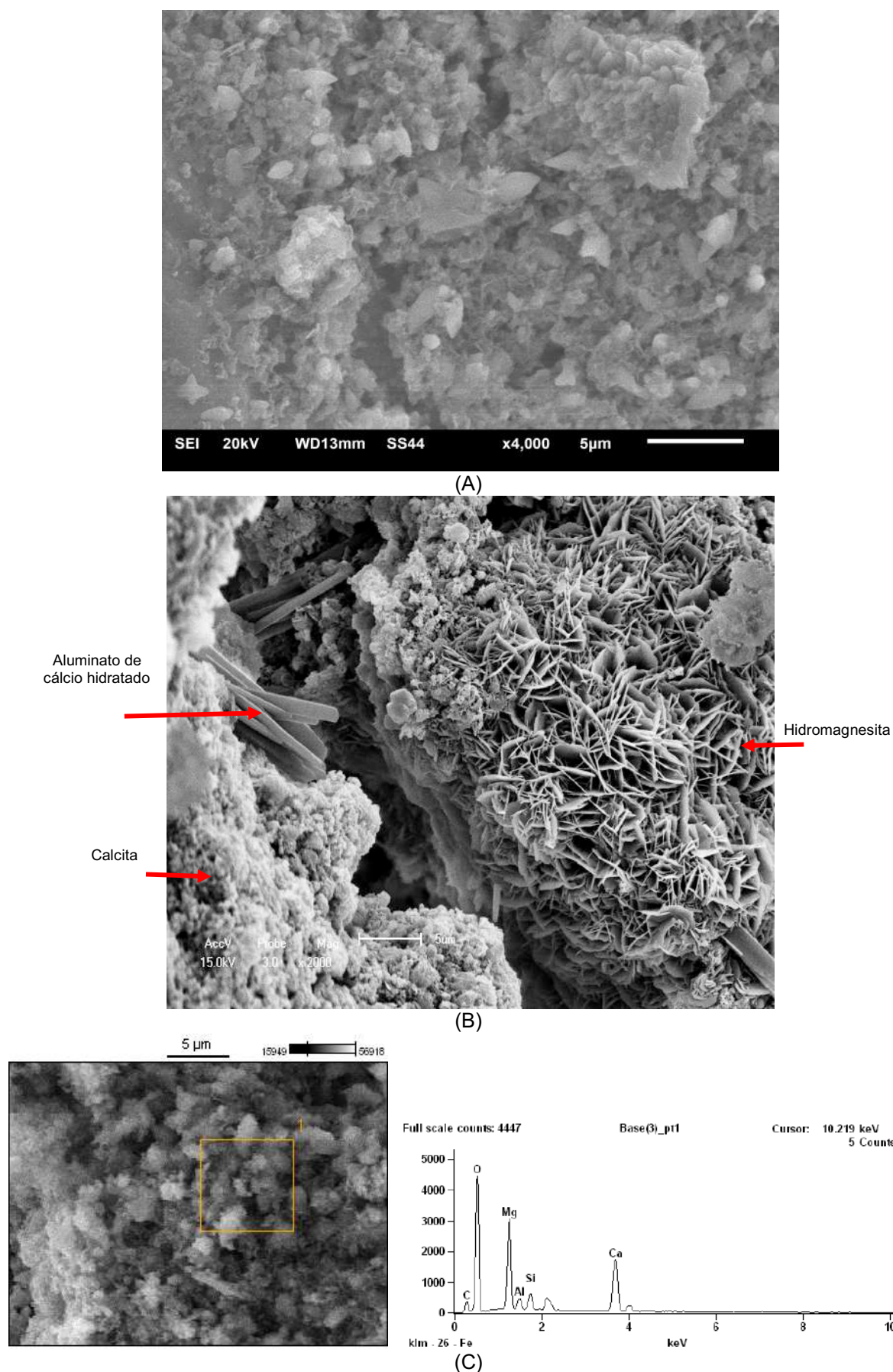


Figura 63- Micrografias da argamassa C. Amostra com 180 dias na cura (A); amostra com 540 dias de cura (B) e elementos químicos identificados por EDS na amostra com 180 dias (C).

Na análise das figuras 61, 62 e 63 é possível identificar a presença de partículas de calcita, comprovando a efetiva carbonatação do hidróxido de cálcio. Além da calcita, a análise química por EDS nas amostras com 180 dias de cura (Figuras 61c, 62c e 63c) 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.

Em todas as micrografias foi constatado, também, a presença de cristais de hidromagnesita (carbonato de magnésio hidratado- $\text{Mg}_5((\text{CO}_3)_4(\text{OH})_2).4\text{H}_2\text{O}$)), provenientes da reação de hidratação da cal dolomítica (MAGALHÃES *et al.*, 2015; ADRIANO *et al.*, 2007).

A identificação de cristais de hidromagnesita nas argamassas estudadas indica que as formulações testadas apresentaram uma cura adequada com preenchimento de vazios (poros/capilares) e crescimento da resistência. Este resultado corrobora com o relato de Vinagre (2015), que afirma que o melhor comportamento das argamassas a longo prazo está relacionado com a microestrutura das cales dolomíticas, onde a hidromagnesita e a magnesita estimulam o desenvolvimento do ligante, com preenchimento dos vazios, contribuindo para a resistência e durabilidade.

No mesmo sentido, Magalhães; Silva e Veiga (2011) analisaram diversos monumentos em Portugal, constatando que, em dois deles, a natureza da cal era dolomítica, justificando, desta forma, que o bom comportamento mecânico das argamassas a longo prazo tem a ver, essencialmente, com a microestrutura destas cales.

4.2.11 Síntese dos resultados no estado endurecido

A tabela 38 apresenta os resultados obtidos para as argamassas analisadas no estado endurecido, na idade de 365 dias de cura, época em que todos os ensaios foram realizados.

Tabela 37- Resultado dos ensaios das argamassas testadas com 365 dias de cura.

Resultados	Argamassas		
	A	B	C
Resistência à tração na flexão (MPa)	0,56	0,17	0,23
Resistência à compressão (MPa)	2,00	0,64	1,02
Coeficiente de Capilaridade (kg/m ² .min ^{1/2})	1,11	2,94	2,51
Absorção de água (g/cm ²)	1,39	3,50	3,16
Índice de vazios (%)	25	27	27
Absorção de água -fervura e imersão(g/cm ²)	0,83	0,94	0,91
Índice de secagem	0,24	0,29	0,29
Permeabilidade ao vapor (Kg/m.s.Pa)(E-11)	1,503	1,471	1,504
Cloretos retidos (%)	0,42	0,31	0,36

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) instáveis ao longo do tempo, justificando menores valores das resistências destas argamassas em relação a de referência. 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. Este fato também decorre das condições de cura, em que o desenvolvimento da resistência fica limitado, devido a evaporação da água e pelo rápido consumo do hidróxido de cálcio.

As propriedades relacionadas a ação da água (Figura 64), um dos principais agentes de degradação dos revestimentos, ratifica as considerações já mencionadas, de que nas argamassas com metacaulim ocorreu o refinamento na rede de poros, observado pelo maior coeficiente de capilaridade e absorção de água. Também justificados pelo transporte de água líquida através dos poros capilares, devido a força de atração entre o líquido e o material sólido, que será tanto maior quanto menor for o diâmetro destes capilares.

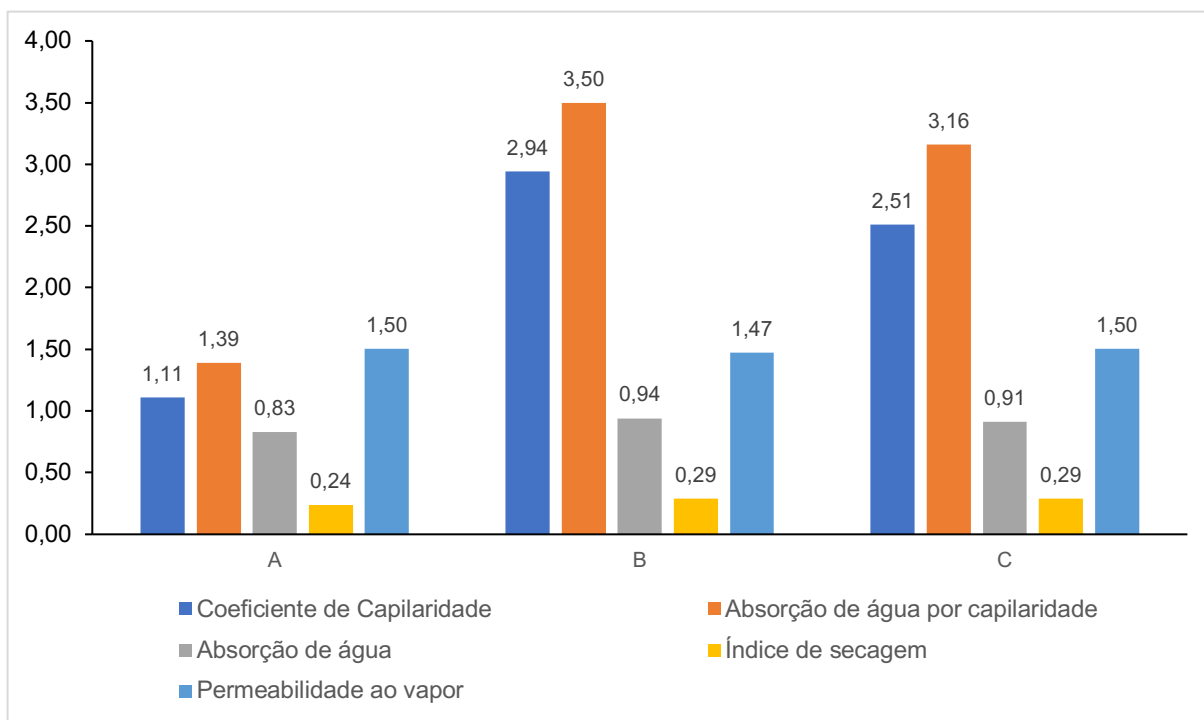


Figura 64- Análise conjunta das propriedades das argamassas frente a ação da água.

Esta alteração na rede porosa é explicada pelo o efeito físico (fíler) associado à reação pozolânica, em que os produtos desta reação são eficientes no preenchimento dos maiores espaços capilares, como os presentes na argamassa de referência.

Verifica-se, ainda, um comportamento das argamassas com metacaulim, aos 365 dias de cura, similar à argamassa de referência no que se refere a permeabilidade ao vapor da água, em que mesmo com poros de menor dimensão esta propriedade não foi afetada.

Quanto a análise da correlação entre o teor de cloretos retidos, o coeficiente de capilaridade e absorção de água (Figura 65), observa-se que embora o coeficiente de capilaridade e a absorção de água sejam maiores para as argamassas com metacaulim em relação a de referência, o teor de cloretos retidos tende a diminuir, devido a dificuldade apresentada pelos poros destas argamassa em que, as partículas mais finas do metacaulim, com maior superfície específica que a da cal, promoveram a uma rede de poros mais tortuosos e de menor dimensão.

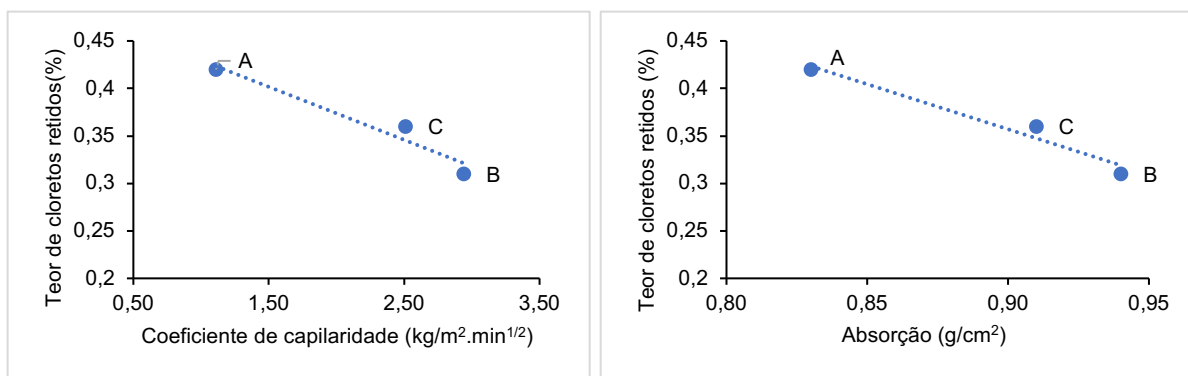


Figura 65- Correlação entre coeficiente de capilaridade, absorção de água e teor de cloretos retidos.

Sendo esta característica (contaminação por cloretos) determinante para a durabilidade das argamassas, percebe-se a influência da rede de poros, onde nas argamassas com metacaulim a retenção de cloretos é inferior à de referência, em média, 26% para a argamassa B e 14% para a argamassa C (Figura 66).

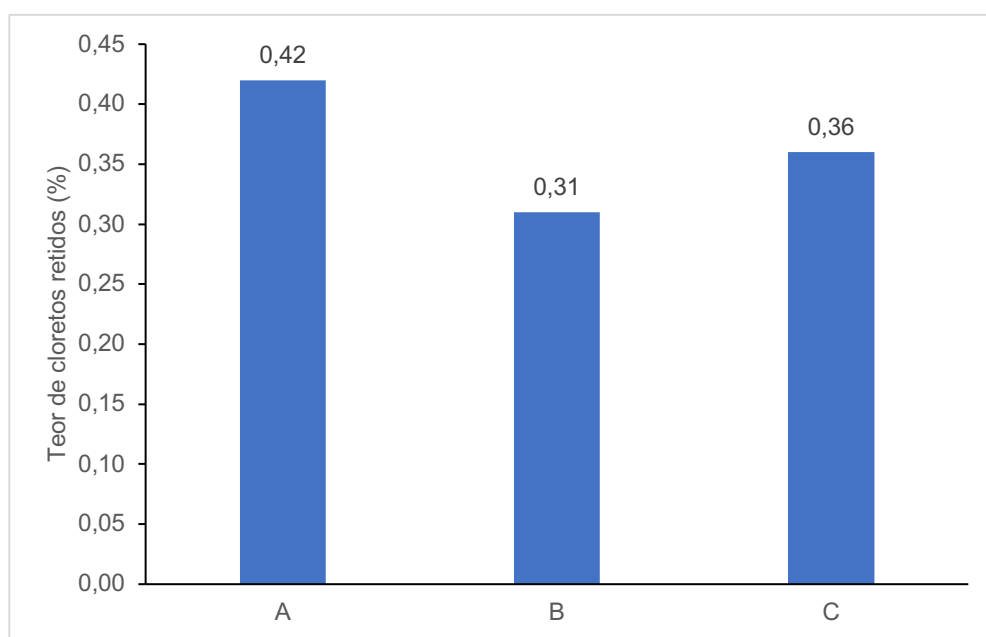


Figura 66- Variação do teor de cloretos retidos nas argamassas analisadas aos 365 dias de cura.

Diante do exposto, pode-se verificar que as novas argamassas cumpriram de forma satisfatória os valores de resistência mecânica, apontadas pelo referencial bibliográfico, e ainda, devido ao refinamento na rede de poros, apresentaram características adequadas em relação a durabilidade.

Os resultados individualizados dos ensaios realizados para cada corpo de prova estão apresentados no Anexo D.

5 Conclusões

Os objetivos da presente tese centraram-se, essencialmente, em contribuir para um maior conhecimento das propriedades de argamassas de cal e, na influência da substituição parcial deste aglomerante por dois tipos de metacaulim. Assim, a caracterização das argamassas estudadas procurou avaliar a sua adequação no restauro de revestimentos externos de prédios históricos expostos a ambientes salinizados.

A análise de algumas características das argamassas de revestimento dos prédios históricos, selecionados para esta pesquisa, especificamente a granulometria da areia e a composição química, provável, do aglomerante utilizados possibilitou eleger a matéria prima para a confecção das novas argamassas. A adoção dos traços, sem metacaulim (argamassa de referência) e com metacaulim, foram norteadas pelo referencial bibliográfico, no entanto, tendo-se o cuidado de ao se comparar os resultados obtidos na pesquisa, considerar as características próprias de cada material.

A partir dos ensaios com as argamassas no estado fresco, verificou-se que todas as formulações apresentaram similaridade quanto a densidade de massa e retenção de água, indicando homogeneidade no processo executivo dos corpos de prova e, que a incorporação de um maior teor de finos não comprometeu o desempenho no estado fresco

A presença da pozolana metacaulim nas argamassas testadas (B e C), conduziram a uma maior facilidade na desforma aos sete dias de cura, sendo possível perceber, desta forma, os reflexos positivos da reação pozolânica.

No estado endurecido, aos 28 dias de cura, as argamassas com metacaulim, devido ao maior teor de finos adicionado às composições, apresentaram maior densidade de massa, determinando maior grau de empacotamento do sistema.

A variação de massa devido a saída de água por secagem e pelas reações de carbonatação e/ou pozolânica, foi mais significativa até os 28 dias de cura, estabilizando-se a partir deste momento. A argamassa de referência (A) apresentou ganho de massa, justificada pela disponibilidade do hidróxido de cálcio nesta data. Situação que ficou comprovada no ensaio de difração de raios X, em que o teor de calcita das argamassas com metacaulim foi muito superior ao desta argamassa. Entre as argamassas B e C, não se verificou diferença muito significativa.

As argamassas produzidas com metacaulim apresentaram valores de resistência mecânica compatíveis para serem utilizadas no restauro de prédios históricos, em sintonia com a bibliografia consultada, porém menores que a de referência. A capacidade das argamassas com metacaulim em absorver deformações estruturais e climáticas, apresentaram valores comparáveis à argamassa de referência.

Com relação ao comportamento frente à água, a argamassa sem metacaulim (A) foi a que apresentou melhor resultado, com menor absorção de água e menor coeficiente de capilaridade. Em contrapartida, esta situação indicou que a presença do metacaulim nas argamassas B e C propiciaram a redução do diâmetro dos tubos capilares, ou seja, ocorreu o refinamento na rede de poros nestas argamassas nas idades iniciais, tendo em vista que os coeficientes de capilaridade não se alteraram, significativamente, dos 28 até os 365 dias de cura.

O índice de vazios apresentou relação similar ao coeficiente de capilaridade, indicando que a argamassa A possui valor de porosidade aberta e menor absorção que as demais, deduzindo-se que para esta argamassa a rede de poros possui menor volume com maior dimensão, ao contrário das argamassas com metacaulim, que indicaram uma rede de poros com maior volume e de menor dimensão. Esta condição se alinha, também, com o resultado do índice de secagem, em que a argamassa A apresentou maior índice de secagem devido a estrutura porosa, que facilitou o acesso de CO₂. As argamassas B e C apresentaram os mesmos parâmetros.

Os resultados obtidos do ensaio de permeabilidade ao vapor de água indicaram que todas as argamassas analisadas possuem boa permeabilidade ao vapor.

As condições de cura adotadas, próximas do ambiente real de serviço e passíveis de serem adotadas *in loco*, favoreceram a reação de carbonatação em detrimento da pozolânica, como foi possível observar no ensaio de difração de raios X, em que restou comprovado que os principais compostos cristalinos identificados

foram o quartzo e os carbonatos de cálcio e magnésio, em razão da cal dolomítica utilizada na composição. Também, foram identificadas as fases cristalinas minoritárias nas argamassas com metacaulim, que corresponde aos silicatos e aluminatos de cálcio hidratados.

Estes resultados validam o uso do metacaulim nas argamassas B e C, principal análise deste trabalho, em que o comportamento destas argamassas no ensaio de envelhecimento artificial através da contaminação devido a névoa salina, indicaram melhor desempenho, com menor teor de cloretos retidos devido ao refinamento dos poros, tornando-os menos interconectados e mais tortuosos. A argamassa sem metacaulim (A) devido a rede de poros ser constituída em menor volume, porém, com poros de maior dimensão, permitiu que os íons cloretos penetrassem sem causar degradação física, como pode ser observado ao longo do processo de cristalização e dissolução, através dos ciclos de saturação e secagem.

A análise global permitiu concluir que é possível melhorar as propriedades das argamassas sem modificar, excessivamente, as características originais da argamassa de cal aérea com a presença da pozolana metacaulim, sendo este aspecto fundamental no estudo das argamassas à base de cal aérea a serem aplicadas em obras de restauro, conferindo compatibilidade e durabilidade.

6 Trabalhos futuros

A fim de complementar os resultados deste trabalho e para o melhor entendimento do comportamento das argamassas de revestimento em prédios históricos, sugere-se os seguintes estudos futuros:

- validar os resultados obtidos neste trabalho com aplicação das argamassas testadas em substratos expostos às intempéries;
- analisar o comportamento das argamassas com adoção de cal cálcica;
- verificar a repercussão dos compostos formados com a substituição de maiores teores da massa de cal, pelos dois tipos de metacaulins utilizados.

REFERÊNCIAS

ADRIANO, P.; SILVA, A. S.; VEIGA, M.; CANDEIAS, A.; MIRÃO, J. Determinação da composição de argamassas antigas. In: CONGRESSO NACIONAL DE ARGAMASSAS DE CONSTRUÇÃO, 2. *Anais...* Lisboa, 2007.

AGGELAKOPOULOU, E.; BAKOLAS, A.; MOROPOULOU, A. Properties of lime-metakaolin mortars for the restoration of historic masonries. *Applied Clay Science*, v. 53, p. 15-19, 2011.

ALVAREZ, J. A.; SEQUEIRA, C.; COSTA, M. Ensinaamentos a retirar do passado histórico das argamassas. In: CONGRESSO NACIONAL DE ARGAMASSAS DE CONSTRUÇÃO, 1, Lisboa, 2005. *Anais...* Lisboa: APFAC, 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM. E96: Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials, West Conshohocken, 2016.

ANSELMO, P. J. A. *Previsão da vida útil de rebocos de fachadas de edifícios antigos*. Lisboa, 2012. 127f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2012.

ARAÚJO, J.; OLIVEIRA, A. M.; CARASEK, H. Influência da maturação da cal hidratada na trabalhabilidade de argamassas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 9, 2011. *Anais...* Belo Horizonte, 2011.

ARIZZI, A.; CULTRONE, G. Aerial lime-based mortars blended with a pozzolanic additive and different admixtures: a mineralogical, textural and physical-mechanical study. *Construction and Building Materials*, n. 31, p. 135-143, 2012a.

_____. The difference in behaviour between calcitic and dolomitic lime mortars set under dry conditions: the relationship between textural and physical-mechanical properties. *Cement and Concrete Research*, n. 42, p. 818-826, 2012b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. NBR 12653: Materiais Pozolânicos. Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

_____. NBR 15894-3: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Parte 3 - Determinação da finura por meio da peneira 45µm. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 45: Agregado - determinação de massa unitária e volume de vazios*. Rio de Janeiro, 2006.

_____. *NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

_____. *NBR 13259: Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade*. Rio de Janeiro, 2005.

_____. *NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - preparo da mistura e determinação do índice de consistência*. Rio de Janeiro, 2005.

_____. *NBR 13277: Argamassa para assentamento de paredes e tetos - determinação da retenção de água*. Rio de Janeiro, 2005.

_____. *NBR 13278: Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado*. Rio de Janeiro, 2005.

_____. *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.

_____. *NBR 13280: Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido*. Rio de Janeiro, 2005.

_____. *NBR 15259: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade*. Rio de Janeiro, 2005.

_____. *NBR 6473: Cal virgem e cal hidratada - Análise química*. Rio de Janeiro, 2003.

_____. *NBR NM 248: Agregados- determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.ABNT. *NBR NM 23: Cimento Portland e outros materiais em pó - determinação da massa específica*. Rio de Janeiro, 2000.

_____. *NBR 9289: Cal hidratada para argamassas - determinação da finura*. Rio de Janeiro, 2000.

_____. *NBR 7200: Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - procedimentos*. Rio de Janeiro, 1998.

_____. *NBR 7215: Cimento Portland - determinação da resistência à compressão*. Rio de Janeiro, 1997.

_____. *NBR 9290: Cal hidratada para argamassas - determinação de retenção de água*. Rio de Janeiro, 1996.

_____. *NBR 8094: Material metálico revestido e não revestido - corrosão por exposição à névoa salina: método de ensaio*. Rio de Janeiro, 1983.

AZEVEDO, A.; ALEXANDRE, J.; XAVIER, G.; ZANELATO, E.; MARVILA, M.; CERQUEIRA, N.; MENDES, B.; MONTEIRO, S. Study of durability of mortars with effluent sludge from paper industry exposed to salt spray. In: LI, J. et al. (ed.). *Characterization of minerals, metals, and materials*. Springer, 2018. p. 669-676.

AZEVEDO, J. *Absorção por capilaridade de soluções salinas em materiais porosos*. Porto, 2013. 114f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2013.

BAUER, E. *Revestimentos de argamassa: características e peculiaridades*. Brasília: LEM-UnB; Sinduscon-DF, 2005.

BRANDI, C. *Teoria da restauração*. São Paulo: Artes e Ofícios, 2014.

BREITENBACH, S. B. *Desenvolvimento de argamassa para restauração utilizando resíduo do polimento do porcelanato*. Natal, 2013. 180f. Tese (Doutorado em Processamento de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

BRITO, V. *Influência dos revestimentos por pintura na secagem do suporte*. Lisboa, 2009. 215f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2009.

CALLISTER, W. *Materials Science and Engineering: an introduction*. 7. ed. New York: John Wiley & Sons, 2007.

CARASEK, H. Argamassa. In: ISAIA, G. C. (Org.). *Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais*. São Paulo: IBRACON, 2007. v. 2.

CARBONE, C. E.; SANTOS, H.; ROMANO, R. C.; PILEGGI, R. G. Efeito da adição de látex nas pastas de cimento branco no estado endurecido. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 13, n. 3, p. 317-330, jul./set. 2013.

CARDOSO, D.; GAMEIRO, A.; SILVA, A. S.; FARIA, P.; VEIGA, R.; VELOSA, A. Influence of curing conditions in air lime-metakaolin blended mortars: a mineralogical and mechanical study. In: HISTORIC MORTARS CONFERENCE, 3., 2013. *Proceedings...* Glasgow, 2013. p. 11-14.

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*. Lisboa, 2013. 208f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2013.

CARVALHO, M. C. N. G. *Reabilitação de revestimentos de paredes de edifícios antigos: proposta de metodologia de apoio ao projecto*. Lisboa, 2014. 146f. Dissertação (Mestrado em Construção e Reabilitação) – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2014.

CARVALHO, P. E. F.; CARASEK, H. Avaliação do comportamento de argamassas com fibras de papel Kraft submetidas a ciclos de variação de umidade e temperatura. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 11, 2015. *Anais...* Porto Alegre, 2015.

CASTRO, A. L.; PANDOLFELLI, V. C. Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. *Cerâmica*, São Paulo, n. 55, p. 18-32, 2009.

CINCOTTO, M. A. *Estudo da composição química da cal hidratada produzida no estado de São Paulo*. São Paulo, 1977. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1977.

CINCOTTO, M. A.; QUARCIONI, V. A.; JOHN, V. M. Cal na construção civil. In: ISAIA, G. C. (Org.). *Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais*. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2010. v. 1. p. 695-726.

CINCOTTO, M. A.; ANGULO, S. C.; CARNEIRO, A. Composições granulométricas de argamassas e seus efeitos no estado fresco e endurecido. In: CONGRESSO PORTUGUÊS DE ARGAMASSA E ETICS, 4. *Anais...* Coimbra, 2012.

COELHO, A. Z.; TORGAL, F. P.; JALALI, S. *A cal na construção*. Guimarães: TecMinho, 2009.

COLLEPARDI, M. Degradation and restoration of masonry walls of historical buildings. *Materials and Structures*, v. 23, p. 81-102, 1990.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. CEN. *EN 1015-19: Methods of test for mortar for masonry - Determination of water vapour permeability of hardened rendering and plastering mortars*. Brussels, 1998.

FARIA, P.; MARTINS, A. Influence of air lime type and curing conditions on lime and lime-metakaolin mortars. In: FREITAS V.; DELGADO J. (eds). *Durability of building materials and components: building pathology and rehabilitation*. Berlin; Heidelberg: Springer, 2013. v. 3.

_____. Influence of curing on lime and lime-metakaolin mortars. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DURABILITY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS, 12, 2011. *Proceedings...* Porto, Portugal, 2011.

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*. Lisboa, 2011. 122f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2011.

FIGUEIREDO, C. P.; SANTOS, F. B.; CASCUDO, O.; CARASEK, H.; CACHIM, P.; VELOSA, A. The role of metakaolin in the protection of concrete against the deleterious action of chlorides. *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*, v. 7, n. 4, p. 685-708, 2014.

GAMEIRO, A.; SILVA, A.; FARIA, P.; GRILO, J.; BRANCO, T.; VEIGA, R.; VELOSA, A. Physical and chemical assessment of lime-metakaolin mortars: influence of binder: aggregate ratio. *Cement and Concrete Composites*, v. 45, p. 264-271, 2014.

GAMEIRO, A. L.; SILVA, A. S.; VEIGA, M. R.; VELOSA, A. L. Lime-metakaolin hydration products: a microscopy analysis. *Materials and Technology*, v. 46, n. 2, p. 145-148, mar. 2012a.

GAMEIRO, A.; SILVA, A. S.; VEIGA, R.; VELOSA, A. Hydration products of lime-metakaolin pastes at ambient temperature with ageing. *Thermochimica*, v. 535, p. p. 36-41, 10 May 2012b.

GIBBONS, P. *Pozzolans for lime mortars*. 1997. Disponível em: <<http://www.buildingconservation.com/articles/pozzo/limepozzolans.htm>>. Acesso em: 19 maio 2015.

GRILLO J.; SILVA, A.; FARIA, P.; GAMEIRO, A.; VEIGA, R.; VELOSA, A. Mechanical and mineralogical properties of natural hydraulic lime-metakaolin mortars in different curing conditions. *Construction and Building Materials*, v. 51, p. 287-294, 2014.

GUIMARÃES, J. E. P.; GOMES, R. D.; SEABRA, M. A. *Guia das argamassas nas construções*. 8. ed. Associação Brasileira dos Produtores de Cal, 2004.

GUIMARÃES, J. E. P. *A cal: fundamentos e aplicações na engenharia civil*. 2. ed. São Paulo: Pini, 2002.

HENRIQUES, F.; FARIA, P. O papel da investigação no estudo das argamassas de substituição na conservação do património. *Revista de Engenharia Civil*, Universidade do Minho, n. 31, p. 36, 2008.

HUGHES, J. J. The Role in Masonry: an Introduction to Requirements for the Design of Repair Mortars. In: 2° Historic Mortars Conference HMC 2010 and RILEM TC 203-RHM Final Workshop. Prague. *Anais...Prague Czech Republic*, 2010.

JAPIASSÚ, P.; DIAS, N. G.; CARASEK, H.; CASCUDO, O. Avaliação da aderência de argamassas de reabilitação de revestimentos em azulejo. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 14. *Anais...* Juiz de Fora, 29-31 out. 2012.

JAPIASSÚ, P. R. *Estudo do mecanismo de aderência de azulejos e argamassas de cal em revestimentos históricos*. Goiânia, 2011. 289f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2011.

KANAN, M. I. C. *Manual de conservação e intervenção em argamassas e revestimentos à base de cal*. Brasília: IPHAN/Programa Monumenta, 2008. (Cadernos Técnicos, 8).

KAZMIERCZAK, C.; KULAKOWSKI, M. P.; BREHM, F.; SENTENA, J. A. A.; MARQUETTO, L. Considerações sobre a avaliação da durabilidade de revestimentos de argamassa com incorporação de resíduos por meio de ensaios acelerados com ciclos térmicos. 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5935/978-85-5953-005-6.2016C006>>. Acesso em: 10 out. 2018.

LANAS, J.; PÉREZ BERNAL, J. L.; BELLO, M. A.; ALVAREZ, J. I. Mechanical properties of masonry repair dolomitic lime-based mortars. *Cement and Concrete Research*, n. 36, p. 951-960, 2006.

LANAS, J.; ALVAREZ, J. I. Masonry repair lime-based mortars: factors affecting the mechanical behavior. *Cement and Concrete Research*, v. 33, p. 1867-1876, 2003.

MAGALHÃES, A. C. Patologia de rebocos antigos. *Cadernos de Edifícios*, Lisboa, LNEC, n. 2, p. 69-85, 2002.

MAGALHÃES, A. C.; VEIGA, M. R. *Avaliação da resistência de amostras de argamassas históricas recolhidas em obra: metodologia e correlação de resultados*. Lisboa: LNEC, 2006. Relatório.

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, 12, 2017. *Anais*. . . São Paulo, SP, 2017.

MAGALHÃES, A. C.; SILVA, A. S.; VEIGA, R. Argamassas antigas: produtos resultantes de reações químicas ao longo do tempo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 9. Belo Horizonte. *Anais*. . . Belo Horizonte, 2011.

MARGALHA, M. G.; VEIGA, M. R.; SILVA, J. S.; BRITO, J. A influência do teor de cal em pasta em argamassas. In: SEMINÁRIO LIMECONTECH: conservação e durabilidade de revestimentos históricos: técnicas e materiais compatíveis. Lisboa: LNEC, 2013.

MARGALHA, G. *Argamassas*. Universidade de Évora, 2011. Documento de apoio às aulas de Conservação e Recuperação do Património.

MARGALHA, M. G.; VEIGA, M. R.; BRITO, J. Influência das areias na qualidade de argamassas de cal aérea. In: CONGRESSO NACIONAL DE ARGAMASSAS DE CONSTRUÇÃO, 2. *Anais...* Lisboa, 2007.

MARGALHA, M. G.; VEIGA, M. R.; BRITO, J. Algumas vantagens do uso da cal em pasta em revestimentos (Some advantages of the use of lime in renderings). In: MEETING ON PATHOLOGY AND REHABILITATION OF BUILDINGS, 2. *Proceedings...* 2006, p. 283-293.

MARGALHA, M. G.; VEIGA, M. R.; BRITO, J. The maturation time factor in lime putty quality. In: INTERNATIONAL BRICK MASONRY CONFERENCE, 7. *Proceedings...* London, Oct.-Nov. 2006a.

MARTINS, A. I. G. *A influência das condições de cura em argamassas de cal aéreas com e sem adição de metacaulino*. Aveiro, 2010. 142f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Politécnico de Setúbal, Aveiro, 2010.

MATTOS, F. C.; GONÇALVES, M. R. F. Influência do teor de finos das areias no coeficiente de capilaridade das argamassas de cal expostas ao ambiente marinho. *Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão*, Curitiba, v. 2, n. 1, jan./jun. 2017.

MEDINA, E. A. *Pozolanicidade do metacaulim em sistemas binários com cimento Portland e hidróxido de cálcio*. São Paulo, 2011. 134f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. São Paulo: IBRACON, 2008. 674p.

MERGULHÃO, D. N. F. H. Argamassas de cal aérea e metacaulino: influência do traço, da cura marítima e da idade. Lisboa, 2014. 125f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2014.

MOROPOULOU, A.; BAKOLAS, A.; MOUNDOULAS, P.; AGGELAKOPOULOU, E. - Reverse Engineering: A proper methodology for compatible restoration mortars. *RILEM Workshop Repair Mortars for Historic Masonry*, Delft, January 2005a.

MOROPOULOU, A.; BAKOLAS, A.; ANAGNOSTOPOULOU, S. Composite materials in ancient structures. *Cement and Concrete Composites*, v. 27, n. 2, p. 295-300, 2005b.

MOROPOULOU, A.; BAKOLAS, A.; MOUNDOULAS, P.; AGGELAKOPOULOU, E.; ANAGNOSTOPOULOU, S. Strength development and lime reaction in mortars for repairing historic masonries. *Cement and Concrete Research*, n. 27, p. 289-294, 2005c.

MOROPOULOU, A.; BAKOLAS, A.; AGGELAKOPOULOU, E. Evaluation of pozzolanic activity of natural and artificial pozzolans by thermal analysis. *Thermochimica Acta*, n. 420, 2004, p. 135-140.

MOTA, J. M. F.; OLIVEIRA, R. A.; CARNEIRO, A. M. P. Durabilidade de argamassas com adição de metacaulim para reforço de alvenaria. *Matéria*, v. 21, p. 1105-1116, 2016.

MOTA, J. M. F.; CARASEK, H.; SILVA, A. J. C.; BARBOSA, F. R.; SANTOS, W. W. Argamassas inorgânicas com adição de metacaulim. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 7, 2011. *Anais...* Belo Horizonte, 2011.

MOTA, J. M. F.; OLIVEIRA, R. A.; SILVA, A. C.; FEITOSA, A. G.; SANTOS, W. W.; SIMÃO, D. W. G. Influência da adição de metacaulim nas propriedades de argamassas inorgânicas. In: CONGRESO INTERNACIONAL SOBRE PATOLOGÍA Y REHABILITACIÓN DE ESTRUCTURAS, 6. *Anales...* Córdoba, Argentina, 2-4 jun. 2010.

NAPPI, M. M. L.; NAPPI, S. C. B.; SOUZA, J. C. S. Ensaio não destrutivo para a quantificação da concentração de sal em argamassas de edifícios históricos. In: CONGRESO IBEROAMERICANO, 3; JORNADAS TÉCNICAS DE RESTAURACIÓN Y CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO, 11. *Anales...* La Plata, Argentina, 2013.

NAPPI, S. C. B.; LALANE, M. M. A Salinidade em edifícios antigos. In: CONGRESO INTERNACIONAL SOBRE PATOLOGÍA Y RECUPERACIÓN DE ESTRUCTURAS, 6, 2010. *Anales...* Córdoba, Argentina, 2010.

NIQUES, G. *Efeito do tempo de maturação na microestrutura de uma cal virgem dolomítica*. Florianópolis, 2003. 110f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

NITA, V.; JOHN, M. *Materiais pozolânicos: o metacaulim e a sílica ativa*. São Paulo: EPUSP, 2007. 13 p. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil; BT/PCC/451. Disponível em: <http://icgg2006.pcc.usp.br/files/text/publications/BT_00451.pdf>. Acesso em: 24 maio 2017.

NÓBREGA, A.; SOUSA, J.; MARINHO, M.; CARNEIRO, A. Estudo das propriedades de argamassas de cal e pozolana: influência do tipo de metacaulim. In: CONGRESSO PORTUGUÊS DE ARGAMASSAS DE CONSTRUÇÃO, 3. *Anais...* Lisboa, 2010.

NUNES, A.; SLÍŽKOVÁ, Z.; KŘIVÁNKOVÁ, D. Lime-based mortars with linseed oil: sodium chloride resistance assessment and characterization of the degraded material. *Periodico di Mineralogia*, v. 82, n. 3, p. 411-427, 2013.

PAIVA, S. C.; GOMES, E. A. O.; OLIVEIRA, R. A. Controle de qualidade da cal para argamassas: metodologias alternativas. *Revista Ciência & Tecnologia*, Recife, n. 1, 2007. Disponível em: <http://www.unicap.br/revistas/revista_e/artigo8.pdf>. Acesso em: 19 ago. 2016.

POSSER, N. B. *Proporcionamento de argamassas para reboco de substituição*. Porto Alegre, 2004. 180f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

RAGO, F.; CINCOTTO, M. A. *Influência do tipo de cal hidratada na reologia de pastas*. São Paulo: EPUSP, 1999. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, BT/PCC/233. Disponível em: <http://www2.pcc.usp.br/files/text/publications/BT_00233.pdf>. Acesso em: 16 maio 2017.

RECENA, F. A. P. *Conhecendo Argamassa*. 2. ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2015.

RECENA, F. A. P. *Técnicas aplicáveis a trabalhos de restauração de prédios de interesse histórico e cultural*. Porto Alegre: IPSDP, 2014.

RILEM. *CPC-18: Measurement of hardened concrete carbonation depth Recommendations*. 1988.

ROCHA, C. A. A. R.; DÉsir, J. M.; DIAS, D. P.; VIANA, C. E. Estudo da durabilidade de argamassas contendo resíduos industriais. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE MATERIAIS E TECNOLOGIAS NÃO-CONVENCIONAIS NA CONSTRUÇÃO ECOLÓGICA E SUSTENTÁVEL, 2006. *Anais...* Salvador, BA, 2006.

RODRIGUES, J. D.; GONÇALVES, T. D. Sais solúveis nas construções históricas: introdução e relato sumário. In: SEMINÁRIO SAIS SOLÚVEIS EM ARGAMASSAS DE EDIFÍCIOS ANTIGOS: danos, processos e soluções. Lisboa, LNEC, 2005. p. 1-13.

RODRIGUES, P. F. Resistance to salt of lime and pozzolan mortars. In: INTERNATIONAL RILEM WORKSHOP ON REPAIR MORTARS FOR HISTORIC MASONRY. *Proceedings...* Delft, Netherlands, 2005. p. 99-110.

ROGRIGUES, M. P. S. F. *Argamassas de revestimento para alvenarias antigas: contribuição para o estudo da influência dos ligantes*. Lisboa, 2004. 523f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2004.

SABIR, B. B.; WILD, S.; BAI, J. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. *Cement & Concrete Composites*, v. 23, p. 441-454, 2001.

SANTIAGO, C. C. O restauro de argamassa de cal no Brasil. *Construindo*, Belo Horizonte, v. 4, n. 1, jan./jun. 2012.

SANTIAGO, C. C. *Argamassas tradicionais de cal*. Salvador: EDUFBA, 2007.

SANTOS, A. R.; VEIGA, M. R.; SANTOS, A. S.; BRITO, J. A influência das areias no desempenho mecânico das argamassas de cal. In: CONGRESO LATINOAMERICANO DE PATOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN, 8; CONGRESO DE CONTROL DE CALIDAD EN LA CONSTRUCCIÓN, 15. *Anales...* Lisboa, 2015.

SELMO, S. M. S. *Dosagem de argamassa de cimento Portland e cal para revestimento externo de fachadas dos edifícios*. São Paulo, 1989. 227f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.

SIDDIQUE, R.; KLAUS, J. Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: a review. *Applied Clay Science*, n. 43, p. 392-400, 2009.

SILVA, A. S.; GAMEIRO A.; GRILO J.; VEIGA R.; VELOSA, A. Long-term behavior of lime-metakaolin pastes at ambient temperature and humid curing condition. *Applied Clay Science*, n. 88-89, p. 49-55, 2014.

SILVA, J.; BRITO, J.; VEIGA, M. R. Avaliação do comportamento à água de argamassas com incorporação de agregados cerâmicos. *Engenharia Civil*, Escola de Engenharia da Universidade do Minho, n. 28, p. 37-45, 2007.

SOUZA, J. S. C. *Estudo de argamassas à base de cal e metacaulim para intervenções em revestimento das edificações históricas*. Recife, 2013. 228f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

TAYLOR, H. F. W. *The chemistry of cements*. London: Thomas Telford, 1997.

TEODORO, R.; CASCUDO, O.; CARASEK, H. Influência das características de diferentes tipos de metacaulim em propriedades mecânicas e absorção de água do concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 58. *Anais...* Belo Horizonte, out. 2016.

TRISTÃO, F. A. *Influência dos parâmetros texturais das areias nas propriedades das argamassas mistas de revestimento*. Florianópolis, 2005. 234f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

VAN BALEN, K.; PAPAYIANNI, I.; VAN HESS, R.; BINDA, L.; WALDUM, A. Introduction to requirements for and functions and properties of repair mortars. *Materials & Structures*, v. 38, p. 781-785, 2005.

VEIGA, M. 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*, n. 157, p. 132-140, 2017.

_____. Argamassas de cal e metacaulino para revestimento de paredes antigas: características do revestimento aplicado. In: VELOSA, A.; ROCHA, F. T.; CACHIM, P. (Org.). *Metacaulino em Portugal: produção, aplicação e sustentabilidade*. Aveiro, 2013. p. 115-137.

_____. Comportamento de rebocos para edifícios antigos: exigências gerais e requisitos específicos para edifícios antigos. In: SEMINÁRIO SAIS SOLÚVEIS EM ARGAMASSAS DE EDIFÍCIOS ANTIGOS. *Anais...* Lisboa: LNEC, 2005.

_____. As argamassas na conservação. In: JORNADAS DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE DE AVEIRO: Avaliação e Reabilitação das Construções Existentes, 1. *Actas...* Aveiro, 2003.

VEIGA, M. R. S.; SANTOS, D. A. F. *Métodos de ensaio de revestimentos de paredes existentes: ensaios in situ e ensaios em laboratório sobre amostras recolhidas em obra*. Lisboa: LNEC, 2016.

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, p. 121-126, 2009a.

VELOSA, A. L.; VEIGA, M. R.; ROCHA, F. Utilização de metacaulim em argamassas para a conservação de edifícios. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 8. *Anais...* Curitiba, maio 2009b.

VELOSA, A.; VEIGA, M. R. Lime-metakaolin mortars: properties and applications. In: PORTUGAL SB07: Sustainable construction. Materials and practices. Challenges of the industry for the new millennium. Lisboa, IST, set. 2007.

VELOSA, A. L. P. L. *Argamassas de cal com pozolanas para revestimento de paredes antigas*. Aveiro, 2006. 467f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de Aveiro, Aveiro, 2006.

VILLAR-COCIÑA, E.; VALENCIA-MORALES, E.; GONZÁLEZ-RODRIGUEZ, R.; HERNÁNDEZ-RUIZ, J., Kinetics of the pozzolanic reaction between lime and sugar cane straw ash by electrical conductivity measurement: A Kinetic diffusive model. *Cement and Concrete Research*, n.33, p. 517-524, 2003.

VINAGRE, A. I. B. *Estudo comparativo entre argamassas de cal calcítica e de cal dolomítica: características mecânicas, físicas, mineralógicas e microestruturais*. Évora, 2015. 228f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Évora, Évora, 2015.

WALKER, R.; PAVÍA, S. Effect of pozzolan properties on the properties of building composites. *BCRI Bridge Infrastructure Concrete Research*, University College Cork, NíNualláin, Walsh, West, Cannon, Caprani, McCabe, 2010. p. 457-468.

ZIBARA, H.; HOOTON, R. D.; THOMAS, M. D. A.; STANISH K. Influence of the C/S and C/A ratios of hydration products on the chloride ion binding capacity of lime-SF and lime-MK mixtures. *Cement and Concrete Research*, n. 38, p. 422-426, 2008.

ANEXO A- Resumo das composições das argamassas antigas de acordo com importantes tratadistas.

Tratadista ou autor	Época e país em que viveu ou nacionalidade	Composição da argamassa	Traço	Observações
Vitrúvio	Roma	Cal e areia de jazida	1:3	
		Cal e areia do rio ou mar	1:2	
Palladio	Itália-1.570	Cal e areia de jazida	1:3	
		Cal e areia do rio ou mar	1:2	
Plínio		Cal e areia de jazida	1:4	
		Cal e areia do rio ou mar	1:3	
Tratadista Martini	Itália-1.482	Cal viva, cinzas e óleo de azinheiro	1:0,5 e óleo o suficiente para empastar	Argamassa hidrófugas
		Cal viva, cinzas de azinheiro, vetriolo romano (ou sulfato de cobre) e óleo	1:0,5:0,25 de sulfato de cobre + óleo	
Mathias Ayres Ramos da Sylva de Eça	Escritor português, nascido em São Paulo- 1.705-1.763	Areia e cal		Recriminava o uso de qualquer material diferente da areia e cal.

Tratadista ou autor	Época e país em que viveu ou nacionalidade	Composição da argamassa	Traço	Observações
Carlos Augusto Pinto Ferreira	Portugal- viveu no início do século XX	Pó de pedra e cal virgem	1:101:1	Utilizado para betume em cantaria
		Pó de pedra, cal virgem e azeite	1,725:1,725:1,5 (medida em litros)	Utilizado para betume em cantaria
		Cal virgem e clara de ovo	Cal viva pulverizada amassada com clar de ovo	Para betume de pedra e para mármore
Plínio (O Antigo)	Roma- nasceu em 23 d.C e morreu 70 d.C.	Cal e pó de pedra	1,5:1	Argamassa de revestimento
Cataneo	Siena- 1.510 a 1574	Cal feita com pó de mármore e pó de mármore finamente moído	2/3:1/3	Argamassa para revestimento- estuque
Matheus de Couto	Portugal- escrito entre 1.631 a 1.641	Cal e areia	1:1,5	Cal feita de lioz
			1:1	Cal virgem com pouca dureza
			1:2	Cal virgem com maior dureza
Manuel de Azeredo Fontes	Portugal- escrito entre 1.728 a 1.729	Cal e areia	1:1	Cal mais fraca
			1:2	Cal mais forte

ANEXO B- Características das argamassas de cal aérea e metacaulim obtidas em pesquisas recentes.

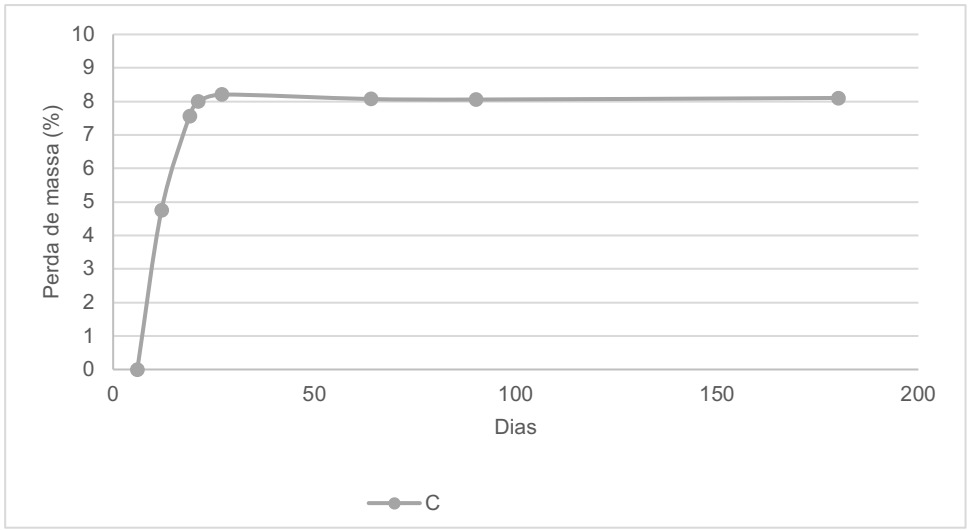
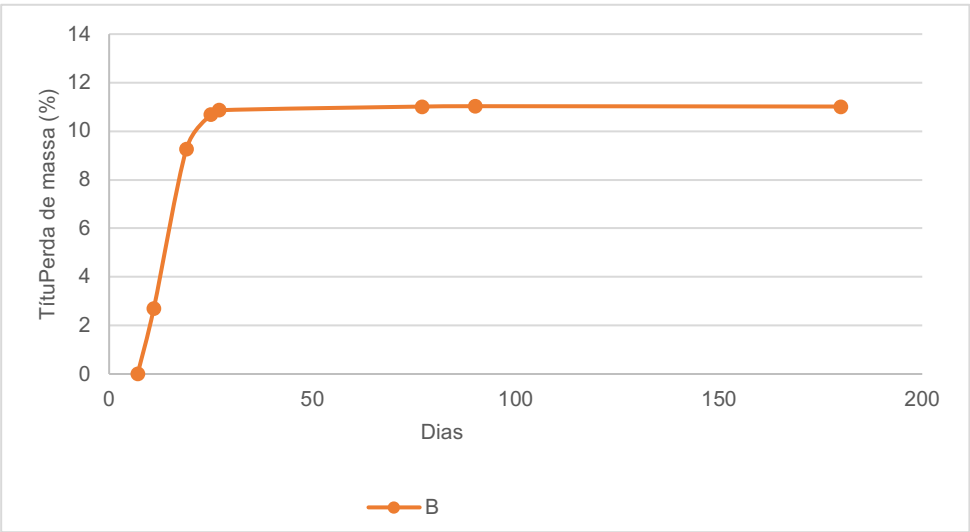
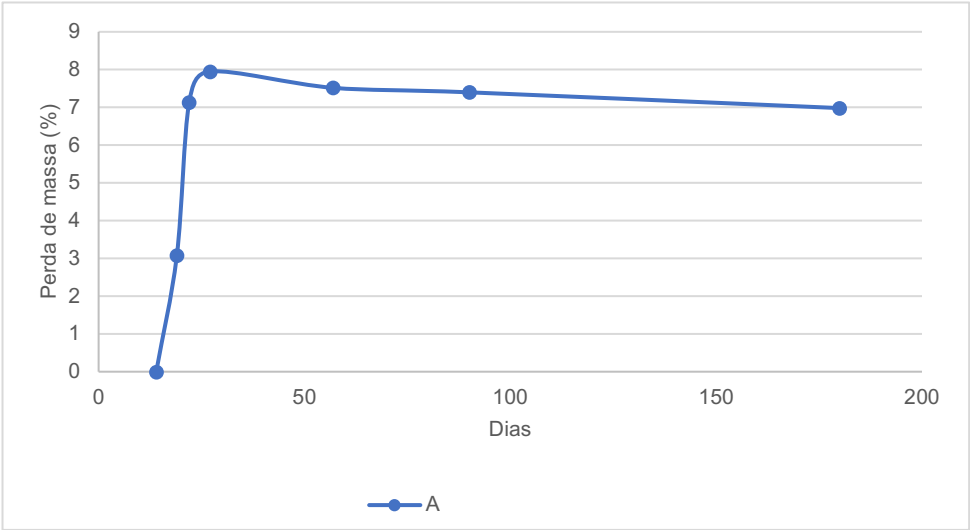
Estudo	Traço em volume	Resistência à flexão (MPa)			Resistência à compressão (MPa)			Coeficiente de capilaridade (Kg/m ² min ^{0,5})	
		28 d	90 d	180 d	28 d	90 d	180 d	28 d	90 d
Velosa, 2006 T=20°C±2 e UR=95%±5 por 7 dias, após T= 20°C±2 e UR=65%±5	1:3	0,27	0,26	0,58	0,50	0,84	2,46	1,40	2,22
	1:3 (10% MK)	0,19	0,22	0,18	0,48	0,43	0,38	2,56	2,65
	1:3 (20% MK)	0,27	0,21	0,11	0,76	0,98	0,92	2,91	2,76
Velosa e Veiga, 2007 Nos moldes dentro de saco de poliester por 7 dias, após T= 20°C±2 e UR=65%±5	1:3	0,27	0,25	-	0,50	0,85	-	1,45	2,20
	1:0,5:4	0,40	0,4	-	1,20	1,35	0,68	1,50	1,60
Faria e Martins, 2013 T= 20°C e UR=65%	1:3	-	0,20*	-	-	0,50*	0,90**	-	1,200
	1:3 (20% MK)	-	0,30*	-	-	0,40*	1,00**	-	1,12
Aggelakopoulou; Bakolas e Moropoulou, 2011 T= 20°C±5 e UR=60%±5	1:3 (9% MK)	1,20	1,30	0,80	3,20	4,20	4,20	-	-
	1:3 (17% MK)	2,20	2,20	1,80	7,80	8,20	8,20	-	-
Felgueiras, 2011 T= 23°C±3 e UR=65%±5	1:3	0,20	0,38	-	0,49	0,92	-	1,43	1,37
	1:3 (10% MK)	0,09	0,09	-	0,18	0,30	-	5,58	3,09
	1:3 (20% MK)	0,05	0,05	-	0,17	0,26	-	5,06	4,55
Arizzi e Cultone, 2012a T= 20°C±5 e UR=60%±5	1:3 (20% MK)	-	0,38*	-	-	7,18*	-	-	-
Veiga, 2013 T= 23°C e UR=50%	1:1,7 (25% MK)	-	0,4	-	-	1,30	-	-	1,62
Cardoso, 2013 T= 20°C±3 e UR=65%±5	1:3	0,36	0,45	0,44	0,59	0,70	0,68	-	-
	1:3 (30% MK)	0,05	0,05	0,05	0,40	0,32	0,42	-	-

ANEXO C- Análise comparativa entre os traços das argamassas testadas e os identificados em trabalhos analisados no referencial teórico.

		Traço (cal:metacaulim:areia)	
		Volume	Massa
Tese	Argamassa A	1:4	1:10,19
	Argamassa B	1:4 (10% MK)	1:0,096:11,33
	Argamassa C	1:4 (10% MK)	1:0,082:11,33
Faria e Martins, 2013		1:3	1:12
		1:3 (20% MK)	1:0,25:15
Felgueiras, 2011		1:3	1:12
		1:3 (10% MK)	1:0,1:15
		1:3 (20% MK)	1:0,2:18
Cardoso, 2013		1:3	1:12
Cardoso <i>et al.</i> , 2013		1:3	1:12
		1:3 (9% MK)	1:14
Gameiro <i>et al.</i> , 2014		1:3	1:0:11,61
Mergulhão, 2014		1:3	1:11,6
Magalhães; Muñoz; Andrade, 2017		1:3	1:8,70

ANEXO D- Resultados individualizados.

A) Variação de massa até 180 dias de cura



B) Resistência mecânica

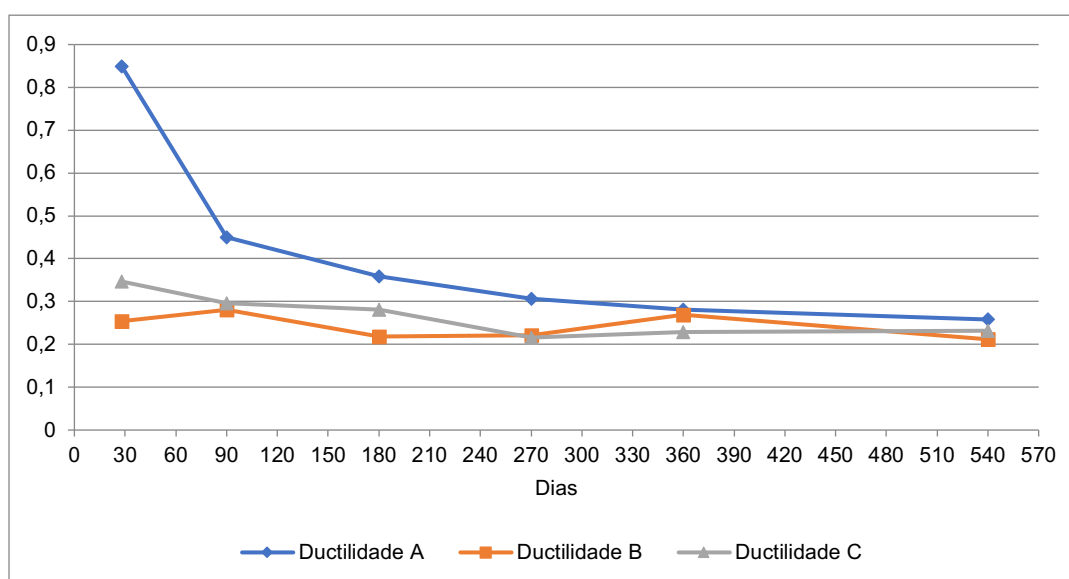
Resistência à tração na flexão (MPa)					
Dias	A1	A2	A3	Rt	desvio padrão
28	0,34425	0,30295313	0,255281	0,300828	0,044522425
90	0,50521875	0,48651563	0,507445	0,499727	0,011495044
180	0,521742188	0,48107813	0,485742	0,496188	0,022253537
270	0,494601563	0,49277344	0,538266	0,508547	0,025753419
360	0,574935938	0,58290938	0,526448	0,561431	0,030557189
540	-	0,5738628	0,86062	0,717242	0,202768162
	B1	B2	B3	média	desvio padrão
28	0,146859375	0,11067188	0,102281	0,119938	0,023689474
90	0,1708125	0,16685156	0,16057	0,166078	0,005164713
180	0,169429688	0,17257031	0,138633	0,160211	0,018753066
270	0,178710938	0,159	0,159375	0,165695	0,011273421
360	0,187957031	0,17733047	0,154786	0,173358	0,01693862
540	0,18853834	0,1642392	-	0,176389	0,017182085
	C1	C2	C3	média	desvio padrão
28	0,167789063	0,17676563	0,141141	0,161898	0,01852862
90	0,189679688	0,26032031	0,193852	0,214617	0,039634995
180	0,223664063	0,18035156	0,198633	0,200883	0,021743736
270	0,212554688	0,22071094	0,209063	0,214109	0,005977818
360	0,231628125	0,26542734	0,203709	0,233588	0,03090564
540	0,213160179	0,26407327	0,225426	0,23422	0,02657135

Resistência à compressão (MPa)					
Dias	A1	A2	A3	Rc	desvio padrão
28	0,450396429	0,29766429	0,314689	0,35425	0,08369925
90	1,135835714	1,25283214	0,947025	1,111898	0,154302548
180	1,275810714	1,43671786	1,438325	1,383618	0,093367182
270	1,613739286	1,822475	1,547304	1,661173	0,14358715
360	1,785119286	2,285785	1,93506	2,001988	0,256955333
540	-	2,75230025	2,825492	2,788896	0,051754231
	B1	B2	B3	média	desvio padrão
28	0,474789286	0,48478571	0,454218	0,471264	0,015585817
90	0,554446429	0,58033929	0,640011	0,591599	0,043879316
180	0,773760714	0,63832857	0,785814	0,732635	0,081893416
270	0,723357143	0,78066071	0,737768	0,747262	0,029808179
360	0,678518929	0,6678175	0,58571	0,644016	0,050776527
540	0,874139786	0,83371189	-	0,853926	0,028586837
	C1	C2	C3	média	desvio padrão
28	0,487789286	0,47036071	0,442832	0,466994	0,02266687
90	0,658932143	0,81960714	0,695643	0,724727	0,084193504
180	0,830210714	0,67915714	0,632982	0,714117	0,103157179
270	1,013721429	0,99427857	0,966079	0,99136	0,023955189
360	1,028851071	1,08778893	0,953811	1,023484	0,06715019
540	0,927336286	1,14615582	0,890094	0,987862	0,138345273

C) Profundidade de carbonatação

	A		
CP	111	231	351
Face 1	2,87	2,16	1,49
Face 2	3,52	4,43	2,69
Face 3	1,89	3,3	2,09
Face 4	3,39	1,33	0,62
Média (mm)	2,9175	2,805	1,7225
	B		
CP	111	231	351
Face 1	6,11	5,76	6,06
Face 2	6,11	4,79	4,44
Face 3	6,09	5,51	6,08
Face 4	6,11	6,24	5,83
Média (mm)	6,105	5,575	5,6025
	C		
CP	111	231	351
Face 1	4,18	5,32	5,84
Face 2	6,81	5,96	7,3
Face 3	6,5	6,79	6,99
Face 4	6,8	6,13	5,15
Média (mm)	6,0725	6,05	6,32

D) Ductilidade



E) Absorção de água por capilaridade

Argamassa A- Absorção por capilaridade (g/cm ²)				
Tempo ^{1/2} (min)/Idade(dias)	90	180	270	360
0	0	0	0	0
2	0,596041667	0,587708333	0,472083333	0,534375
3,16227766	0,83375	0,7975	0,649375	0,6871875
4	1,03125	0,945833333	0,824583333	0,7940625
6	1,3425	1,218541667	1,060416667	1,0325
8	1,668541667	1,47	1,278541667	1,2484375
9,486832981	1,894791667	1,65	1,442291667	1,3921875

Argamassa B- Absorção por capilaridade (g/cm ²)				
Tempo ^{1/2} (min)/Idade(dias)	90	180	270	360
0	0	0	0	0
2	1,267292	1,246458	1,237708	1,212708
3,162278	1,681875	1,808542	1,721667	1,64625
4	2,103125	2,201042	2,066875	1,943542
6	2,87	2,911458	2,777917	2,581458
8	3,545	3,462708	3,377708	3,199375
9,486833	3,652917	3,762708	3,6025	3,504792

Argamassa C- Absorção por capilaridade (g/cm ²)				
Tempo ^{1/2} (min)/Idade(dias)	90	180	270	360
0	0	0	0	0
2	1,558333	1,124167	1,135833	1,165417
3,162278	2,076875	1,657083	1,57375	1,570208
4	2,465417	1,979792	1,885625	1,823958
6	3,194167	2,631042	2,523333	2,339167
8	3,460208	3,152292	3,09	2,828333
9,486833	3,463125	3,393958	3,400625	3,159375

F) Índice de Vazios e Absorção de água

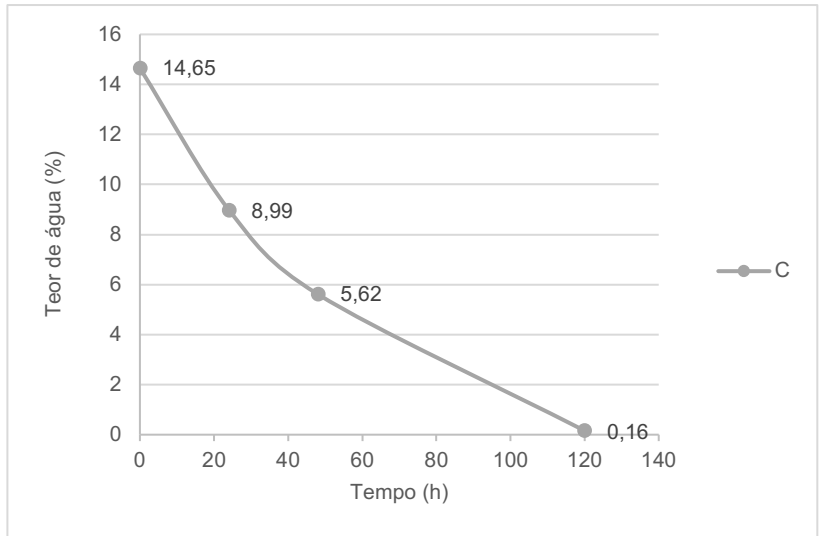
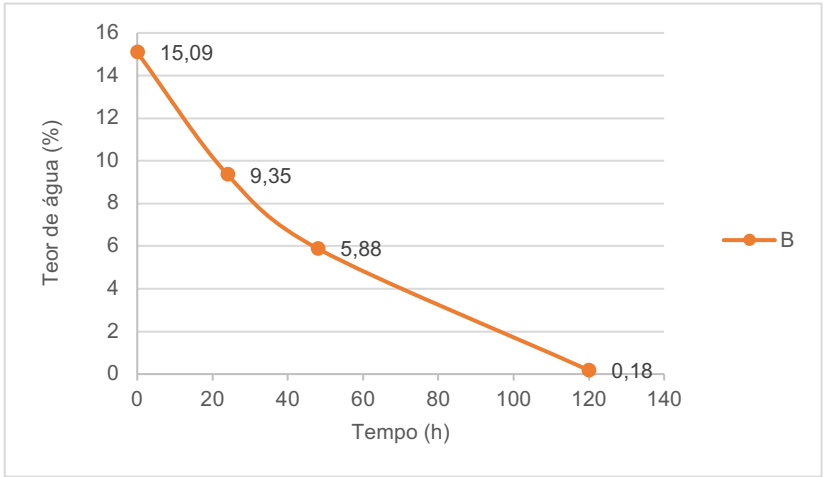
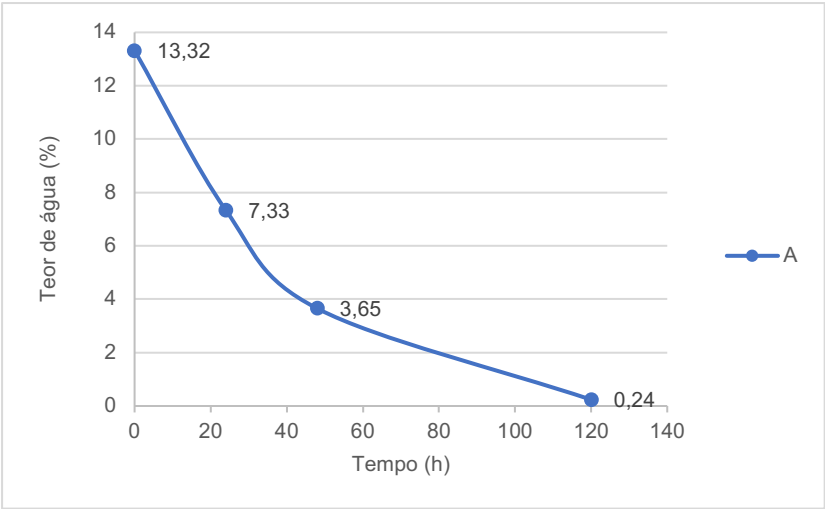
Argamassa A- Peso (g)				Argamassa B- Peso (g)				Argamassa C- Peso (g)			
90 dias				90 dias				90 dias			
CP	m _s	m _i	m _{sat}	CP	m _s	m _i	m _{sat}	CP	m _s	m _i	m _{sat}
122	461,40	282,59	536,39	122	457,68	280,12	529,81	122	458,40	281,68	533,33
242	452,94	277,75	525,77	242	467,49	287,28	541,24	242	467,79	287,45	545,62
362	433,19	265,25	502,69	362	446,30	274,74	518,44	362	452,30	277,84	527,27
média	449,18	275,20	521,62	média	457,16	280,71	529,83	média	459,50	282,32	535,41
180 dias				180 dias				180 dias			
113	454,81	266,67	513,30	113	459,31	276,47	526,40	113	473,38	284,27	540,30
233	475,79	280,93	537,70	233	472,28	283,57	542,00	233	467,47	281,66	535,00
353	456,23	268,66	516,90	353	465,04	280,61	534,90	353	460,09	276,48	527,80
média	462,28	272,09	522,63	média	465,54	280,22	534,43	média	466,98	280,80	534,37
270 dias				270 dias				270 dias			
123	451,69	274,04	519,05	122	451,07	275,25	525,18	122	457,13	279,32	528,73
242	454,44	274,09	521,47	242	461,92	282,56	536,66	242	466,60	284,73	541,01
362	434,55	260,89	496,22	362	439,65	268,78	511,36	362	450,23	274,87	522,38
média	446,89	269,67	512,25	média	450,88	275,53	524,40	média	457,99	279,64	530,71
365 dias				365 dias				365 dias			
-	-	-	-	112	449,46	270,83	518,90	122	443,89	266,38	506,26
242	455,62	269,96	516,82	242	460,34	277,01	529,21	242	465,96	280,78	535,99
362	435,87	257,27	493,41	362	438,01	263,57	503,03	362	446,47	268,78	512,77
média	445,75	263,62	505,12	média	449,27	270,47	517,05	média	452,11	271,98	518,34

m_s- massa seca em estufa

m_i- massa da amostra saturada imersa em água após fervura

m_{sat}- massa da amostra saturada em água após imersão e fervura

G) Secagem



H) Permeabilidade ao vapor

Argamassa				Peso	Argamassa				Peso	Argamassa				Peso
T (h)	A1	A2	A3	média (g)	T (h)	B1	B2	B3	média (g)	T (h)	C1	C2	C3	média (g)
0	723,05	740,35	742,01	735,14	0	677,70	804,63	734,26	738,86	0	774,27	718,03	717,67	736,66
24	724,17	741,42	743,08	736,22	24	678,85	805,76	735,38	740,00	24	775,39	719,19	718,84	737,81
48	725,00	742,27	743,91	737,06	48	679,74	806,55	736,17	740,82	48	776,22	720,05	719,65	738,64
72	725,87	743,14	744,74	737,92	72	680,67	807,39	737,05	741,70	72	777,03	720,95	720,54	739,51
96	726,73	744,01	745,61	738,78	96	681,56	808,26	737,90	742,57	96	777,87	721,83	721,46	740,39
168	729,00	746,26	747,84	741,03	168	683,89	810,44	740,11	744,81	168	780,05	724,18	723,73	742,65
192	729,56	746,81	748,43	741,60	192	684,44	810,96	740,61	745,34	192	780,63	724,78	724,32	743,24
216	730,62	747,23	748,88	742,24	216	684,92	811,43	741,08	745,81	216	781,07	725,25	724,80	743,71
240	730,47	747,68	749,35	742,50	240	685,39	811,91	741,51	746,27	240	781,51	725,70	725,23	744,15

I) Névoa salina-Durabilidade com ciclos de saturação e secagem

Ciclos	Peso (g)			Ciclos	Variação de massa (%)		
	A	B	C		A	B	C
0,00	348,83	358,07	350,96	0,00	0,000	0,000	0,000
1,00	351,80	364,37	358,29	1,00	0,851	1,758	2,090
2,00	349,56	357,97	351,83	2,00	0,210	-0,030	0,249
3,00	358,57	373,82	369,64	3,00	2,791	4,397	5,324
4,00	356,24	367,34	362,37	4,00	2,125	2,588	3,253
5,00	354,35	365,77	363,00	5,00	1,581	2,150	3,431
6,00	364,01	378,25	374,75	6,00	4,351	5,635	6,781
7,00	356,83	366,48	363,79	7,00	2,292	2,349	3,656
8,00	353,60	361,49	359,89	8,00	1,368	0,954	2,546
9,00	355,36	366,39	364,54	9,00	1,873	2,324	3,871
10,00	355,42	364,44	360,17	10,00	1,890	1,777	2,626
11,00	355,25	363,13	361,42	11,00	1,839	1,413	2,982
12,00	359,16	368,33	366,13	12,00	2,962	2,865	4,323
13,00	357,77	363,81	363,80	13,00	2,564	1,601	3,659
14,00	352,76	353,78	352,01	14,00	1,127	-1,199	0,301
15,00	355,62	359,90	360,12	15,00	1,947	0,511	2,610
16,00	361,84	366,39	368,41	16,00	3,730	2,322	4,972
17,00	357,25	357,87	360,22	17,00	2,414	-0,058	2,639
18,00	362,21	365,22	368,70	18,00	3,837	1,997	5,056
19,00	358,25	358,23	358,60	19,00	2,701	0,044	2,177
20,00	361,53	365,22	367,15	20,00	3,640	1,995	4,613
21,00	362,04	364,19	366,88	21,00	3,786	1,708	4,538
22,00	358,61	357,66	358,97	22,00	2,804	-0,115	2,283
23,00	355,84	352,51	352,80	23,00	2,011	-1,554	0,526