

# **Caracterização física, mecânica e térmica de argamassas coloridas à base de cal para revestimentos de paredes de edifícios antigos**

**Gabriela Karina Morais de Mello**

*Dissertação apresentada à Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia da Construção no âmbito da dupla diplomação com a Universidade Tecnológica Federal do Paraná*

Esta dissertação inclui as críticas feitas pelo Júri

**Bragança**  
**2019**

# **Caracterização física, mecânica e térmica de argamassas coloridas à base de cal para revestimentos de paredes de edifícios antigos**

**Gabriela Karina Morais de Mello**

*Dissertação apresentada à Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia da Construção no âmbito da dupla diplomação com a Universidade Tecnológica Federal do Paraná*

Orientado por

**Prof<sup>ª</sup>. Dra. Eduarda Luso**

**Eng<sup>ª</sup>. Silvia Maria Afonso Fernandes**

**Prof<sup>ª</sup>. Dra. Fabiana Goia Rosa de Oliveira**

Esta dissertação inclui as críticas feitas pelo Júri

**Bragança**

**2019**

*À minha família com amor, carinho e gratidão.*

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente e grandemente à Professora Doutora Eduarda Luso por toda a autonomia, confiança e incentivo concedidos na realização deste trabalho, além do auxílio prestado durante todas as etapas de sua execução.

À Engenheira Silvia Fernandes e Professora Doutora Fabiana Goia agradeço pelo acompanhamento, auxílio e opiniões sobre o trabalho e que contribuíram para o seu desenvolvimento.

Aos meus pais, em especial à minha mãe Cassia, agradeço imensamente por todo o esforço que fazem para que eu realize os meus sonhos. Vocês são meus amigos e maiores exemplos de persistência e caráter, além de serem minha fonte de força para superar todos os desafios que me deparo. Obrigada pelo amor, amizade, carinho, lições e paciência!

Ao meu irmão João Victor, agradeço por estar ao meu lado e sempre tornar as coisas descontraídas e fáceis de serem ultrapassadas.

Aos amigos do Brasil, e que sempre estarão no meu coração, agradeço por sempre se fazerem presentes mesmo com a distância. Aos que enfrentaram esta etapa fisicamente ao meu lado e que se tornaram uma família aqui, em especial Mariana e Milena, agradeço por todo o apoio, compreensão, companheirismo e momentos que tivemos e que tenho certeza que serão para sempre.

Não poderia deixar de agradecer aos técnicos e responsáveis de laboratório que sempre estiveram prontos a me ensinar e auxiliar na realização do programa experimental, são eles: Hermínia, Luísa, Sr. Otávio e Sr. João.

Agradeço também ao Instituto Politécnico de Bragança por me propiciar esta oportunidade de ser sua aluna e usufruir de todo o conhecimento através de sua estrutura e docentes excelentes, e à Universidade Tecnológica Federal do Paraná por todos os anos lá vividos de aprendizado e por sempre buscarem conceder aos seus alunos oportunidades de crescimento profissional e pessoal, como o Programa de Dupla Diplomação.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente na realização deste trabalho e superação desta etapa.

## RESUMO

Ao considerar a conservação e reabilitação do edificado, deve-se atentar para a escolha de materiais que prezem pela compatibilidade entre os elementos existentes e os que serão inseridos. Dessa forma, a utilização de argamassas de revestimento de cal aérea é a que se mostra mais indicada devido a sua larga utilização até o século XX, e, portanto, conseqüente maior correspondência em edifícios antigos. Com a finalidade de melhorar algumas propriedades destas argamassas, como a hidráulidade, era comum a incorporação de materiais como argilas, cinzas ou fragmentos cerâmicos na mistura. Neste sentido, e aliada a convergência com vertentes ambientais e econômicas que a utilização destas argamassas preconizam, visto que além da cal ser um ligante de menor impacto de produção, a incorporação do resíduo cerâmico na argamassa acaba por reduzir seu consumo e destinar de maneira mais viável material que seria descartado em aterros, nota-se seu potencial de utilização e conseqüente necessidade de estudo. A presente dissertação tem como objetivo principal analisar algumas características mecânicas, físicas e térmicas de três composições diferentes de argamassas a base de cal aérea em pasta no traço 1:2, com pigmento e pó de tijolo. As composições diferiram entre si na inclusão e/ou proporção do pó de tijolo em substituição da cal aérea, além das quantidades de pigmento e água. Após caracterização dos constituintes, realizou-se uma campanha experimental a diferentes tipos de corpos de prova e em diferentes idades, a fim de avaliar o desempenho das composições estudadas comparando-as entre si, à norma e resultados apresentados por outros autores. De forma geral, percebeu-se que a inclusão de pó de tijolo na formulação teve influência positiva nas propriedades estudadas, a qual foi mais expressiva nas características mecânicas das argamassas. Nem sempre essa melhoria ocorreu de forma proporcional ao maior percentual de pó de tijolo ou maior idade de cura. Dependendo da propriedade, constatou-se também, melhor desempenho em algum momento para composição sem pó de tijolo.

**Palavras-chave:** conservação; reabilitação; argamassas de revestimento; cal aérea; pó de tijolo; pigmento.

## ABSTRACT

Considering the conservation and rehabilitation of building, it should be noted for the choice of materials that value the compatibility between the old and new elements. Therefore, the utilization of air lime mortars is the most appropriated due to its large use until the XX century, and a consequently closer alignment with old buildings. Intended to enhance some properties about these type of lime, as the hydrological, it was used to incorporate materials as clays, ashes or ceramic fragments. In this regard, and associated with the environmental and economic aspects advocated by these mortars, since beyond the lime be a binder with a lower production impact, the incorporation of ceramic waste in mortar reduces binder consumption and allocates more efficiently material what would be disposed in landfills, realizes their potential use and consequently need to research. The present thesis has as the main objective to analyze some mechanical, physical and thermal characteristics of three mortars formulations with air lime putty in the ratio 1:2, pigment and dust brick. The mixtures differ from each other in the incorporation and/or dust brick proportions replacing the air lime, in addition to the amounts of pigment and water. After material characterization, was carried out an experimental campaign with different specimens and at different times, in order to evaluate the performance of the studied formulations comparing the results each other, standard and with data of other authors. In general, was realized that incorporate dust brick in the formulation had positive influence in the researched properties, that it was more significant in the mortars mechanical characteristics. This improvement didn't occur proportional to the highest percentual of dust brick or highest age. Depending on the property, was found eventually, better performance to the formulation without dust brick.

**Keywords:** conservation; rehabilitation; mortars; air lime; dust brick; pigment.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	15
1.1 OBJETIVOS E ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	17
<b>2 ARGAMASSAS COMO REVESTIMENTO DE PAREDES</b> .....	19
2.1 CONSERVAÇÃO E REABILITAÇÃO .....	24
2.2 ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO À BASE DE CAL AÉREA .....	28
<b>2.2.1 Histórico</b> .....	28
<b>2.2.2 Elementos constituintes</b> .....	32
<b>2.2.3 Técnicas de aplicação e preparação</b> .....	36
<b>2.2.4 Revisão de trabalhos experimentais</b> .....	37
<b>3 PROGRAMA EXPERIMENTAL</b> .....	39
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS .....	39
<b>3.1.1 Cal em pasta</b> .....	39
<b>3.1.2 Areia</b> .....	40
<b>3.1.3 Pó de tijolo</b> .....	42
<b>3.1.4 Pigmento</b> .....	43
3.2 FORMULAÇÕES DAS ARGAMASSAS .....	44
3.3 PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA .....	48
<b>3.3.1 Amassadura e moldagem</b> .....	48
<b>3.3.2 Cura</b> .....	56
3.4 ENSAIOS AOS CORPOS DE PROVA .....	57
<b>3.4.1 Resistência à flexão</b> .....	57
<b>3.4.2 Resistência à compressão</b> .....	58
<b>3.4.3 Massa volúmica aparente no estado endurecido</b> .....	59
<b>3.4.4 Retração</b> .....	60
<b>3.4.5 Absorção de água por capilaridade</b> .....	61
<b>3.4.6 Secagem</b> .....	62

<b>3.4.7 Condutibilidade térmica</b> .....	64
<b>3.4.8 Aderência</b> .....	66
<b>3.4.9 Absorção de água a baixa pressão</b> .....	67
<b>3.4.10 Análise da cor</b> .....	68
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	70
4.1 RESISTÊNCIA À FLEXÃO.....	70
4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	72
4.3 MASSA VOLÚMICA.....	74
4.4 RETRAÇÃO .....	76
4.5 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE.....	77
4.6 SECAGEM.....	82
4.7 CONDUTIBILIDADE TÉRMICA .....	84
4.8 ADERÊNCIA.....	86
4.9 ABSORÇÃO DE ÁGUA À BAIXA PRESSÃO .....	89
4.10 ANÁLISE DE COR .....	92
4.11 CLASSIFICAÇÃO DA ARGAMASSA – NORMA EN 998-1:2016.....	94
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	96
<b>6 REFERÊNCIAS</b> .....	99

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1 – Quantidade absoluta e percentual de edifícios por tipo de revestimento exterior utilizado em Portugal .....</b>	<b>20</b>
<b>Figura 2 – Proporção de edifícios concluídos por tipo de obra no período de 2012 a 2017 .....</b>	<b>25</b>
<b>Figura 3 – Cal em pasta utilizada .....</b>	<b>40</b>
<b>Figura 4 – Areia utilizada peneirada no peneiro de 1 mm .....</b>	<b>41</b>
<b>Figura 5 – Curva granulométrica da areia passada no peneiro de # 1 mm .....</b>	<b>41</b>
<b>Figura 6 – Pó de tijolo passado no peneiro 0,50 mm.....</b>	<b>42</b>
<b>Figura 7 – Curva granulométrica do pó de tijolo.....</b>	<b>43</b>
<b>Figura 8 – Pigmento óxido de ferro Málaga .....</b>	<b>44</b>
<b>Figura 9 – Realização do ensaio de consistência por <i>flow-table</i>. (a) Preenchimento de metade do cone metálico e compactação; (b) Preenchimento da outra metade do cone metálico, compactação e rasagem; (c) Retirada do cone metálico; (d) Realização das pancadas no equipamento; (e) Medição do diâmetro horizontal; (f) Medição do diâmetro vertical.....</b>	<b>46</b>
<b>Figura 10 – Amostras realizadas para afinar as composições .....</b>	<b>47</b>
<b>Figura 11 – Pesagem dos materiais em tabuleiros separados. (a) Cal em pasta; (b) Areia; (c) Pó de tijolo; (d) Pigmento; (e) Água.....</b>	<b>50</b>
<b>Figura 12 – Materiais secos misturados manualmente na cuba metálica .....</b>	<b>50</b>
<b>Figura 13 – Moldagem dos corpos de prova prismáticos de 40 x 40 x 160 mm. (a) Preenchimento de metade do volume dos moldes e compactação; (b) Preenchimento total do volume dos moldes e compactação; (c) Colocação da fôrma em bancada nivelada e superfícies expostas rasadas e lisas .....</b>	<b>52</b>
<b>Figura 14 – Moldagem dos corpos de prova prismáticos de 30 x 150 x 150 mm. (a) Fôrma posicionada no compactador vazia; (b) Preenchimento de metade do volume da fôrma e compactação; (c) Preenchimento total do volume da fôrma e compactação; (d) Colocação da fôrma em bancada nivelada e superfícies expostas rasadas e lisas.....</b>	<b>53</b>
<b>Figura 15 – Moldagem dos corpos de prova cilíndricos. (a) Preenchimento de metade do volume da fôrma; (b) Assentamento da argamassa com pilão e compactação; (c) Preenchimento de quase todo o volume da fôrma; (d) Assentamento da argamassa com pilão e compactação; (e) Preenchimento total da fôrma e compactação; (f) Rasagem do excesso de argamassa e colocação da chapa metálica; (g) Rotação do conjunto sobre</b>	

bancada nivelada; (h) Retirada do suporte e alisamento da superfície exposta; (i) Retirada da fôrma após dois dias e secagem final .....	54
Figura 16 – Moldagem dos corpos de prova em tijolo. (a) Equipamentos utilizados; (b) Preenchimento da face do tijolo com argamassa; (c) Marcação dos espaços do ensaio de aderência com o molde metálico; (d) Retirada do molde de madeira .....	56
Figura 17 – Disposição dos corpos de prova na câmara para cura. (a) Corpos de prova prismáticos de 40 x 40 x 160 mm; (b) Corpos de prova cilíndricos; (c) Corpos de prova prismáticos de 40 x 150 x 150 mm; (d) Corpos de prova aplicados em tijolo .....	57
Figura 18 – Realização do ensaio de resistência à flexão. (a) Marcação do meio e distância entre apoios; (b) Posicionamento na prensa hidráulica; (c) Rompimento do corpo de prova .....	58
Figura 19 – Realização do ensaio de resistência à compressão. (a) Corpos de prova de flexão rompidos ao meio; (b) Corpo de prova posicionado na prensa e realização do ensaio .....	59
Figura 20 – Realização do ensaio para determinação da massa volúmica. (a) Corpos de prova separados em tabuleiro; (b) Pesagem dos corpos de prova em balança digital; (c) Medição das três dimensões dos corpos de prova .....	60
Figura 21 – Realização do ensaio para determinação da retração. (a) Equipamentos utilizados; (b) Medição no centro do comprimento; (c) Medição no centro da largura; (d) Medição da altura em uma extremidade; (e) Medição da altura na outra extremidade.	61
Figura 22 – Realização do ensaio de absorção de água por capilaridade. (a) Corpos de prova tendo a base lixadas; (b) Marcação das alturas de 5 e 10 mm; (c) Aplicação do hidrófugo; (d) Colocação dos corpos de prova em estufa; (e) Aferição da massa dos corpos de prova secos; (f) Montagem da bandeja com os tubos de silicone e corpos de prova; (g) Colocação de água no recipiente; (h) Pesagem dos corpos de prova úmidos nos tempos determinados.....	62
Figura 23 – Realização do ensaio de secagem. (a) Colocação dos corpos de prova utilizados no ensaio de absorção após término do ensaio em um tabuleiro (b) Pesagem dos corpos de prova em tempos determinados .....	64
Figura 24 – Realização do ensaio de condutibilidade térmica. (a) Equipamento <i>Thermal Conductivity Test Tool <math>\lambda</math>-Meter EP500e</i> ; (b) Rebaixamento da placa superior até contato com o corpo de prova e início do ensaio; (c) Configuração do ensaio no <i>software</i> .....	65
Figura 25 - Realização do ensaio de aderência. (a) Corpos de prova separados e com superfície lixada; (b) Aplicação de cola e colagem da placa metálica; (c) Corpos de prova	

em bancada nivelada e com granito apoiado sobre as placas metálicas; (e) Corpo de prova posicionado no equipamento com grampos de fixação; (e) Corpo de prova com ensaio finalizado .....	67
Figura 26 – Realização do ensaio de absorção de água a baixa pressão. (a) Fixação do tubo Karsten no tijolo; (b) Tubos fixados e prontos para início do ensaio; (c) Tubos preenchidos com água e disparo do cronômetro.....	68
Figura 27 – Realização da análise de cor. (a) Foto dos corpos de prova; (b) Abertura da foto no Adobe PhotoShop; (c) Utilização da ferramenta “conta-gotas”; (d) Análise da cor utilizando a fita de cores do PhotoShop contida na “Color Libraries”.....	69
Figura 28 – Resistência à flexão média de todas as composições nas idades de 28, 90, 135 e 180 dias .....	71
Figura 29 – Resistência à compressão média de todas as composições nas idades de 28, 90, 135 e 180 dias .....	73
Figura 30 – Massa volúmica média de todas as composições nas idades de 28, 90, 135 e 180 dias .....	75
Figura 31 – Variação do volume médio nas idades de 28, 90, 135 e 180 dias .....	76
Figura 32 – Variação do coeficiente de absorção de água por capilaridade de todas as composições nas idades de 28, 90 e 135 dias.....	78
Figura 33 – Valores assintóticos de absorção médios de todas as composições nas idades de 28, 90 e 135 dias .....	79
Figura 34 – Variação do coeficiente de absorção de água por capilaridade considerando argamassa de renovação de todas as composições nas idades de 28, 90 e 135 dias .....	81
Figura 35 – Índice de secagem médio para as idades de 28, 90 e 135 dias.....	83
Figura 36 – Coeficiente de condutibilidade para a temperatura de 10°C nas idades de 28, 60 e 90 dias .....	85
Figura 37 – Coeficientes de condutibilidade para a temperatura de 20°C nas idades de 28, 60 e 90 dias .....	85
Figura 38 – Resistência ao arrancamento média para as idades de 28, 90 e 135 dias.....	87
Figura 39 – Corpos de prova das composições após rotura. (a) Composição 1; (b) Composição 2; (c) Composição 3 .....	89
Figura 40 – Curva de absorção de água a baixa pressão aos 28 dias .....	90
Figura 41 – Curva de absorção de água a baixa pressão aos 60 dias .....	91
Figura 42 – Fita de cores para os corpos de prova da Composição 1. (a) Aos 28 dias; (b) Aos 90 dias; (c) Aos 135 dias .....	92

<b>Figura 43 - Fita de cores para os corpos de prova da Composição 2. (a) Aos 28 dias; (b) Aos 90 dias; (c) Aos 135 dias .....</b>	<b>92</b>
<b>Figura 44 - Fita de cores para os corpos de prova da Composição 3. (a) Aos 28 dias; (b) Aos 90 dias; (c) Aos 135 dias .....</b>	<b>92</b>
<b>Figura 45 – Corpos de prova prismáticos rompidos à flexão. (a) Composição 1; (b) Composição 2; (c) Composição 3 .....</b>	<b>93</b>

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação funcional dos revestimentos exteriores de paredes .....	19
Quadro 2 - Classificação funcional dos revestimentos interiores de paredes .....	20
Quadro 3 – Definição das argamassas de revestimento a partir do conceito, modo de fabricação e propriedades e/ou utilizações.....	22
Quadro 4 – Classificação das propriedades das argamassas endurecidas.....	23
Quadro 5 – Tipos de obra de reabilitação.....	26
Quadro 6 – Valores estabelecidos para características mecânicas e de comportamento à água para argamassas aos 90 dias a serem aplicadas em edifícios antigos .....	27
Quadro 7 – Camadas de regularização e proteção dos revestimentos exteriores de edifícios antigos.....	30
Quadro 8 – Camadas de proteção, acabamento e decoração de edifícios antigos.....	31
Quadro 9 – Limites percentuais de pigmento (% pigmento/massa de cal).....	36
Quadro 10 – Características da cal em pasta .....	40
Quadro 11 – Baridade e volume de vazios da areia .....	42
Quadro 12 – Massas volúmicas da areia e absorção de água da areia.....	42
Quadro 13 – Quantidades de ligante e agregado para as composições 1, 2 e 3 (g).....	45
Quadro 14 - Ensaio prévios para definição ds quantidades de pigmento e água das composições.....	47
Quadro 15 – Quantidades de material utilizados por amassadura para cada tipo de corpo de prova .....	49
Quadro 16 – Dados inseridos no software para configurar o ensaio.....	65
Quadro 17 – Média aritmética de três corpos de prova e desvios padrão dos valores de resistência à flexão de cada composição .....	70
Quadro 18 - Média aritmética de seis corpos de prova e desvios padrão dos valores de resistência à compressão de cada composição .....	72
Quadro 19 – Média aritmética de seis corpos de prova e desvios padrão dos resultados de massa volúmica de cada composição .....	74
Quadro 20 – Média aritmética de seis corpos de prova e desvios padrão do volume de cada composição .....	76
Quadro 21 – Coeficientes de absorção de água por capilaridade .....	78
Quadro 22 – Média aritmética de três corpos de prova e desvios padrão dos valores assintóticos de absorção de água por capilaridade.....	78

<b>Quadro 23 - Coeficiente de absorção considerando procedimento de cálculo para argamassas de renovação.....</b>	<b>81</b>
<b>Quadro 24 – Média aritmética de três corpos de prova e desvios padrão dos valores de índice de secagem de cada composição.....</b>	<b>82</b>
<b>Quadro 25 – Média aritmética de três corpos de prova e desvios padrão dos coeficientes de condutibilidade térmica para a temperatura de 10° de cada composição .....</b>	<b>84</b>
<b>Quadro 26 – Média aritmética de três corpos de prova e desvios padrão dos coeficientes de condutibilidade térmica para a temperatura de 20° de cada composição .....</b>	<b>84</b>
<b>Quadro 27 – Média aritmética de seis corpos de prova e desvios padrão dos valores de resistência ao arrancamento de cada composição .....</b>	<b>87</b>
<b>Quadro 28 – Média aritmética de seis corpos de prova e desvios padrão da quantidade de água absorvida de cada composição .....</b>	<b>89</b>
<b>Quadro 29 – Coeficientes de absorção do período de 1 hora .....</b>	<b>90</b>
<b>Quadro 30 – Classificação das argamassas estudadas segundo a norma EN 998-1 (European Committee for Standardization, 2016).....</b>	<b>94</b>
<b>Quadro 31 – Verificação dos requisitos da norma EN 998-1 (European Committee Standardization, 2016).....</b>	<b>95</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As argamassas de cal aérea foram usadas nos edifícios antigos até pelo menos as primeiras décadas do século XX. Vários autores apontam sua utilização nas mais diversas partes do mundo desde épocas muito antigas, como 10 mil a 500 anos a.C (R. Veiga, 2017). Entretanto, a partir do século XIX, com a descoberta do cimento, as argamassas de cal perderam gradativamente seu espaço para este, caindo em desuso a partir da década de 70. A hidraulicidade do cimento, além de sua cura e aquisição rápida de resistência, foram provavelmente os fatores que impulsionaram sua utilização (Margalha, 2011).

A conservação e reabilitação de edifícios antigos preza por elevada atenção na escolha dos materiais a serem utilizados em intervenções, sendo essencial a compatibilidade entre a argamassa de reparação e os elementos adjacentes (Ergenç & Fort, 2018). A utilização de argamassas de cimento não se mostra a mais adequada neste caso, uma vez que a rigidez elevada, o alto teor de sais solúveis, a baixa permeabilidade à água e a fraca reversibilidade a torna incompatível mecânica, física e quimicamente ao suporte (Vargas, 2013). As argamassas de cal aérea por outro lado, se mostram as mais indicadas tecnicamente por muitos estudos para intervenções em edifícios antigos (R. Veiga, 2017). Além de apresentarem maior compatibilidade à construção existente, este tipo de argamassa propicia também uma convergência das vertentes ambientais e econômicas, uma vez que demandam menos recursos em seu processo de produção (Vargas, 2013).

Com intuito de melhorar algumas propriedades das argamassas de cal aérea, adições de materiais como argilas e cinzas tratadas termicamente são usadas desde os tempos mais antigos (Matias, Faria & Torres, 2014a). Os resíduos cerâmicos foram muito utilizados desde o império romano, sendo possível encontrar até hoje exemplos de construções antigas com incorporação destes materiais. A adição era realizada de dois modos de acordo com a granulometria do material: visando efeito pozolânico ao reagir com o ligante se pó e partículas mais finas ou substituindo parcialmente o agregado se composto por fragmentos mais grossos (Torres & Matias, 2016). No passado, os materiais cerâmicos quando incluídos nas argamassas, conferiam melhores características hidráulicas (Matias, Faria & Torres, 2014b). Em estudos realizados recentemente, percebeu-se que a inclusão de materiais, como o pó de tijolo, proporcionou às argamassas além de bom comportamento à água, melhores resistências mecânicas. Além disso, a utilização destes confere benefícios ambientais e econômicos, visto que destina, de modo mais viável, elevados percentuais de resíduos gerados nas atividades fabris do ramo que seriam

descartados em aterros e reduz a quantidade de ligante ou agregado da argamassa (Matias, Faria & Torres, 2014a).

Desta forma, considerando a importância da escolha e utilização de materiais com maior compatibilidade aos edifícios antigos em ações de intervenção, além da disponibilidade e vantagens da inclusão de resíduos cerâmicos como o pó de tijolo na produção de argamassas, este trabalho tem como objetivo a confecção e avaliação do desempenho de diferentes composições de argamassas a base de cal aérea no traço 1:2, com pigmento e pó de tijolo.

## 1.1 OBJETIVOS E ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação tem como objetivo principal a caracterização experimental de propriedades físicas, mecânicas e térmicas de argamassas coloridas de revestimento à base de cal aérea em pasta e areia, ao traço volumétrico 1:2, considerando os efeitos da substituição em massa da cal por pó de tijolo, em diferentes idades e mesma condição padrão de cura. Os objetivos específicos do trabalho são:

- Caracterizar os materiais que constituirão as composições estudadas no presente trabalho, através da consulta a fichas técnicas e/ou ensaios experimentais;
- Desenvolver três composições diferentes de argamassa colorida de revestimento à base de cal aérea em pasta, com mesmo traço volumétrico de 1:2, substituindo percentuais de massa da cal por pó de tijolo;
- Realizar ensaios em diferentes corpos de prova com mesma condição padrão de cura e em diferentes idades;
- Comparar os resultados obtidos com os requisitos necessários para argamassas de revestimento, com foco no uso em edifícios antigos, e identificando as potencialidades de cada composição.

A dissertação está dividida em seis capítulos, referências e anexos. No primeiro capítulo, faz-se uma breve introdução e enquadramento do tema, além de apresentar-se os objetivos do trabalho e estruturação da dissertação.

No segundo capítulo são expostas definições e conteúdos relativos ao tema deste trabalho, necessários para sua compreensão e análises futuras. Apresenta-se primeiramente sobre as argamassas de revestimento exterior e sua importância na conservação de edifícios antigos. Posteriormente, é explicitada mais detalhadamente a utilização das argamassas à base de cal aérea, expondo-se seu histórico, composição e técnicas de preparo e aplicação. Encerra-se o capítulo com o estado do conhecimento sobre argamassas de composição similares, sintetizando os principais resultados obtidos por outros autores.

O terceiro capítulo consiste no programa experimental. Para maior entendimento, apresenta-se primeiramente a caracterização dos materiais utilizados nas argamassas em estudo, disponibilizando-se valores obtidos através de fichas técnicas e/ou ensaios. Posteriormente, explica-se a formulação das argamassas, expondo-se as quantidades utilizadas de cada material

e os métodos utilizados para determinar-se as mesmas. Após isso, apresenta-se a produção dos corpos de prova, explicitando-se a amassadura da argamassa, os tipos de moldagem realizados e a cura utilizada. Por fim, apresentam-se as metodologias dos ensaios realizados aos corpos de prova nas idades estudadas.

No quarto capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados aos corpos de prova em forma de tabelas e gráficos. Além disso, expõe-se análises realizadas avaliando a variação do tempo e das quantidades de materiais nas composições estudadas, comparando-os por fim com valores indicados por autores como indicados. Finalmente, o quinto capítulo sintetiza as conclusões obtidas com a análise de resultados, além de apresentar as propostas de trabalhos futuros sobre o tema, e o sexto lista as referências utilizadas.

## 2 ARGAMASSAS COMO REVESTIMENTO DE PAREDES

Os revestimentos são aplicados sobre superfícies horizontais ou verticais a fim de protegê-las e lhe conferirem acabamento (Zulian, Doná & Vargas, 2002). Nas paredes, independentemente de serem utilizados no interior ou exterior das edificações, os revestimentos assumem basicamente duas funções: proteção e estética. Ao mesmo passo que protegem o edifício dos agentes climáticos e que acaba por ser uma camada sacrificada ao longo do tempo, devendo assim ser alvo de manutenção sempre que necessário a fim de preservar suas características protetivas, são também responsáveis pela caracterização visual do edificado, o que muitas vezes é alcançado com a utilização de azulejos ou argamassas coloridas (Carvalho, 2011). Segundo Trigo (2014), como a função de proteção dos revestimentos contribui para que o edifício satisfaça a necessidade dos seus utilizadores, sua aplicação deve ser pautada em especificações nacionais a fim de cumprir exigências que assegurem seu melhor desempenho.

Geralmente, os revestimentos são classificados por sua função principal que pode ser estanqueidade, impermeabilização, isolamento térmico, acabamento ou decoração, e que varia para revestimentos interiores e exteriores (Trigo, 2014). A partir disso, o LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil) elaborou quadros que apresentam os tipos de revestimentos exteriores (Quadro 1) e interiores (Quadro 2) utilizados em Portugal e que são apresentados a seguir.

**Quadro 1 – Classificação funcional dos revestimentos exteriores de paredes**

<b>Classificação funcional</b>	<b>Principais tipos de revestimentos exteriores usados em Portugal</b>
Revestimentos de estanqueidade	Placas de pedra natural fixadas mecanicamente ao suporte, com lâmina de ar
	Placas de outros materiais, fixadas mecanicamente ao suporte, com lâmina de ar
	Revestimentos de ligante sintético armados
Revestimentos de impermeabilização	Rebocos tradicionais
	Rebocos pré-doseados
	Revestimentos de ligante misto (cimento e resina)
	Revestimentos de ligante sintético
Revestimentos de isolamento térmico	Revestimentos por elementos descontínuos independentes com isolante na caixa-de-ar
	Revestimentos por componentes isolantes
	Revestimentos aplicados sobre isolante (ETICS)
Revestimentos de acabamento	Revestimentos por elementos descontínuos colados ou fixados mecanicamente sem lâmina de ar (ladrilhos, azulejos)
	Revestimentos por pintura

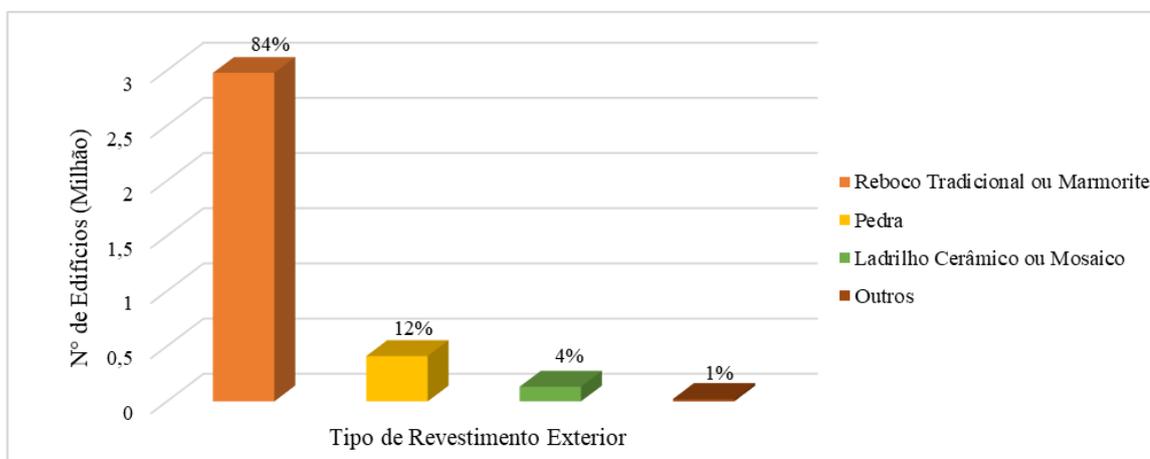
Fonte: Trigo (2014).

**Quadro 2 - Classificação funcional dos revestimentos interiores de paredes**

Classificação funcional	Principais tipos de revestimentos interiores usados em Portugal
Revestimentos de regularização	Rebocos tradicionais
	Rebocos pré-doseados
	Revestimento de ligante misto
	Estuques tradicionais de gesso e cal
	Estuques pré-doseados de gesso
	Estuques pré-doseados sintéticos
Revestimentos de acabamento	Estuques tradicionais de gesso e cal
	Estuques pré-doseados de gesso
	Estuques pré-doseados sintéticos
Revestimentos resistentes à água	Revestimentos cerâmicos colados
	Revestimentos de pedra natural colados
	Revestimentos de pedra artificial colados
	Revestimentos epóxicos
	Revestimentos de ligante sintético (esmalte e vernizes)
Revestimentos decorativos	Revestimentos em rolo (de papel, plásticos, têxteis e de cortiça)
	Revestimentos de placas de aglomerado de cortiça expandida
	Revestimentos por pintura

Fonte: Flores-Colen et al (n.d).

No caso dos revestimentos exteriores, Carreira (2013) afirma que os tipos mais utilizados nos edifícios em Portugal são: reboco tradicional, concreto à vista, ladrilhos e pedras. Tal afirmação se confirma através do resultado do censo realizado em 2011 (Instituto Nacional de Estatística, 2012), no qual pôde-se perceber que dentre 3.544.389 edifícios analisados, o tipo de revestimento exterior mais utilizado é o reboco tradicional ou marmorite, seguido pelos revestimentos do tipo pedra, ladrilhos cerâmicos ou mosaicos e outros (Figura 1).



**Figura 1 – Quantidade absoluta e percentual de edifícios por tipo de revestimento exterior utilizado em Portugal**

Fonte: Adaptado de INE (2012).

O reboco tradicional consiste em um revestimento espesso executado com argamassas de revestimento doseadas e fabricadas em obra, com ligante que pode ser tanto o cimento, cal ou a mistura de ambos (Flores-Colen et al., n.d.). Já os rebocos não tradicionais, são aqueles onde as argamassas utilizadas não são confeccionadas na obra e sim são pré-doseadas e feitas em fábrica, apresentando em sua composição um maior número de elementos e geralmente melhor desempenho. A execução do reboco tradicional consiste na aplicação de duas ou três camadas de argamassa, com diferentes dosagens, que visam a obtenção de um revestimento final mais resistente. A formulação de uma argamassa que apresente sozinha boa aderência, bom comportamento à água e à fendilhação é muito difícil, portanto, as camadas são utilizadas de forma a se complementarem. Entretanto, no reboco não-tradicional como as argamassas pré-doseadas apresentam alto nível de desempenho, é possível e conhecida sua realização como camada única (Carreira, 2013).

A maior utilização dos rebocos tradicionais justifica-se devido ao menor custo inicial quando comparado a outras soluções, aliado à menor complexidade técnica exigida na aplicação e maior facilidade de obtenção das matérias primas. Sua utilização é percebida desde a Antiguidade Clássica, tendo os materiais empregados variado desde então, acompanhando os avanços tecnológicos e descobertas vivenciadas em cada época (Carreira, 2013). Apesar disso, até a invenção do concreto armado, em toda Europa havia características comuns como a utilização de materiais mais porosos e deformáveis do que os usados atualmente (M.R. Veiga, 2009).

A composição geral das argamassas de revestimento é a de uma mistura realizada entre um ou mais ligantes, orgânicos ou inorgânicos, com agregados, cargas, água e adições ou adjuvantes. Sua função é servir de revestimento para elementos verticais da edificação (paredes, muros), através da sua utilização em rebocos, sendo possível sobre as mesmas a existência de pintura ou revestimentos cerâmicos (Trigo, 2014). Os ligantes utilizados em sua formulação são os materiais com capacidades aglutinantes, como a cal e cimento, que com o passar do tempo contribuem com o endurecimento da argamassa. Os agregados, por sua vez, são materiais particulados, como a areia, cujas propriedades afetam as características da argamassa visto que funcionam como o esqueleto da mesma, desenvolvendo a coesão entre suas partículas e o ligante. As adições ou pozolanas são materiais que reagem quando combinados aos ligantes e conferem efeitos benéficos a certas propriedades da argamassa permanentemente. Já os adjuvantes também são responsáveis por beneficiar a argamassa, entretanto, seu efeito a longo prazo pode diminuir ou deixar de existir (Margalha, 2011). Por fim, a água é a responsável por

potencializar o envolvimento do agregado e demais materiais pelo ligante, além de contribuir com o amadurecimento da argamassa e de sua quantidade determinar a maior ou menor trabalhabilidade da mesma (Vargas, 2013).

A utilização das argamassas de revestimento, exterior ou interior, é regulamentada pela norma EN 998-1 (European Committee for Standardization, 2016). Segundo esta, as argamassas de revestimento podem ser definidas a partir de diferentes aspectos que são apresentados no Quadro 3.

**Quadro 3 – Definição das argamassas de revestimento a partir do conceito, modo de fabricação e propriedades e/ou utilizações**

Definição	Tipos	Explicação
Conceito	Argamassa projetada	Argamassa cuja composição e método de fabricação são escolhidos pelo produtor a fim de se obter propriedades especificadas (conceito de desempenho)
	Argamassa prescrita	Argamassa feita em proporções pré-determinadas, cujas propriedades são assumidas a partir do proporção dos constituintes (conceito de receita)
Modo de fabricação	Fabricadas	Argamassa doseada e misturada em uma fábrica. Pode ser "argamassa seca", pronta para ser misturada com adição de água, ou "argamassa molhada" que é fornecida pronta para o uso
	Semi-fabricadas pré-doseadas	Argamassa cujos componentes são doseados e misturados na fábrica, mas que os outros componentes como alguns aditivos são adicionados no canteiro de obras segundo especificações e fornecimento do fabricante
	Semi-fabricadas pré-misturadas	Argamassa cujos componentes são doseados e misturados na fábrica, mas que os outros componentes como alguns aditivos são adicionados no canteiro de obras segundo especificações e fornecimento do fabricante
	In loco	Argamassa cujos constituintes são doseados e misturados no canteiro de obras

(continua)

(continuação)

<b>Definição</b>	<b>Tipos</b>	<b>Explicação</b>
Propriedades e/ou utilizações	Fins gerais (GP)	Argamassa sem características especiais
	Leve (LW)	Argamassa projetada para obter massa volúmica seca abaixo de um valor prescrito
	Colorida (CR)	Argamassa com pigmentação
	Camada única (OC)	Argamassa projetada para cumprir todas as funções de um sistema multicamada em apenas uma, e que geralmente é pigmentada
	Renovação (R)	Argamassa usada em paredes de alvenaria úmida que contenham ou possam conter sais solúveis em água
	Isolamento térmico (T)	Argamassa projetada com propriedades isolantes específicas

Fonte: Adaptado de European Committee for Standardization (2016).

Do ponto de vista das propriedades e utilizações, a norma EN 998-1 (European Committee for Standardization, 2016) apresenta uma outra categorização para as argamassas de revestimento, de acordo com seus valores de resistência à compressão, coeficiente de absorção capilar e coeficiente de condutibilidade térmica, no estado endurecido e com idade de cura a partir de 28 dias. Esta classificação é apresentada no Quadro 4.

**Quadro 4 – Classificação das propriedades das argamassas endurecidas**

<b>Propriedades</b>	<b>Categorias</b>	<b>Valores</b>
Gama de resistências à compressão após 28 dias	CS I	0,4 a 2,5 N/mm <sup>2</sup>
	CS II	1,5 a 5,0 N/mm <sup>2</sup>
	CS III	3,5 a 7,5 N/mm <sup>2</sup>
	CS IV	≥ 6 N/mm <sup>2</sup>
Absorção de água por capilaridade	W0	Não especificado
	W1	CC ≤ 0,40 kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> )
	W2	CC ≤ 0,20 kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> )
Condutibilidade térmica	T1	≤ 0,10 W/(m.K)
	T2	≤ 0,20 W/(m.K)

Fonte: Adaptado de European Committee for Standardization (2016).

A classificação anterior é realizada a fim de analisar o cumprimento dos requisitos definidos e apresentados na Tabela 2 da norma para cada utilização (GP, LW, CR, OC, R e T), de modo a concluir sobre a aptidão da argamassa para o uso que se deseja. Além dos requisitos, a mesma tabela apresenta as normas com metodologias de ensaio ou a que se deve consultar para obtenção de algum valor (European Committee for Standardization, 2016).

A composição das argamassas de revestimento variou muito ao passar do tempo. Inicialmente, as argamassas eram uma mistura de materiais vegetais e terra crua, porém, com a descoberta do fogo e os efeitos benéficos do calor às características aglutinantes dos materiais calcários, as mesmas evoluíram para uma mistura de cal aérea, areia e água. O uso das argamassas de revestimento com cal iniciou-se na Europa com os gregos, atingindo desempenho máximo de aplicação e qualidade no império romano. Com a revolução industrial o conceito de hidráulidade começou a ganhar força, e então materiais como a cal hidráulica, e posteriormente o cimento, substituíram gradualmente a cal aérea, até que os rebocos passaram a ser realizados imperativamente com argamassas de cimento (M.R. Veiga, 2009; Carreira, 2013).

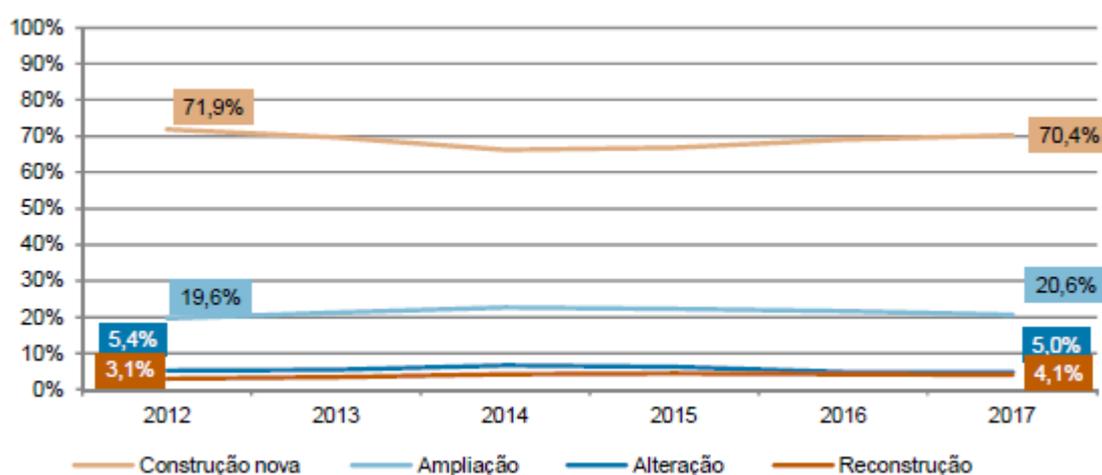
Os revestimentos são partes integrantes do patrimônio e transmitem muitas informações que não devem ser apagadas (Margalha, 2011). Sendo assim, para a definição de uma solução de intervenção adequada é fundamental o conhecimento de suas funções, mas também de todo seu mecanismo de desempenho, além de respeitar os critérios científicos (Carreira, 2013).

## 2.1 CONSERVAÇÃO E REABILITAÇÃO

A conservação do patrimônio e reabilitação urbana são setores futuros da construção civil em toda a Europa (Vargas, 2013). Entre os anos de 2001 e 2011, existiam em Portugal cerca de 1 milhão de edifícios com necessidade de intervenção. Quantitativamente a maior necessidade era de pequenas e médias reparações, entretanto, os edifícios muito degradados e com deficiência habitacional eram provavelmente os grandes desafios a serem enfrentados (Vilhena, 2013).

Entre os anos de 2001 e 2011 houveram três modificações conjunturais que foram propícias à reabilitação, são elas: iniciativas legislativas no âmbito do arrendamento urbano e regime jurídico da reabilitação, a crise financeira que dificultou o acesso ao crédito para aquisição da habitação e financiamento, além da entrada de novas soluções de gestão e promoção das intervenções de reabilitações (Vilhena, 2013). Surge neste momento a Lei nº 32/2012 de 14 de agosto a fim de aprovar medidas que agilizassem e dinamizassem a reabilitação urbana no país, determinando então a responsabilidade das Câmaras Municipais no desenvolvimento de estratégias de reabilitação, considerando-a uma componente indispensável das políticas das cidades e habitacional uma vez que nela convergem os objetivos de requalificação e revitalização dos municípios (Vargas, 2013).

Segundo o Instituto Nacional de Estatística (INE) (2018) entre os anos de 2012 e 2017, as obras de construções novas continuaram a ser predominantes, representando 70,4% das obras concluídas em 2017. Entretanto, avaliando-se a variação da expressão desse tipo de obra entre estes dois anos, percebeu-se que perdeu importância relativa. No ano de 2012 representou 71,9% do total, mas após este ano sofreu um decréscimo constante até chegar em seu valor mais baixo do período, que foi no ano de 2014 apresentando o percentual de 66,2%. A partir de 2014 voltou a ascender, atingindo em 2017 a representatividade já apresentada anteriormente (70,4% do total das obras concluídas), percentual inferior ao de 2012. Já as obras de reabilitação mesmo que tenham reduzido em números absolutos entre 2012 e 2017 (menos 2073 edifícios concluídos), apresentaram um aumento em seu peso relativo devido à redução de edifícios concluídos em construções novas, passando de 28,1% em 2012 a 29,6% em 2017. A Figura 2 apresenta essa variação de comportamento no período analisado.



**Figura 2 – Proporção de edifícios concluídos por tipo de obra no período de 2012 a 2017**

Fonte: INE (2018).

Por todo o período de 2012 a 2017, as obras de ampliação foram predominantes, concentrando em 2017, 69,6% do total de obras de reabilitação (INE, 2018). O Quadro 5 apresenta o comportamento dos tipos de obra de reabilitação no período analisado.

**Quadro 5 – Tipos de obra de reabilitação**

Ano	Alteração				Ampliação				Reconstrução			
	Total	% <sup>(1)</sup>	Habitação Familiar	% <sup>(2)</sup>	Total	% <sup>(1)</sup>	Habitação Familiar	% <sup>(2)</sup>	Total	% <sup>(1)</sup>	Habitação Familiar	% <sup>(2)</sup>
2012	1196	19,2	749	62,6	4349	69,9	2906	66,8	679	10,9	511	75,3
2013	885	18,0	568	64,6	3477	70,7	2235	64,3	559	11,4	417	74,6
2014	861	19,7	456	53,0	2957	67,5	1680	56,8	560	12,8	381	68,0
2015	724	19,3	405	55,9	2534	67,4	1477	58,3	502	13,4	348	69,3
2016 <sup>(3)</sup>	626	15,7	400	63,9	2793	70,2	1668	59,7	559	14,1	458	81,9
2017 <sup>(3)</sup>	696	16,7	475	68,1	2902	69,6	1832	63,1	571	13,7	458	80,2

**Notas:**

(1) Peso do tipo de obra no total de obras de reabilitação.

(2) Peso do destino habitação familiar no total do tipo de obra.

(3) Informação de 2016 e 2017 com base nas Estimativas de Obras Concluídas.

Fonte: Adaptado de INE (2018).

Por ser um setor com pretensão de crescimento, as empresas que realizam serviços de reabilitação devem ser cada vez mais especializadas e apresentar mão-de-obra qualificada, sendo interessante um controle deste aperfeiçoamento e qualidade em legislação (Vilhena, 2013). A introdução de materiais e utilização de técnicas de intervenção a realizar no patrimônio antigo, vai além da compatibilidade estética e por isso deve ser realizado de forma adequada (Vargas, 2013).

Conservação pode ser definida como o conjunto de ações destinadas a prolongar a vida útil de uma edificação e reabilitação como o conjunto de operações destinado a melhorar a qualidade da edificação, tornando contemporânea suas exigências funcionais (Vargas, 2013). Segundo Carreira (2013), existem quatro tipos de intervenções a serem realizadas em argamassas de revestimento de edifícios antigos: conservação, consolidação, reparação pontual/localizada e substituição parcial ou total.

Numa intervenção sobre edifício antigo, a primeira opção sempre deve ser a conservação dos elementos existentes através de estratégias preventivas ou planos de manutenção, e quando necessário a reparação pontual ou utilização de técnicas de consolidação. Quando a conservação é inviável do ponto de vista técnico e econômico, deve-se recorrer a substituições parciais ou totais dos revestimentos. Nestes casos, as argamassas utilizadas devem ser formuladas o mais similar possível às pré-existentes, uma vez que a incompatibilidade pode acarretar o aceleramento da degradação (Santos & Veiga, 2012). O modelo de funcionamento das paredes antigas admitia a entrada de água para o interior da alvenaria ao mesmo tempo que permitia a rápida saída para o exterior, ou seja, a ascensão capilar da água através das fundações fazia parte do funcionamento da parede. Portanto, a utilização de argamassas com características diferentes e que não reajam da mesma maneira a este conceito, como as de

cimento, prejudica a integridade da parede (Vargas, 2013). A partir da compatibilidade dos materiais a serem utilizados com os pré-existentes, apresenta-se um conjunto de requisitos que as argamassas a serem aplicadas em edifícios antigos devem seguir (Santos & Veiga, 2012).

- Não contribuir para degradar os elementos pré-existentes (alvenaria existente);
- Ter capacidade de proteger as paredes;
- Apresentar durabilidade para si e o conjunto;
- Apresentar reversibilidade ou propiciar reparações;
- Não prejudicar a caracterização estética do edifício.

Para o cumprimento destes requisitos é necessário considerar a compatibilidade sob os aspectos mecânico, físico e químico (Carreira, 2013). Do ponto de vista mecânico, a argamassa deve apresentar uma razoável resistência mecânica que seja inferior à do suporte, possuir aderência suficiente ao suporte para ser durável ao mesmo tempo que em caso de extração não o afete, ter módulo de elasticidade pouco elevado e reduzida suscetibilidade à fendilhação. Em relação ao aspecto físico, as argamassas devem apresentar um bom comportamento à água, oferecendo alguma resistência à penetração da mesma ao suporte aliado a não dificultar sua secagem, além de possuir um razoável desempenho térmico. Já para a compatibilidade química, exige-se da argamassa um bom comportamento ao gelo e aos sais solúveis existentes no suporte, de forma a não impulsionar a cristalização dos sais e o consequente surgimento de anomalias (Santos & Veiga, 2012). A partir destas considerações apresentam-se valores indicativos a serem respeitados para algumas das propriedades anteriores (Quadro 6).

**Quadro 6 – Valores estabelecidos para características mecânicas e de comportamento à água para argamassas aos 90 dias a serem aplicadas em edifícios antigos**

Argamassa	Características Mecânicas (MPa)		Aderência (MPa)	Comportamento à água
	Resistência à tração (Rt)	Resistência à compressão - Rc		C (kg/m <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> )
Reboco exterior	0,20 – 0,70	0,40 – 2,50	0,1 – 0,3 ou rotura coesiva pelo reboco	1 – 1,5
Reboco interior	0,20 – 0,70	0,40 – 2,50	0,1 – 0,3 ou rotura coesiva pelo reboco	-
Juntas	0,40 – 0,80	0,60 – 3,0	0,1 – 0,5 ou rotura coesiva pela junta	1 – 1,5

Fonte: Adaptado de Santos e Veiga (2012).

Para edifícios de elevado valor cultural, as exigências são ainda mais rigorosas, havendo outras a serem seguidas, visando além da durabilidade a preservação histórica em termos de materiais e estética (Santos & Veiga, 2012). Mesmo assim, as soluções utilizadas são as mais variadas, sendo utilizadas: argamassas de cimento, argamassas de cal hidráulica, argamassas de cal aérea e cimento ou argamassas de cal aérea (Carreira, 2013), além de argamassas prontas disponíveis comercialmente. Entretanto, muitos estudos apresentam as argamassas de cal aérea como a mais adequada a ser aplicada em edifícios antigos uma vez que asseguram a proteção e conservação do suporte, sendo portanto a mais compatível (Santos & Veiga, 2012).

## 2.2 ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO À BASE DE CAL AÉREA

As argamassas à base de cal aérea, com o nome indica, apresentam como ligante principal a cal aérea, que é um material que necessita do contato com o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) presente na atmosfera para endurecer, processo conhecido como carbonatação (Vargas, 2013). A carbonatação é um processo lento que sofre a influência de fatores como temperatura e umidade relativa, além de afetar a durabilidade da argamassa de revestimento (Ergenç & Fort, 2018). Portanto, a utilização de argamassas de revestimento à base de cal aérea envolve o conhecimento de suas particularidades e comportamento, de forma a serem aplicadas da maneira mais eficiente e de acrescentar adições que as potencializem (Arizzi & Cultrone, 2012).

A maior utilização das argamassas de cal aérea nas edificações antigas da Europa decorreu da grande utilização dada a este material pelos romanos e também da sua grande durabilidade e capacidade de sobrevivência até os dias atuais (M.R. Veiga, 2009). Apesar de tantos estudos e evidências de que as argamassas de cal aérea são as mais indicadas a serem utilizadas em edifícios antigos, por suas compatibilidades estéticas e funcionais, o seu uso ainda é raro em intervenções de reabilitação e conservação (R. Veiga, 2017). Por desconhecimento das técnicas de trabalho com a cal, os construtores optam pelo erro de utilizar as técnicas que melhor conhecem mesmo que não sejam as mais adequadas, como o uso do cimento (Vargas, 2013).

### 2.2.1 Histórico

A arquitetura monumental e a ideia de construir obras com grande durabilidade deu o impulso para que os gregos buscassem novas técnicas e materiais, tornando-os os primeiros a utilizar a cal aérea em revestimentos (Margalha, 2011). Depois deles, os etruscos passaram a utilizá-la também, principalmente em cisternas e túmulos. Entretanto, com os romanos esta argamassa atingiu seu apogeu como revestimento, tendo sua aplicação e durabilidade aprimorada, além de ser utilizada largamente por todo o império. A documentação escrita mais antiga da qual se tem registro data desta época, sendo destaque os livros de Vitruvius (M.R. Veiga, 2009). Os romanos não conheciam as composições químicas e mineralógicas dos elementos utilizados, mas suas argamassas apresentaram ótimos comportamentos perdurando durante séculos (Margalha, 2011). Após o Império Romano, seguiu-se um período da história no qual não se observou continuadores brilhantes, sendo muito das técnicas e conhecimentos perdidos (Margalha, 2011). Os árabes também foram exemplos da utilização da cal em revestimentos, sendo possível encontrar em Portugal vestígios bem conservados que datam da ocupação mulçumana vivenciada no país por cinco séculos, como a Muralha de Tavira e Igreja Matriz de Mértola (Margalha, 2011; M.R. Veiga, 2009). Além das evidências deixadas pelos árabes, quase todo o patrimônio edificado em Portugal foi construído utilizando técnicas de cal que conferiram ao revestimento particular beleza (Margalha, 2011). Até a primeira metade do século XX a cal ainda predominava nos revestimentos nacionais, ocorrendo a generalização do cimento Portland apenas na década de 50 do mesmo século (M.R. Veiga, 2009).

As argamassas de cal presentes em edifícios antigos apresentam diversas proporções e materiais utilizados (R. Veiga, 2017). A utilização da cal como ligante único implicava na confecção de um reboco multicamada, obtido a partir de várias subcamadas com funções específicas, e cujo a composição variava com os materiais de suporte (M.R. Veiga, 2009). Traços ricos e pobres em ligantes eram utilizados, sendo sua determinação realizada empiricamente e pautada no material e suporte utilizado, finalidade e buscando acima de tudo obter a máxima compacidade entre a cal e areia. A eficiência era obtida utilizando-se cals muito finas e areias bem graduadas com partículas pouco angulosas (M. R. Veiga, 2009; R. Veiga, 2017).

Um dos conjuntos de subcamadas, conhecido como camadas de regularização e proteção, era composto por emboço, reboco e esboço. Este grupo devia apresentar uma espessura total entre 15 e 30 mm, porém, atualmente valores superiores são encontrados devido ao nível de irregularidade das paredes. Quando o desnivelamento das mesmas era demasiado, executavam-se camadas de encasque com fragmentos de tijolo, pedra ou grandes agregados

antes das camadas de argamassa (M.R. Veiga, 2009). O Quadro 7 apresenta um resumo sobre as camadas de regularização e proteção.

**Quadro 7 – Camadas de regularização e proteção dos revestimentos exteriores de edifícios antigos**

<b>Subcamada</b>	<b>Função</b>	<b>Constituição</b>	<b>Execução</b>
Emboço	Proteger o suporte, garantir aderência para as demais camadas e corrigir imperfeições	Possuía aparência mais grosseira, tendo como composição agregado de granulometria elevada e traço com proporções entre 1:2 e 1:4	Era a primeira camada, aplicada sobre alvenaria limpa e umedecida, com espessuras entre 5 a 20 mm, que era projetada com força e bem apertada com talochas de forma a apresentar acabamento áspero. Após sua aplicação deixava-a secar por 3 a 6 semanas para então aplicar a camada seguinte
Reboco	Regularização e servir de base ao acabamento	Utilizava-se traço muito semelhante à camada anterior, entretanto, usava-se o princípio de redução do ligante de acordo com o distanciamento do suporte. O agregado utilizado era de granulometria mais fina que na camada anterior	Era a camada intermediária, executada com espessuras entre 5 e 10 mm, cuja aplicação era executada apertando-se a massa sobre o emboço umedecido
Esboço	Preparação para o acabamento	Apresentava granulometria do agregado mais fina que as demais camadas e traço igual ou com menor quantidade de ligante que a camada anterior	Camada de textura lisa e pequena espessura, que podia não existir em edifícios pobres ou de construção menos cuidada. Quando existia, geralmente era picada depois de seca a fim de proporcionar melhor aderência com o acabamento. Se inexistente, o acabamento era aplicado diretamente sobre o reboco

Fonte: Adaptado de M.R. Veiga (2009).

O outro conjunto de subcamadas era conhecido como camadas de proteção, acabamento e decoração, sendo composto por barramento (guarnecimento) e/ou pintura simples ou de ornamentação (M.R. Veiga, 2009). O Quadro 8 apresenta maiores informações sobre estas subcamadas.

**Quadro 8 – Camadas de proteção, acabamento e decoração de edifícios antigos**

Subcamada	Função	Constituição	Execução
Barramento	Proteção do revestimento às infiltrações de água de precipitação, absorção higroscópica da umidade do ar e resistência a ações de choque e atrito. Quando pigmentada, apresentava também função estética	Comumente composta por cal, pó de pedra, areia de granulometria fina e água. Em alguns casos possuía pigmentos a fim de apresentar coloração e não ser necessário a pintura posterior. Confeccionada com traços entre 1:0,75 e 1:1	Era aplicada sobre o esboço ou reboco, e quando apresentava pigmentação era a última camada do revestimento. Executava-se com a camada anterior previamente umedecida, com a colocação de duas a três camadas. Possuía espessuras entre 2 a 5 mm
Pintura	Função visual, proteção contra a chuva e vento e características higiênicas.	Basicamente composta por cal, água e pigmentos. Em alguns casos, adicionava-se aditivos como cera, sebo ou óleos	A qualidade da tinta dependia muito da proporção dos constituintes. Geralmente, eram tintas muito aquosas, cujo a aplicação se dava em camada fina sobre o barramento

Fonte: Adaptado de Carvalho (2011); M.R. Veiga (2009).

Muitas vezes, quando buscava-se melhor comportamento hidráulico das argamassas devido ao suporte ser úmido ou estar exposto a umidade, utilizavam-se aditivos naturais ou artificiais nas argamassas (M.R. Veiga, 2009). As adições induzem mudanças nas argamassas que podem melhorar ou não sua durabilidade e desempenho. A potencialização de uma característica depende do aditivo a ser utilizado, sendo impossível tornar a argamassa eficiente em todas suas propriedades com a aplicação de apenas um (R. Veiga, 2017). A utilização destes materiais, conhecidos também como pozolanas, é percebida desde os romanos devido aos registros de Vitrúvio em seus livros, onde recomenda materiais como cerâmica cozida peneirada e pó da região do Vesúvio para obtenção de uma argamassa de melhor aplicação (Margalha, 2011).

Em Portugal, as composições das argamassas variaram conforme o período consoante a influência do mesmo. Nos séculos I a V, a ocupação vivenciada foi a romana e, portanto, as composições encontradas nas edificações desta época foram com cal aérea calcítica, agregados silicosos e materiais cerâmicos (fragmentos e/ou pó de tijolo). No período entre os séculos VII e XII, a influência na composição das argamassas decorreu da dominação islâmica, caindo em desuso os materiais cerâmicos e sendo então utilizado cal aérea calcítica, gesso (em argamassas interiores) e agregados silicosos. A partir do século XII a cal utilizada passa a ser aérea dolomítica e do século XVI em diante os agregados predominantes começam a ser calcários. As composições dos edifícios militares, entretanto, independentemente da época apresentaram

maior resistência e durabilidade, possuindo no geral materiais como cal aérea calcítica, agregados silicosos e calcários, além de em alguns casos conchas e grãos basálticos (Damas, Veiga & Faria, 2016).

### 2.2.2 Elementos constituintes

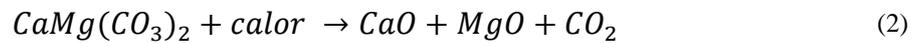
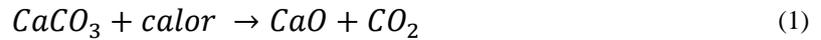
A grande durabilidade das argamassas de cal nos edifícios antigos levanta muitas incógnitas e questionamentos sobre os materiais utilizados em sua formulação. Além da qualidade da cal e agregados, e das boas técnicas de aplicação, a inclusão de diversos tipos de materiais, que variavam conforme a localidade, contribuíram certamente com a resistência destas argamassas. Sabe-se que materiais como rochas vulcânicas, terras diatomáceas, rochas sedimentares e materiais cerâmicos eram utilizados e apresentavam características pozolânicas. Palhas e pêlos de animais eram adicionados a fim de melhorar a resistência à fendilhação. Já materiais como açúcar, vinho, clara de ovo, sangue, carvão, azeite e óleos vegetais e animais, eram incorporados às argamassas de maneira a melhorar sua hidráulidade ou conferir coloração (M.R. Veiga, 2009). Os pigmentos na forma de óxidos de ferro (para vermelhos amarelos e laranjas), crómio (para verde) ou cobalto (para azul) eram também, por vezes, introduzidos a fim de colorir a argamassa. A seguir explica-se mais detalhadamente sobre os constituintes destas argamassas, enfatizando-se o pó de tijolo no tópico das pozolanas devido ao fato de ser objeto de estudo no presente trabalho.

- Cal aérea

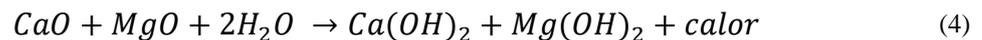
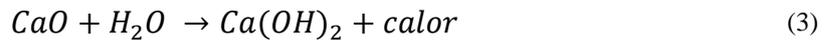
É um ligante aéreo, o que significa que seu endurecimento se dá em contato com o dióxido de carbono da atmosfera e não com água. A norma que classifica as cals é a NP EN 459 - 1 (Instituto Português da Qualidade, 2015), e estas podem ser calcíticas (CL) ou dolomíticas (DL) (Vargas, 2013). Esta classificação resulta do tipo de rocha da qual a cal aérea foi decomposta, uma vez que o composto principal em cada uma varia. Nas rochas calcíticas há pelo menos 95% de  $\text{CaCO}_3$  enquanto que nas dolomíticas há  $\text{CaMgCO}_3$ , o que significa um elevado teor de pureza (Margalha, 2011).

A cal é obtida através da cozedura destas rochas, sendo que para as calcíticas as temperaturas são mais altas e variam entre 800°C e 1000°C, e para as dolomíticas entre 400°C e 480°C. Este processo é conhecido como calcinação, e num primeiro momento a rocha liberta

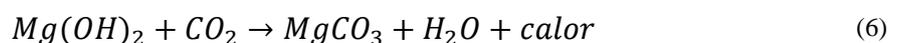
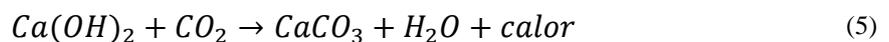
água até atingir a temperatura a partir da qual decompõe-se o carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>). O produto obtido será óxido de cálcio (CaO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e no caso das rochas dolomíticas, o óxido de magnésio (MgO). As Equação 1 e Equação 2 ilustram a calcinação para rochas calcínicas e dolomíticas, respectivamente (Margalha, 2011).



A cal viva, produtos obtidos nas reações anteriores, pode apresentar-se em pedra ou pó. Nesta forma é altamente instável, sendo necessário sua hidratação num processo conhecido como extinção da cal (Vargas, 2013). A extinção consiste na inserção de água (H<sub>2</sub>O) e pode ser realizada por aspersão, colocando-se a quantidade de água suficiente para a reação ocorrer e que resulta na cal hidratada em pó, ou por imersão, colocando-se água em excesso e que resulta na cal hidratada em pasta. As reações de extinção são apresentadas na Equação 3 e Equação 4, para rochas calcínicas e dolomíticas respectivamente (Margalha, 2011).



O produto das reações anteriores é a cal utilizada na amassadura. Após aplicação da argamassa, ocorrem as reações de carbonatação da cal, responsáveis por seu endurecimento. Este último processo é lento e ocorre em contato com o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) presente no ar, e faz com que a cal regresse à composição química inicial, mas com uma reorganização mineralógica de cristais diferente. Quanto maior o teor de cal em uma argamassa, mais lento é seu processo de carbonatação devido a maior quantidade de carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) para reagir (Vargas, 2013). Este último processo lento é um dos fatores principais que desincentivam o uso da cal como ligante pela indústria da construção. A reações químicas da carbonatação são apresentadas na Equação 5 e Equação 6 (Margalha, 2011).



A escolha por cal em pó ou em pasta varia conforme a utilização pretendida e condições que se dispõe para armazenamento, cozedura e extinção da mesma. Quando a cal em pó não está armazenada em boas condições, pode reagir com o dióxido de carbono da atmosfera e

funcionar na argamassa como agregado e não ligante. A cal em pasta previne esse problema mas apresenta a maior dificuldade de execução do traço, visto que possui maior quantidade de água incorporada (Margalha, 2011). A utilização da cal em pasta em edifícios antigos é bastante favorável devido à sua elevada qualidade, o que permite uma excelente homogeneização da argamassa além de melhor trabalhabilidade. Entretanto, não é constatado que seu uso confira a melhores resistências mecânicas e às condições climáticas (Margalha, 2011; Santos & Veiga, 2012).

- Pozolanas

Segundo a norma europeia EN 197-1 (CEN, 2000), as pozolanas são substâncias de composição siliciosa ou sílico-aluminosa. Estes materiais quando combinados com água e hidróxido de cálcio, reagem formando silicatos e aluminatos de cálcio, compostos de características cimentícias e que conferem certa hidráulidade às argamassas (Matias, Faria & Torres, 2014a). A adição de materiais com características pozolânicas nas argamassas é citada por alguns autores como existente desde o século X a.C, entretanto, apesar de presente em toda Europa, o material utilizado variava conforme a localidade. Nas regiões próximas a vulcões era comum a incorporação de produtos naturais, conhecidos como rochas piroclásticas vulcânicas e tufos vulcânicos. Já nas regiões com ausência de pozolanas naturais, era comum recorrer à adição de pó e fragmentos cerâmicos e executar o que os romanos chamavam de *Opus signinum*, uma argamassa de cor rosada com excelente comportamento à água (M.R. Veiga, 2009).

O uso de fragmentos cerâmicos, como o pó de tijolo, em argamassas se tornou popular no império romano justamente devido à essa maior hidráulidade conferida por sua inserção. O pó de tijolo é obtido a partir de tijolos, e assim como outros resíduos cerâmicos se configura como um material derivado de um produto composto basicamente de argila cozida em fornos. Desta forma, seu comportamento pozolânico provém do tipo de argila utilizada na fabricação do produto cerâmico e quantidade de sílica e alumina disponível na mesma para reagir com os aluminatos de cálcio (Matias, Faria & Torres, 2014a). A hidráulidade obtida com a adição do pó de tijolo relaciona-se com a granulometria do produto utilizado, sendo mais efetiva quanto mais fino o material. Entretanto, a utilização de espessuras acima de 300 µm contribui positivamente com a porosidade e resistência mecânica (Margalha, 2011).

A indústria cerâmica produz uma quantidade significativa de resíduos devido aos requisitos de qualidade. Um pequeno número de fabricantes reinsere os produtos defeituosos

em seu ciclo de produção ou comercializam seus resíduos para confecção de pavimentos de quadras esportivas, sendo então mais comum seu descarte em aterros. Em Portugal, no ano de 2003, 37% dos resíduos gerados foi destinado a aterros. No ano de 2011, de acordo com o Registro Europeu das Emissões e Transferência de Poluentes, a indústria cerâmica teve uma produção de 102.329 toneladas de resíduo não perigoso da qual não foram recuperados 7,8%, percentual que parece baixo mas representa uma quantidade elevada de material (8.029 toneladas) que poderia ter apresentado uma destinação mais vantajosa. Além dos benefícios técnicos com a utilização do pó de tijolo em argamassas como pozolana ou agregado, seu maior uso representa benefícios ambientais como as reduções do descarte em aterros, do consumo de energia envolvido na produção dos ligantes e da extração de recursos naturais massiva decorrente da busca por agregados (Matias, Faria & Torres, 2014a).

- Areia e água

A areia é um material proveniente da desagregação das rochas e do ponto de vista químico podem ser siliciosas (quartzosas e graníticas) ou calcárias. Analisando o local ou forma de extração podem ser de britagem, de mar ou rio (Margalha, 2011). Os principais aspectos que influenciam na argamassa são a forma dos grãos e granulometria da areia (Carreira, 2013). Estes fatores permitem a redução ou não do volume de vazios, fator que relaciona-se com a resistência mecânica, compacidade, impermeabilidade e retração da argamassa (Trigo, 2014). Grãos mais angulosos são os mais indicados por proporcionar uma melhor coesão ao ligante, entretanto, por possuírem maior superfície específica podem conferir à argamassa uma maior necessidade de água, o que pode ser negativo para a resistência e fendilhação. Já em relação à granulometria, uma areia bem graduada é mais indicada devido a proporcionar um melhor preenchimento dos vazios e conseqüente diminuição do consumo de ligante, o que contribui técnico e economicamente com sua utilização (Margalha, 2011).

A água potencializa o envolvimento dos agregados pelo ligante além de auxiliar em seu amadurecimento. Além de influenciar a trabalhabilidade da argamassa, sua quantidade relaciona-se à retração e resistência mecânica uma vez que a cal aérea não consome água na carbonatação (Vargas, 2013). Quanto mais finos os materiais da mistura, maior será a necessidade de água, entretanto, água em excesso aumenta a porosidade da argamassa, tornando-a menos resistente e aumentando a retração (Trigo, 2014).

- Pigmentos

Os pigmentos são substâncias de origem mineral, vegetal ou animal, utilizadas desde a Antiguidade, com a finalidade de colorir vários produtos (Catarino & Gil, 2014). As cores e tipos de pigmento utilizados em Portugal no passado, eram o reflexo dos materiais disponíveis e sua envolvente, sendo os mais comuns na pintura de edifícios os ocres (amarelos, vermelhos e lilases), os verdes (de loureiro, cromo e salsa), os azuis (da Prússia, ultramarino e roxo-rei), o preto (negro de fumo, terra preta ou preto carbono e pó de carvão), os vermelhos (vermelho cádmio, vermelho cromo e vermelho tijolo), as terras (de Siena queimada, de Siena, preta e verde), a sombra (crua e queimada) e o pó de sapato (Carvalho, 2011).

Nas argamassas antigas, quando os pigmentos eram incorporados, não ultrapassavam 5% da massa de cal (M. R. Veiga, 2009). Já nas tintas de cal, não era consensual a quantidade de pigmento, entretanto, apresentam-se no Quadro 9 limites percentuais que não deveriam ser ultrapassados a fim de não originar alterações de cor futuras.

**Quadro 9 – Limites percentuais de pigmento (% pigmento/massa de cal)**

Tipo de pigmento	Tintas espessas	Tintas normais	Tintas diluídas
Ocre ou terra	10	25	65
Óxido mineral	5	15	35

Fonte: Adaptado de Carvalho (2011).

A fim de garantir a qualidade da pintura os pigmentos devem ser compatíveis com o meio, de cor estável perante ação de agentes térmicos e químicos, além de insolúveis em água (Carvalho, 2011).

### 2.2.3 Técnicas de aplicação e preparação

Se executadas e aplicadas corretamente, as argamassas de cal apresentam maior durabilidade que as de cimento, melhorando suas características ao longo do tempo com a lenta carbonatação (M. R. Veiga, 2009). De fato, para se obterem argamassas só de cal com bom desempenho, a aplicação apresenta-se como fator decisivo, pelo que é importante a atenção para os seguintes aspectos a fim de executar corretamente esse revestimento (Vargas, 2013):

- Deve-se tentar introduzir a menor quantidade de água possível na amassadura a fim de obter um revestimento com maior resistência, mais compacto e menor tendência à fissuração e absorção de água;
- A amassadura deve ser realizada manualmente ou com berbequim, sem uso de betoneira;
- Para evitar fendilhação este tipo de argamassa deve ser aplicado apertando-se contra o suporte;
- Realização de um maior número de camadas com menores espessuras a fim de contribuir para redução da retração e fissuração além de maior impermeabilidade do revestimento;
- Atenção quanto à exposição solar uma vez que aumenta a carbonatação e endurecimento da argamassa, mas pode também aumentar a fissuração da mesma.

Acrescenta-se aos aspectos indicados pelo o autor, a utilização de uma cal de boa qualidade com maior tempo de maturação e a atenção não só ao sol, mas às demais condições climáticas e ao tempo de cura, que influenciam no processo da adequada secagem da argamassa.

#### **2.2.4 Revisão de trabalhos experimentais**

Neste subcapítulo são referidos trabalhos com interesse para esta dissertação, cujos resultados e/ou conclusões contribuíram para a realização deste estudo.

Em seu estudo R. Veiga (2017) analisou os motivos pelos quais as argamassas de cal aérea, apesar de todas as evidências que comprovam sua maior adequabilidade aos edifícios antigos, ainda não serem usadas em larga escala em ações de intervenção e encontrou como conclusões que a falta de conhecimento científico sobre as particularidades e comportamento de materiais como a cal, a falta de mão-de-obra qualificada para sua aplicação e a dificuldade de se conciliar o tempo e planejamento de uma obra com a secagem necessária da cal, são os fatores que se apresentam como dificultadores de seu amplo uso. Além disso, apresentou importantes aspectos sobre a aplicação eficiente da cal, como a utilização de traços entre 1:2 e 1:3, a aplicação da quantidade de água pautada na necessária para uma boa trabalhabilidade, o uso de agregados com boa distribuição granulométrica, execução do reboco em várias camadas de pequena espessura e proteção do mesmo a ciclos de gelo/degelo.

O trabalho desenvolvido por Carvalho (2011) consistiu na caracterização da cor e dos materiais utilizados nas argamassas de reboco de dezessete edifícios no centro histórico de Tomar. Sobre as argamassas de reboco analisadas a autora concluiu que os traços utilizados eram semelhantes e no geral nas proporções de 1:2 ou 1:3, o ligante utilizado era de natureza aérea, os agregados era maioritariamente silicosos e havia a presença de óxidos de ferro. Quanto às cores, concluiu que as mais comuns eram branco, amarelo, vermelho, rosa, azul e cinza.

Faria, Costa, Lourenço, Figueiredo e Silva (2014) desenvolveram rebocos em muretes de alvenaria de tijolo furado, a fim de caracterizá-los com ensaios não destrutivos. As composições confeccionadas foram: argamassa de cal aérea no traço 1:2, argamassas de cal aérea no traço 1:2 com substituições de 10% e 20% da massa de cal por metacaulino, argamassa de cal hidráulica natural ao traço 1:3, argamassas de cal hidráulica no traço 1:3 com substituições de 2,5% e 5% da massa da cal por metacaulino e argamassas de cal hidráulica no traço 1:4 com substituições de 10% e 25% da massa de cal por resíduos provenientes de tijolo e ladrilhos de revestimento. A partir dos resultados, entre outras conclusões, obteve-se que a adição dos resíduos cerâmicos aumentou a dureza superficial no caso do maior percentual de substituição, manteve ou aumentou a deformabilidade, elevou a resistência mecânica da argamassa, além de proporcionar um ótimo comportamento à absorção da água chuva.

No trabalho de Matias, Faria e Torres (2014a), foram caracterizados sete tipos de resíduos cerâmicos quanto à mineralogia, dimensões e pozolanicidade, sendo posteriormente selecionado três e incorporados, no lugar do ligante ou agregado, a uma argamassa de cal aérea em diferentes granulometrias. Quanto aos resíduos provenientes de tijolos, percebeu-se que apresentam potencial pozolânico e que seu uso ocasionou o aumento da resistência mecânica da argamassa, em relação a de referência, independentemente da percentagem de substituição ou granulometria utilizada.

Sendo assim, o programa experimental apresentado no capítulo seguinte pretende avaliar o desempenho mecânico, térmico e físico de argamassas de revestimento à base de cal com pigmento e pó de tijolo como substituições de 15 e 30% da massa do ligante.

### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental consistiu na análise de três composições diferentes de argamassa, que variaram entre si na presença e quantidade de pó de tijolo utilizada. A argamassa de referência foi composta apenas por cal em pasta e areia, enquanto que as outras duas formulações apresentaram a inserção de pó de tijolo como substituição de 15% e 30% da massa de cal em pasta.

Foram realizados os mesmos ensaios para as três composições, utilizando-se formatos de corpos de prova mais indicados a cada um deles. Dessa forma, foram confeccionados corpos de prova prismáticos, cilíndricos e aplicados em substrato tijolo que foram todos submetidos ao mesmo tipo de cura.

Neste capítulo, é apresentado todo o processo de definição das formulações assim como o da fabricação dos corpos de prova. Além disso, apresentam-se também os ensaios realizados para cada tipo de corpo de prova confeccionado. A campanha experimental foi realizada no Laboratório de Materiais de Construção (LMC) e no Laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais (LERM), da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança (IPB).

#### 3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais utilizados na confecção das argamassas foram cal em pasta, areia, pigmento, pó de tijolo e água proveniente da rede pública. A caracterização de cada componente é apresentada mais detalhadamente a seguir.

##### 3.1.1 Cal em pasta

A cal utilizada foi a cal aérea calcítica em pasta da marca Calcidrata S.A, e optou-se pela mesma devido a sua utilização conferir a uma argamassa mais homogênea e trabalhável. Não foi realizada nenhuma caracterização uma vez é um material industrializado, com controles de qualidade e com disponibilidade de fichas técnicas. No Quadro 10 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** são apresentadas algumas informações disponibilizadas pelo fabricante e a Figura 3 ilustra o material.

**Quadro 10 – Características da cal em pasta**

Componente principal	Concentração (%)	Massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	Norma regulamentadora
Hidróxido de cálcio – Ca(OH) <sub>2</sub>	≥ 80	300 – 800 (a 20°C)	EN 459-1:2010

Fonte: Adaptado de APCER (2014) e Calcidrata - Indústrias de Cal S.A (2017).



**Figura 3 – Cal em pasta utilizada**

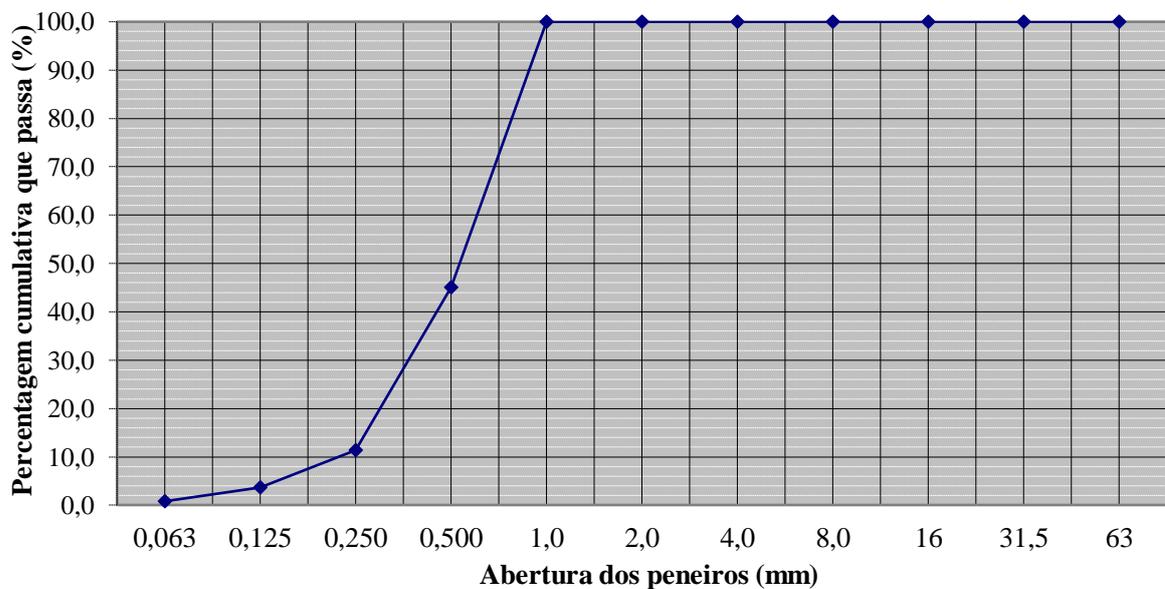
### 3.1.2 Areia

A areia utilizada nesta pesquisa experimental é uma areia siliciosa denominada por Areia Espanhola. A fim de se obter uma argamassa menos porosa e com melhor acabamento final passou-se a areia pelo peneiro de 1 mm, sendo utilizado então granulometrias inferiores a esta.

A caracterização do material consistiu na realização da análise granulométrica através da metodologia proposta pela norma NP EN 933-1 (Instituto Português da Qualidade, 2000), da determinação da baridade e do volume de vazios com a norma NP EN 1097-3 (Instituto Português da Qualidade, 2002) e da determinação da massa volúmica e absorção de água através da norma NP EN 1097-6 (Instituto Português da Qualidade, 2003). A Figura 4 apresenta a areia com a granulometria utilizada e a Figura 5 apresenta a sua curva granulométrica.



**Figura 4 – Areia utilizada peneirada no peneiro de 1 mm**



**Figura 5 – Curva granulométrica da areia passada no peneiro de # 1 mm**

Analisando a curva granulométrica da areia (Figura 5) percebe-se que o material apresenta uma distribuição contínua, ou seja, com uma boa graduação. Observa-se que a areia estudada apresenta fração de finos igual a 45,11% (partículas menores que 0,5 mm) e fração de médios igual 54,89% (partículas com dimensões entre 0,5 e 2,0 mm) e 0% de grossos (2-4mm), o que não representa máxima compactidade descrita por Feret, entretanto, pretendia-se a utilização de uma areia com grande proporção de finos. Os resultados obtidos no ensaio de baridade e volume de vazios são apresentados no Quadro 11, enquanto que os para os ensaios de massa volúmica a absorção de água são apresentados no Quadro 12.

**Quadro 11 – Baridade e volume de vazios da areia**

Baridade (g/cm <sup>3</sup> )	Volume de vazios (%)
1,5102	39,35

**Quadro 12 – Massas volúmicas da areia e absorção de água da areia**

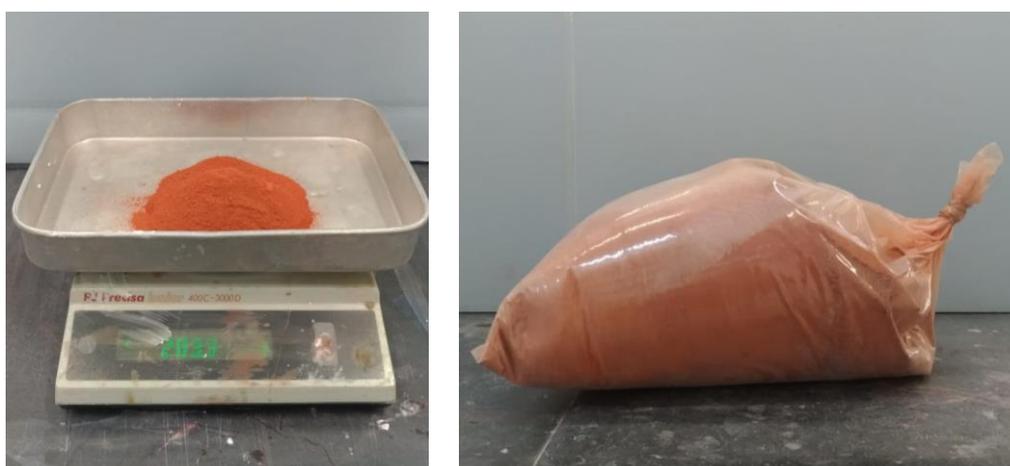
Massa volúmica do material impermeável das partículas (g/cm <sup>3</sup> )	Massa volúmica do material das partículas secas em estufa (g/cm <sup>3</sup> )	Massa volúmica das partículas saturadas com superfícies seca (g/cm <sup>3</sup> )	Absorção de água durante 24 horas (%)
2,50	2,49	2,49	0,2

De acordo com a massa volúmica obtida, confirma-se a classificação da areia como agregado de densidade normal (valores entre 2 e 3 g/cm<sup>3</sup>). Assim como o resultado encontrado para a baridade confirma sua classificação como denso (valores entre 1,2 a 1,6 g/cm<sup>3</sup>).

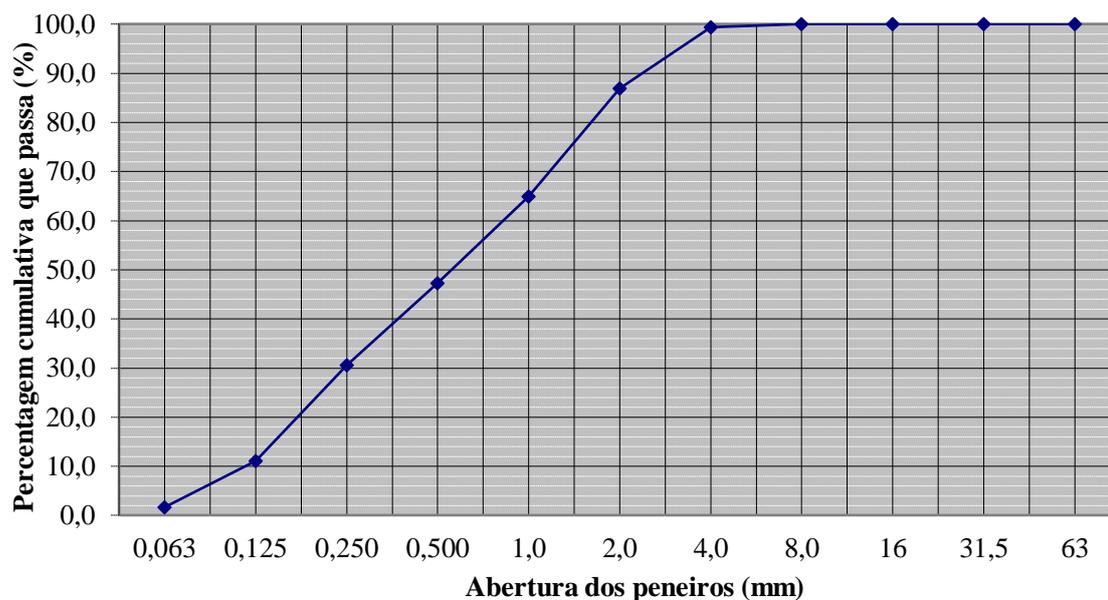
### 3.1.3 Pó de tijolo

O pó de tijolo utilizado foi obtido em sacos de 24 kg. A fim de se obter um melhor efeito de pozolana passou-se o mesmo no peneiro de 0,50 mm para que a granulometria utilizada fosse menor que a deste peneiro, além de colocá-lo em estufa por 24 horas antes do uso para reduzir toda a umidade.

A caracterização do pó de tijolo consistiu apenas na realização da análise granulométrica deste material utilizando a metodologia da norma NP EN 933-1 (Instituto Português da Qualidade, 2000). A Figura 6 ilustra o pó de tijolo utilizado e a Figura 7 apresenta a sua curva granulométrica.



**Figura 6 – Pó de tijolo passado no peneiro 0,50 mm**



**Figura 7 – Curva granulométrica do pó de tijolo**

O pó de tijolo apresenta em sua curva granulométrica (Figura 7) uma distribuição próxima da contínua, ou seja, com boa graduação. Optou-se por utilizar a fração abaixo do peneiro 0,5 mm devido às referências apontarem um melhor efeito pozolânico a este material quando utilizado com partículas mais finas, aliado ao fato de que passar por este peneiro não se perderia tanto material como ao se passar por peneiros menores.

### **3.1.4 Pigmento**

A cor escolhida para argamassa foi a vermelha, logo o pigmento utilizado foi o óxido de ferro Málaga da marca Lacrilar. Por ser um material industrializado com controles de qualidade e que apresenta fichas técnicas, não se realizou nenhum ensaio para caracterização deste material. A Figura 8 apresenta o pigmento utilizado.



**Figura 8 – Pigmento óxido de ferro Málaga**

### 3.2 FORMULAÇÕES DAS ARGAMASSAS

A quantidade de cada componente foi definida de forma diferente, e primeiramente em pequena escala, para depois serem aplicadas em maiores proporções. Para a cal e areia, a quantidade foi definida de acordo com a escolha do traço a ser utilizado. Como o pó de tijolo substituiu percentuais da massa de cal em pasta, sua quantidade ficou vinculada à quantidade referente a 15% e 30% da massa da cal em pasta utilizada na argamassa de referência. Já a água e o pigmento tiveram suas quantidades definidas experimentalmente, avaliando-se para o caso da água a trabalhabilidade do material e consistência, e para o pigmento o comportamento da cor ao secar da argamassa. Tais procedimentos serão melhor detalhados a seguir.

Primeiramente, definiu-se a quantidade de areia e cal para a argamassa de referência. Para tal foram testados os traços volumétricos de 1:2 e 1:3 e verificados sua trabalhabilidade na aplicação em substrato tijolo e seu acabamento após secagem. Optou-se por testar estes dois traços devido às referências indicarem que em argamassas antigas as proporções mais utilizadas do tipo ligante: agregado estarem dentro do intervalo de 1:2 e 1:4, aliado ao fato de estudos anteriores se obterem bons resultados com estes dois traços. A proporção que resultou numa melhor aplicação e acabamento foi a de 1:2, escolhida então para todas as composições.

Como a cal em pasta é um material cujo o volume pode se alterar facilmente devido a presença de água na embalagem, transformou-se o traço em volumétrico escolhido em um traço base em massa. Essa conversão foi realizada de maneira empírica, preenchendo-se completamente um recipiente metálico com cal em pasta, evitando-se a presença da água, e aferindo-se a massa do material que o preencheu em uma balança digital. Da mesma forma,

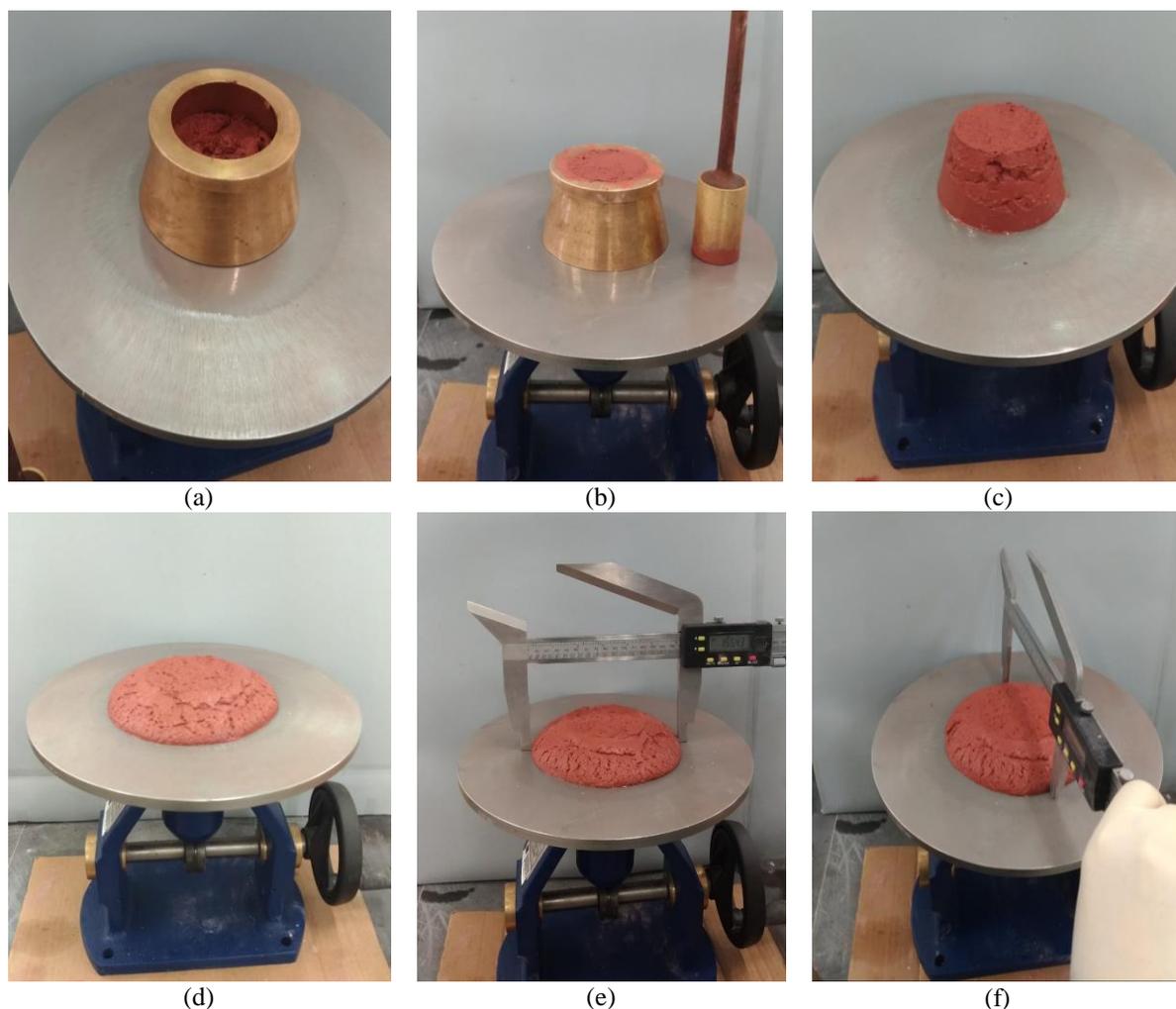
realizou-se este procedimento para a areia, com o mesmo recipiente utilizado para a cal, aferindo-se, entretanto, a massa do enchimento de duas vezes o volume do mesmo. Ao término deste procedimento, constatou-se os valores de 300 g para cal em pasta e 700 g para areia, o que equivale a um traço em massa de 1:2,33. Estes valores definiram as quantidades de cal e areia para a argamassa de referência, uma das três composições realizadas e que foi chamada de Composição 1.

Com os valores de cal e areia da composição de referência definidos, foi possível definir as das demais composições, além da quantidade de pó de tijolo para estas. Como o traço definido foi usado em todas as composições, a quantidade de areia manteve-se a mesma (700 g), variando-se apenas a quantidade de cal uma vez que na segunda composição (Composição 2) houve a substituição de 15% e na terceira composição (Composição 3) houve a substituição de 30% da massa da mesma por pó de tijolo. Dessa forma, utilizando-se do valor aferido de massa de cal para a argamassa de referência e dos percentuais de substituição por pó de tijolo de cada outra composição, definiu-se as quantidades de cal em pasta e pó de tijolo para estas. As quantidades de cal em pasta, areia e pó de tijolo são apresentadas no Quadro 13.

**Quadro 13 – Quantidades de ligante e agregado para as composições 1, 2 e 3 (g)**

<b>Composição</b>	<b>Cal em pasta</b>	<b>Pó de tijolo</b>	<b>Areia</b>
1	300	0	700
2	255	45	700
3	210	90	700

Definindo-se os valores anteriores, entrou-se num segundo momento onde buscou-se definir as quantidades de pigmento e água para cada uma das composições. Estas foram definidas empiricamente, misturando-se os materiais seguindo a metodologia de amassadura da norma EN 1015-2 (European Committee for Standardization, 1999) e aplicando a mistura em substrato tijolo, até atingirem um resultado adequado. Para a quantidade de água foi avaliada a consistência através do ensaio de espalhamento, conforme a metodologia proposta pela norma EN 1015-3 (European Committee for Standardization, 1999), além da trabalhabilidade ao aplicar no substrato. Quando os resultados de consistência se encontraram entre 150 e 160 mm no ensaio de espalhamento, constatou-se uma boa aplicação no substrato, que aliado ao fato de estarem dentro do intervalo de valores avaliado através das referências como indicado para o tipo de argamassa desenvolvida, determinaram o volume de água utilizado. A Figura 9 ilustra a realização do ensaio de consistência.



**Figura 9 – Realização do ensaio de consistência por espalhamento. (a) Preenchimento de metade do cone metálico e compactação; (b) Preenchimento da outra metade do cone metálico, compactação e rasagem; (c) Retirada do cone metálico; (d) Realização das pancadas no equipamento; (e) Medição do diâmetro horizontal; (f) Medição do diâmetro vertical**

No caso do pigmento, foram realizados diversos testes com variações em sua quantidade e aplicação em substrato de tijolo para análise quando secos e passados alguns dias. Considerou-se como massa adequada de pigmento quando se obteve uma amostra com menor quantidade possível utilizada para obter uma cor agradável que não clareasse com o passar dos dias. Os testes da quantidade de água e pigmento foram realizados em simultâneo. Para encontrar as formulações ideais, foram realizadas 23 amostras aplicadas em substrato tijolo (Figura 10). As formulações escolhidas foram as intituladas como 21, 22 e 23, e estas assim como todas as realizadas, são apresentadas no Quadro 14.



Figura 10 – Amostras realizadas para afinar as composições

Quadro 14 - Ensaio prévios para definição ds quantidades de pigmento e água das composições

Teste	Cal em pasta (g)	Areia Fina (g)	Pó de Tijolo (g)	Pigmento (g)	Água (ml)	Ensaio de consistência (mm)
1	255	700	45	3	20	117 e 118
2	255	700	45	6	80	163 e 159
3	255	700	45	15	80	154,8 e 154,7
4	300	700	0	6	30	146 e 147
5	300	700	0	12,5	60	168 e 167
6	300	700	0	17,5	70	163 e 163
7	210	700	90	5	110	167 e 168
8	210	700	90	15	110	166 e 168
9	210	700	90	20	110	166 e 168
13	255	700	45	30	100	170 e 171
14	210	700	90	30	110	164,5 e 165,69
15	300	700	0	30	70	168,6 e 165,6
16	300	700	0	35	75	166 e 166
17	300	700	0	40	80	170 e 169
18	300	700	0	33	70	166 e 167

(continua)

(continuação)

Teste	Cal em pasta (g)	Areia Fina (g)	Pó de Tijolo (g)	Pigmento (g)	Água (ml)	Ensaio de consistência (mm)
19	210	700	90	25	110	165 e 166
20	210	700	90	27,5	110	164 e 164
21	300	700	0	33	40	155 e 156
22	255	700	45	30	65	159 e 161
23	210	700	90	25	85	155 e 154

### 3.3 PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Como já mencionado, foram desenvolvidos diversos formatos de corpos de prova correspondentes ao tipo de ensaio a ser realizado. Dessa forma, foram produzidos corpos de prova prismáticos de 40 x 40 x 160 mm e de 40 x 150 x 150 mm, cilíndricos com 100 mm de altura e 50 mm de diâmetro bem como corpos de prova prismáticos com aplicação de argamassa em uma das faces do substrato tijolo com espessura de aproximadamente 10 mm. Os processos de amassadura e cura foram os mesmos para todos os tipos de corpo de prova, com a moldagem apresentando algumas particularidades. Tais procedimentos são melhor descritos a seguir.

#### 3.3.1 Amassadura e moldagem

A amassadura das argamassas seguiu os mesmos procedimentos, independente da composição ou formato de corpo de prova a ser moldado, diferenciando-se apenas nos processos da moldagem.

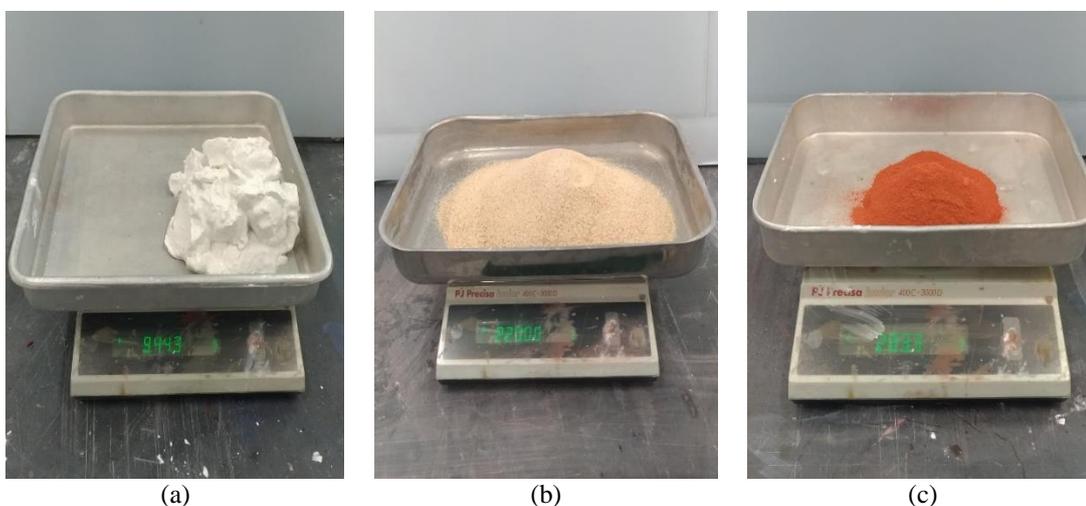
Como a amassadura ocorreu numa misturadora de pequeno porte, não foi possível a confecção de toda a argamassa para preenchimento das fôrmas na quantidade necessária de corpos de prova por composição, logo produziu-se a quantidade máxima de argamassa que a misturadora suportava preenchendo-se então um número determinado de fôrmas a cada amassadura. No caso dos corpos de prova de 40 x 40 x 160 mm produziu-se o suficiente para preencher duas fôrmas por vez, para os cilíndricos o necessário para dez fôrmas, para os de 40 x 150 x 150 o necessário para duas fôrmas e para a aplicação em substrato o suficiente para quatro aplicações em tijolos por amassadura. Desse modo, primeiramente calculou-se as massas necessárias de cada material para produzirem estes volumes de argamassa para posteriormente pesá-las e realizar-se a amassadura propriamente dita. As massas de cada material foram obtidas

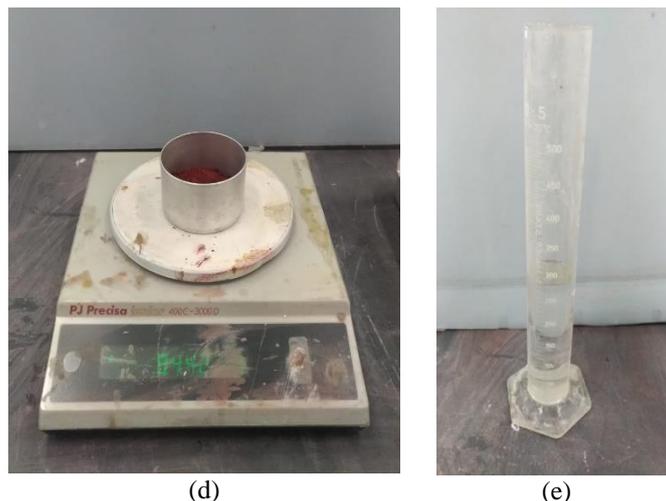
aumentando-se linearmente as quantidades das composições bases definidas inicialmente. As quantidades de cada material, por composição e tipo de corpo de prova são apresentadas no Quadro 15.

**Quadro 15 – Quantidades de material utilizados por amassadura para cada tipo de corpo de prova**

<b>Corpo de Prova Prismático – 40 x 40 x 160 mm</b>					
<b>Composição</b>	<b>Cal em pasta (g)</b>	<b>Pó de tijolo (g)</b>	<b>Areia (g)</b>	<b>Pigmento (g)</b>	<b>Água (ml)</b>
1	944,2	0	2200	107	115
2	802,57	141,63	2200	94,42	200
3	660,94	283,26	2200	78,68	285
<b>Corpo de Prova Prismático – 30 x 150 x 150 mm</b>					
1	1071,43	0	2500	118	125
2	910,71	160,72	2500	108	215
3	750	321,43	2500	90	305
<b>Corpo de Prova Cilíndrico</b>					
1	1242,86	0	2900	141	151
2	1056,43	186,43	2900	124,29	250
3	870	372,86	2900	103,57	350
<b>Corpo de Prova Tijolo</b>					
1	1242,86	0	2900	141	151
2	1056,43	186,43	2900	124,29	250
3	870	372,86	2900	103,57	350

Com as quantidades acima determinadas, prosseguiu-se à pesagem dos materiais colocando-os em tabuleiros separados em balança digital com precisão de 0,1 g, e medindo-se a água necessária em proveta graduada de 500 ml. Este procedimento foi realizado para fabricação de cada tipo de corpo de prova no dia em que se desejava realizar a amassadura. A pesagem dos materiais é apresentada na Figura 11.





**Figura 11 – Pesagem dos materiais em tabuleiros separados. (a) Cal em pasta; (b) Areia; (c) Pó de tijolo; (d) Pigmento; (e) Água**

Após pesar e reservar as quantidades necessárias, realizou-se a amassadura conforme a metodologia indicada pela norma europeia EN 1015-2 (European Committee for Standardization, 1999). Para a mistura, utilizou-se uma misturadora de duas velocidades da marca Matest indicada para tal processo. Primeiramente, foram inseridos na cuba metálica os materiais secos como a areia, pigmento e pó de tijolo (no caso das composições 2 e 3) e misturados manualmente com uma espátula, ficando com a aparência da Figura 12.



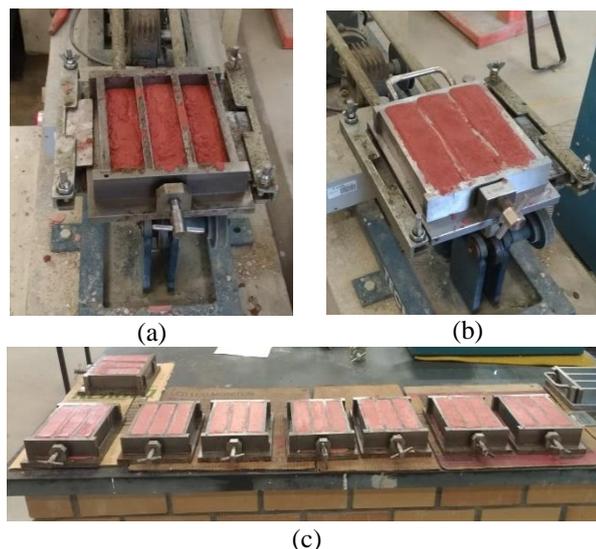
**Figura 12 – Materiais secos misturados manualmente na cuba metálica**

Com os materiais secos misturados, acrescentou-se a cal em pasta e colocou-se a cuba metálica na misturadora para bater. Ligou-se a misturadora na velocidade lenta e deixou-se a mistura por 15 segundos batendo. Foi acrescentada então a quantidade de água referente à composição confeccionada, ligou-se novamente a misturadora na velocidade lenta por 75

segundos e então desligou-se. Neste momento, soltou-se a cuba metálica do equipamento para que fosse possível realizar a mistura manual com espátula, raspando as bordas e fundo da mesma para que todo o material fosse misturado uniformemente. Posteriormente, colocou-se a cuba na misturadora e ligou-se a mesma na velocidade lenta para que a mistura batesse por mais 90 segundos. Ao término deste tempo, a misturadora foi desligada e terminou-se a amassadura, partindo então para a moldagem dos corpos de prova nas fôrmas correspondentes. Como o processo de moldagem apresenta particularidades para cada tipo de corpo de prova confeccionado, será apresentado a seguir separadamente.

- Corpo de prova prismático de 40 x 40 x 160 mm

A fôrma utilizada para este corpo de prova molda três unidades do mesmo e tem as características prescritas pela norma EN 1015-11 (CEN, 2006). A quantidade de corpos de prova necessária para cada composição era de 24 unidades, sendo necessário então o preenchimento de oito fôrmas. Estas foram moldadas realizando-se quatro amassaduras por composição, uma vez que cada uma era capaz de preencher duas fôrmas. A amassadura e moldagem de cada composição foram realizadas no mesmo dia e em sequência, a fim de minimizar-se as variações de resultados. Após aplicação de óleo desmoldante em todas as fôrmas necessárias, a moldagem foi realizada em uma fôrma por vez, mas seguindo os mesmos procedimentos em todas. Preencheu-se os moldes da fôrma com argamassa até a metade e colocou-se a mesma num compactador horizontal para realizar 60 compactações, conforme indicado pela norma NP EN 196-1 (IPQ, 2006). Ao término destas, preencheu-se o restante do volume dos moldes e voltou-se a fôrma ao compactador para mais 60 compactações. Depois disso, retirou-se a fôrma do equipamento e colocou-se a mesma em cima de uma bancada nivelada. Com auxílio de uma espátula, rasou-se o excesso de argamassa e arrumou-se de modo a deixar a superfície a mais lisa possível. A fôrma foi deixada nessa bancada de quatro a cinco dias para a argamassa secar e os corpos de prova poderem ser desmoldados, sendo que no terceiro dia foram retiradas as peças de contenção lateral a fim de aumentar a área de contato com o ar e acelerar a secagem. Após o tempo de secagem, retirou-se os corpos de prova das fôrmas e colocou-se os mesmos em tabuleiros, destinando-os então para cura. A Figura 13 ilustra o processo de moldagem destes corpos de prova.

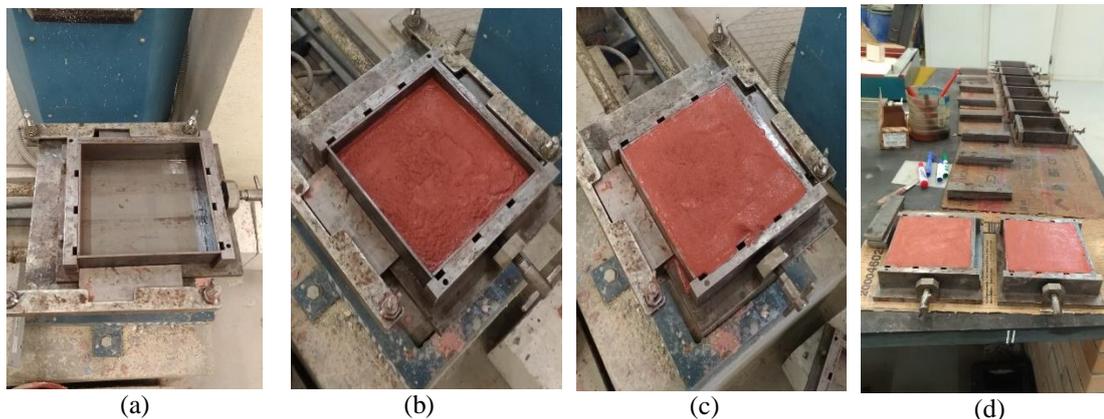


**Figura 13 – Moldagem dos corpos de prova prismáticos de 40 x 40 x 160 mm. (a) Preenchimento de metade do volume dos moldes e compactação; (b) Preenchimento total do volume dos moldes e compactação; (c) Colocação da fôrma em bancada nivelada e superfícies expostas rasadas e lisas**

- Corpos de prova prismáticos de 40 x 150 x 150 mm

A fôrma utilizada para este corpo de prova foram as dos corpos de prova prismáticos de 40 x 40 x 160 mm, entretanto com algumas adaptações. Foram retiradas as placas metálicas do centro e de uma das extremidades, e colocadas três chapas metálicas de menor espessura de modo a proporcionar as medidas e formato desejados. Com isso, teve-se à disposição dez fôrmas para cada moldagem e então realizou-se para cada composição duas amassaduras em dias diferentes para obter o número de corpos de prova necessário. As datas entre as amassaduras para cada composição e entre as composições, variaram de acordo com a secagem da argamassa até ser possível seu desmolde. Após aplicação de óleo descofrante em todas as fôrmas necessárias, a moldagem foi realizada em uma por vez, mas seguindo os mesmos procedimentos em todas. Preencheu-se a fôrma com argamassa até a metade e colocou-se a mesma no compactador para realizar 60 compactações. Ao término destas, preencheu-se o restante do volume da fôrma e voltou-se ao compactador para mais 60 compactações. Depois disso, retirou-se a fôrma do equipamento e colocou-se a mesma em cima de uma bancada nivelada. Com auxílio de uma espátula, rasou-se o excesso de argamassa e arrumou-se de modo a deixar a superfície a mais lisa possível. A fôrma foi deixada nessa bancada de quatro a sete dias para a argamassa secar e os corpos de prova poderem ser desmoldados, sendo que no terceiro dia foram retiradas as peças de contenção lateral a fim de aumentar a área de contato com o ar e acelerar a secagem. Após o tempo de secagem retirou-se os corpos de prova das

fôrmas e colocou-se os mesmos em tabuleiros, destinando-os então para cura. A Figura 14 ilustra o processo de moldagem destes corpos de prova.



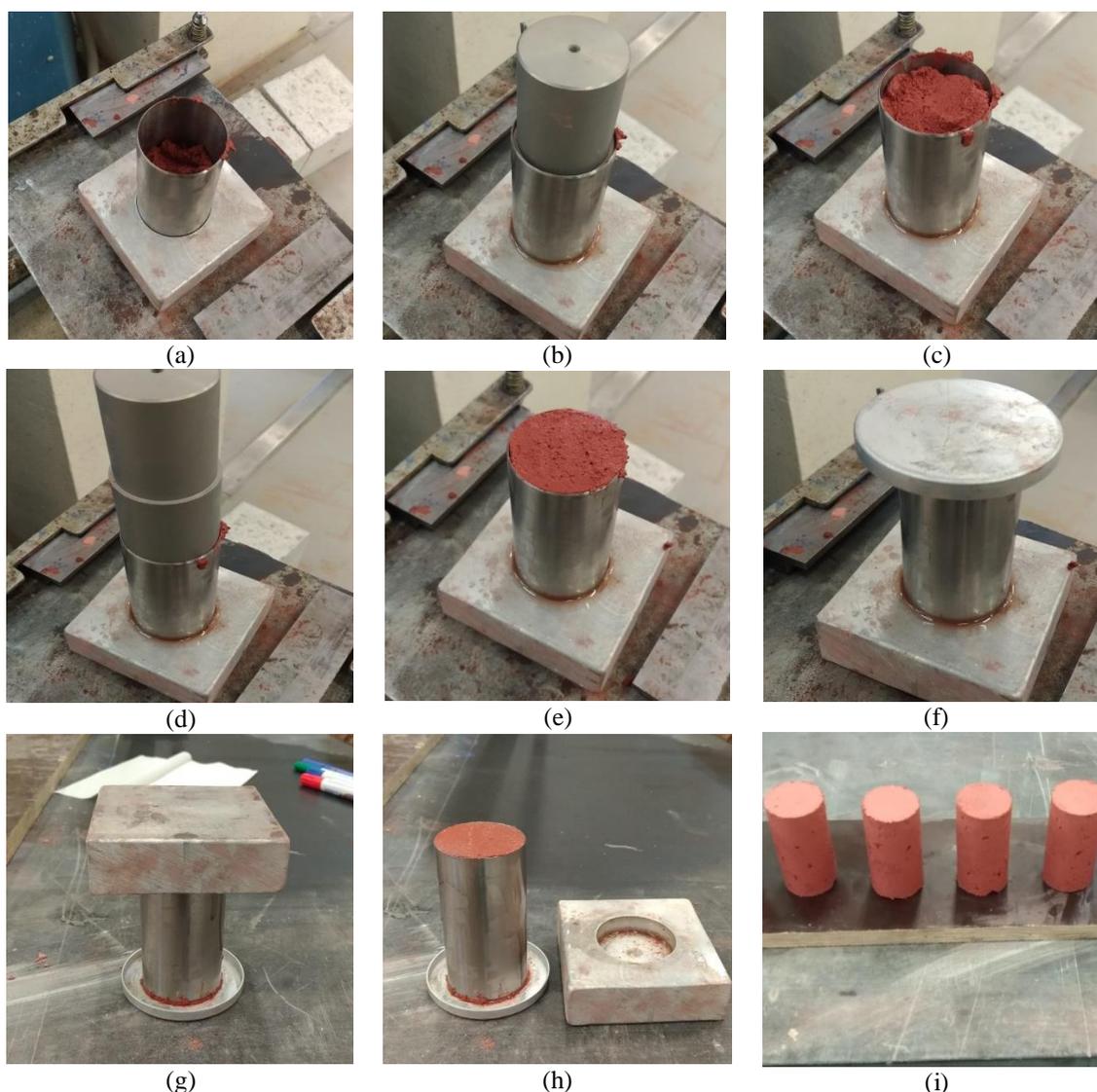
**Figura 14 – Moldagem dos corpos de prova prismáticos de 30 x 150 x 150 mm. (a) Fôrma posicionada no compactador vazia; (b) Preenchimento de metade do volume da fôrma e compactação; (c) Preenchimento total do volume da fôrma e compactação; (d) Colocação da fôrma em bancada nivelada e superfícies expostas rasadas e lisas**

- Corpos de prova cilíndricos

Como só haviam dez fôrmas para este corpo de prova, para cada composição foram realizadas duas amassaduras em dias diferentes. Como estas fôrmas possibilitavam o contato de uma superfície pequena com o ar, as datas entre as amassaduras para cada composição, variaram de acordo com a secagem da argamassa até ser possível seu desmolde.

Após aplicação de óleo descofrante em todas as fôrmas a moldagem foi realizada em uma por vez, mas seguindo os mesmos procedimentos em todas. Posicionou-se a fôrma num suporte e travou-se. Preencheu-se metade do volume da fôrma com argamassa e com um pilão foram aplicados pequenos movimentos contra a argamassa de modo a assentá-la e tentar preencher todos os espaços. Depois disso, colocou-se a fôrma no compactador para realizar 20 compactações. Ao término destas, preencheu-se o restante do volume até faltar cerca de 0,50 cm do topo, ajeitou-se a argamassa com o pilão e voltou-se a fôrma ao compactador para mais 20 compactações. Ao término disto, completou-se o volume faltante com argamassa e voltou-se a fôrma ao compactador para mais 20 compactações. Posteriormente, retirou-se a fôrma do equipamento, rasou-se com uma espátula a argamassa excedente, posicionou-se uma chapa metálica circular com descofrante já aplicado sobre a extremidade livre da fôrma pressionando-a contra ela e virou-se rapidamente o conjunto de modo que a chapa metálica se tornasse a base e fosse apoiada em bancada nivelada. Com isso, retirou-se cuidadosamente o suporte travado à

fôrma e ajeitou-se com uma espátula a nova extremidade livre. Os corpos de prova foram deixados nessa bancada até que secassem ao ponto de poderem ser desmoldados. Com dois dias de secagem, retirou-se a fôrma e deixados pelo menos mais um dia para fora antes de serem colocados em tabuleiros e destinados à cura. O processo de moldagem é apresentado na Figura 15.

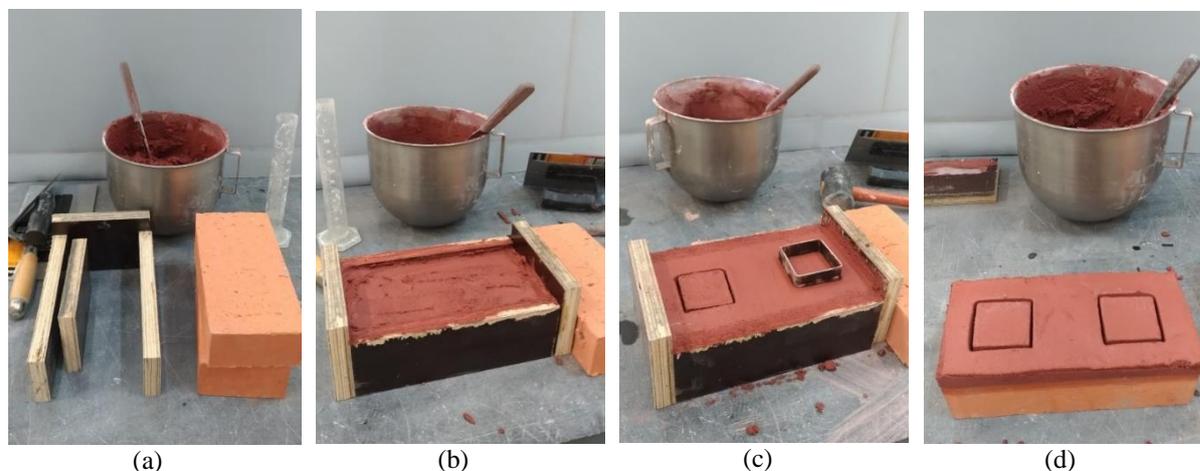


**Figura 15 – Moldagem dos corpos de prova cilíndricos. (a) Preenchimento de metade do volume da fôrma; (b) Assentamento da argamassa com pilão e compactação; (c) Preenchimento de quase todo o volume da fôrma; (d) Assentamento da argamassa com pilão e compactação; (e) Preenchimento total da fôrma e compactação; (f) Rasagem do excesso de argamassa e colocação da chapa metálica; (g) Rotação do conjunto sobre bancada nivelada; (h) Retirada do suporte e alisamento da superfície exposta; (i) Retirada da fôrma após dois dias e secagem final**

- Corpos de prova em tijolo + argamassa

Para este corpo de prova utilizou-se tijolos maciços de 70 x 110 x 230 mm como substrato. Escolheu-se este material como substrato devido a facilidade de ser encontrado e ampla utilização em edifícios antigos e novos. Além disso, para garantir a aplicação de uma espessura uniforme de argamassa sobre o tijolo, foi confeccionado um molde em madeira para envolver as laterais do mesmo como uma espécie de caixa e então ser possível a aplicação de uma mesma espessura por toda sua face. A quantidade de corpos de prova confeccionada foi de 14 unidades por composição, sendo que 12 destes foram utilizados para ensaios de aderência e 2 para comparação visual de cor. Para contribuir com a metodologia do ensaio de aderência realizado posteriormente nestes corpos de prova, foi fabricado um molde metálico quadrado de 50 x 50 mm que neste momento foi utilizado para delimitar o espaço de colagem das peças metálicas de arrancamento, e não ser necessário sua marcação quando curados através do corte com serra. Foram realizadas três amassaduras por composição em dias diferentes ou não, uma vez que cada uma foi capaz de preencher quatro tijolos. Neste tipo de corpo de prova, não era necessário uma desmoldagem como nos demais, uma vez que se utilizou um molde de madeira que servia apenas de guia e que era retirado assim que o preenchimento do tijolo era concluído, podendo então ser utilizado no próximo. Em semanas anteriores às primeiras moldagens, os tijolos foram levados para terem uma das faces escarificadas com jato de areia e então apresentarem maior aderência com a argamassa. No dia anterior a primeira moldagem todos os tijolos foram lavados com água corrente, a fim de remover sujeiras e pó, foram saturados com água e colocados em câmara com temperatura e umidade padrão até sua utilização. A moldagem dos corpos de prova foi realizada uma por vez, mas seguindo os mesmos procedimentos em todas. Retirou-se o tijolo a ser utilizado da câmara e colocou-se o mesmo em bancada nivelada. Passou-se então descofrante no molde de madeira e colocou-se o mesmo em torno do tijolo, apoiando-o para que não se movimentasse durante o preenchimento. Com uma espátula aplicou-se argamassa sobre a face do tijolo, pressionando-a e buscando preencher todos os espaços. Quando o nível do molde de madeira foi atingido, rasou-se a argamassa em excesso e ajeitou-se a superfície de modo a ficar a mais lisa possível. Nos corpos de prova para ensaio de aderência antes de retirar-se o molde de madeira, inseriu-se o molde quadrado metálico na argamassa, pressionando-o uniformemente até atingir o substrato e então retirá-lo cuidadosamente, ficando a delimitação do espaço para ensaio. Como em cada tijolo seriam realizados dois ensaios, foram realizadas duas marcações com o procedimento anterior. Finalmente, retirou-se o molde de madeira e com a espátula ajeitou-se as bordas das argamassas sobre os tijolos se necessário. Os corpos de prova foram deixados por um dia sobre bancada

nivelada para secarem e então foram destinados à cura. Enfatiza-se que nos corpos de prova para a comparação visual, o uso do molde quadrado metálico não acontece, logo o resultado foram tijolos sem demarcações. Os procedimentos da moldagem são apresentados na Figura 16.



**Figura 16 – Moldagem dos corpos de prova em tijolo. (a) Equipamentos utilizados; (b) Preenchimento da face do tijolo com argamassa; (c) Marcação dos espaços do ensaio de aderência com o molde metálico; (d) Retirada do molde de madeira**

### 3.3.2 Cura

A cura de todos os corpos de prova fabricados foi realizada da mesma maneira. Os mesmos foram inseridos em câmara climatizada com temperatura de  $20\pm 2^{\circ}\text{C}$  e umidade de  $65\pm 5\%$ . Os corpos de prova prismáticos e cilíndricos foram dispostos em tabuleiros ou sobre tábuas e então organizados em espaços na câmara até sua utilização, já os tijolos foram dispostos diretamente no chão em espaço delimitado. A Figura 17 apresenta esta disposição dentro da câmara.



**Figura 17 – Disposição dos corpos de prova na câmara para cura. (a) Corpos de prova prismáticos de 40 x 40 x 160 mm; (b) Corpos de prova cilíndricos; (c) Corpos de prova prismáticos de 40 x 150 x 150 mm; (d) Corpos de prova aplicados em tijolo**

### 3.4 ENSAIOS AOS CORPOS DE PROVA

Os ensaios foram realizados em mesmas idades entre as composições, mas que variaram de acordo com o ensaio. Entretanto, para cada ensaio utilizou-se o formato de corpo de prova ideal. Para os ensaios de resistência à flexão, resistência à compressão, massa volúmica e retração foram utilizados os corpos de prova prismáticos de 40 x 40 x 160 mm. Os corpos de prova cilíndricos foram utilizados para os ensaios de absorção de água por capilaridade e secagem. Os prismáticos de 40 x 150 x 150 mm foram utilizados apenas no ensaio de condutibilidade térmica. Já os aplicados em tijolo foram utilizados para os ensaios de aderência, análise visual e absorção de água a baixa pressão. As metodologias utilizadas em cada ensaio, assim como maiores detalhes, são apresentados a seguir.

#### 3.4.1 Resistência à flexão

Este ensaio visa a obtenção da resistência mecânica à aplicação de forças de flexão perpendiculares ao eixo do corpo de prova. Foi realizado de acordo com a norma EN 1015-11 (European Committee for Standardization, 1999), utilizando-se três corpos de prova em cada idade por composição.

O equipamento utilizado foi uma prensa hidráulica automática da marca *Shimadzu* com célula de carga para realização de ensaios deste tipo, que realizou uma aplicação de carga na velocidade de 3 mm/min. Para a realização do ensaio, marcou-se com lápis nos corpos de prova o seu meio e a distância entre os apoios de 100 mm, conforme a indicação da norma, para que o posicionamento no equipamento fosse correto. Posicionou-se então o corpo de prova com uma das faces laterais sobre os apoios, com seu eixo longitudinal perpendicular aos mesmos, e iniciou-se o ensaio. O mesmo terminou quando ocorreu o rompimento do corpo de prova, e então anotou-se os resultados de carga. Com a máxima carga suportada, calculou-se a resistência à tração por flexão em MPa ( $N/mm^2$ ) através da Equação 7.

$$R_f = 1,5 \frac{F \cdot l}{b \cdot d^2} \quad (7)$$

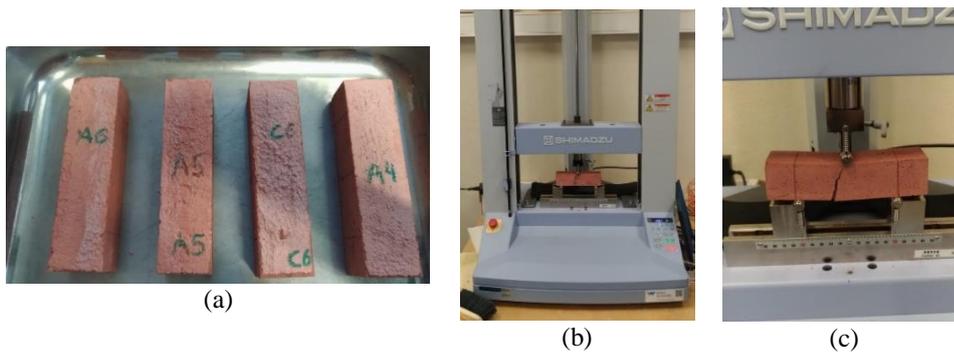
Onde:

F – carga máxima de flexão suportada (N);

l – distância entre os apoios (mm);

b, d – dimensões inferiores do corpo de prova.

A Figura 18 apresenta a realização do ensaio.



**Figura 18 – Realização do ensaio de resistência à flexão. (a) Marcação do meio e distância entre apoios; (b) Posicionamento na prensa hidráulica; (c) Rompimento do corpo de prova**

### 3.4.2 Resistência à compressão

Este ensaio foi realizado com a metodologia indicada pela norma EN 1015-11 (European Committee for Standardization, 1999) e visa a obtenção da resistência mecânica à aplicação de forças de compressão paralelas ao eixo longitudinal. Utilizou-se os seis meio corpos de provas obtidos no ensaio de resistência à flexão.

O equipamento utilizado foi uma prensa hidráulica automática da marca *Matest* com célula de carga para realização de ensaios deste tipo, que realizou a aplicação de carga. Para a realização do ensaio, posicionou-se o meio corpo de prova no espaço indicado do equipamento, com as faces laterais em contato com as células de carga da máquina e iniciou-se o ensaio. O mesmo terminou quando ocorreu o rompimento do corpo de prova, e então anotou-se os resultados de carga suportadas. Com a máxima carga obtida, calculou-se a resistência à compressão em MPa (N/mm<sup>2</sup>) através da Equação 8.

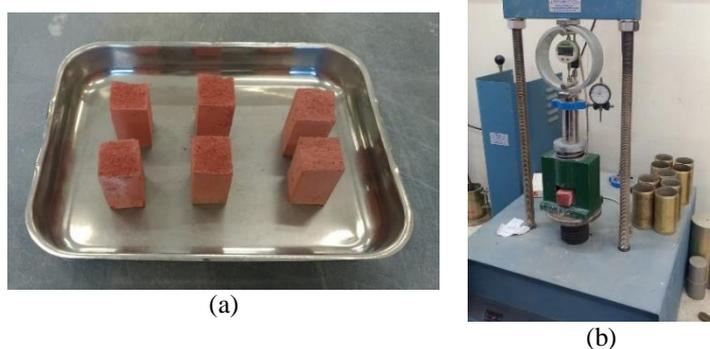
$$R_c = \frac{F}{A} \quad (8)$$

Onde:

F – carga máxima de compressão suportada (N);

A – área da superfície de aplicação de carga (mm<sup>2</sup>).

A Figura 19 ilustra a realização do ensaio.



**Figura 19 – Realização do ensaio de resistência à compressão. (a) Corpos de prova de flexão rompidos ao meio; (b) Corpo de prova posicionado na prensa e realização do ensaio**

### 3.4.3 Massa volúmica aparente no estado endurecido

A metodologia utilizada neste ensaio foi embasada na indicada pela norma EN 1015-10 (European Committee for Standardization, 2006). Neste ensaio foram utilizados seis corpos de prova de cada composição para todas as idades analisadas.

Os equipamentos utilizados foram uma balança digital de precisão 0,1 g e um paquímetro digital. O ensaio consistiu basicamente na medição das dimensões com o paquímetro, pesagem dos corpos de prova na balança e do cálculo da massa volúmica em Kg/m<sup>3</sup> através da Equação 9. O resultado final foi obtido através da média dos resultados para os corpos de prova ensaiados.

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (9)$$

Onde:

m – massa do corpo de prova (Kg);

v – volume do corpo de prova ( $m^3$ )

A Figura 20 ilustra a realização deste ensaio.

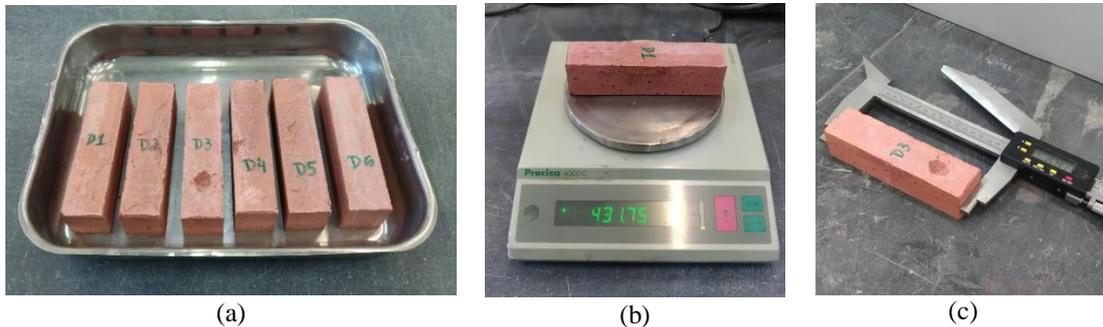
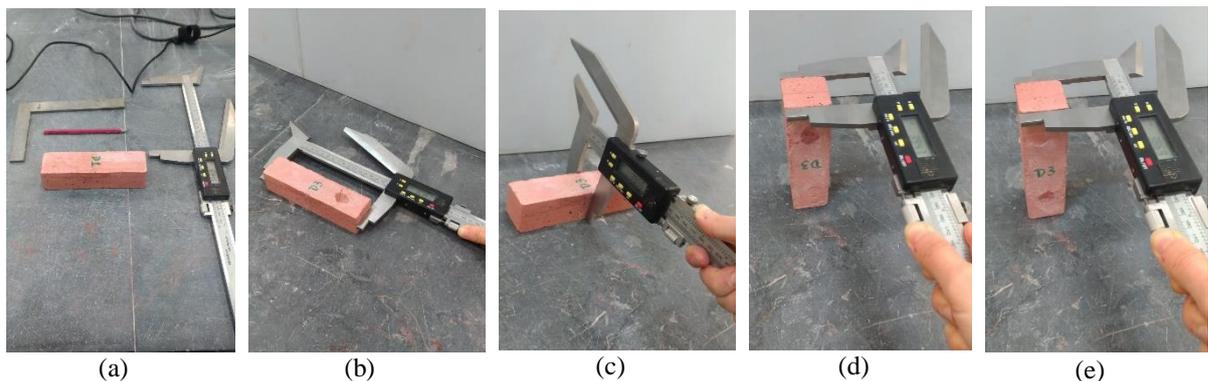


Figura 20 – Realização do ensaio para determinação da massa volúmica. (a) Corpos de prova separados em tabuleiro; (b) Pesagem dos corpos de prova em balança digital; (c) Medição das três dimensões dos corpos de prova

### 3.4.4 Retração

Neste ensaio verificou-se a variação de dimensões e surgimento de fissuras de modo empírico, medindo-se os corpos de prova com um paquímetro digital e avaliando-se os mesmos visualmente. As medições iniciaram aos 28 e terminaram aos 180 dias de cura. Foram utilizados os mesmos corpos de prova do ensaio da determinação da massa volúmica.

Realizou-se com um lápis riscos no meio do corpo de prova e também nas extremidades, de forma a marcar pontos onde as medições deveriam sempre ocorrer. Com as marcações realizadas, mediu-se as dimensões dos corpos de prova nestes pontos, sendo realizada uma medição nos locais onde não havia contato com a face irregular e duas para os locais onde havia (em cada extremidade), fazendo-se nesse caso a média posteriormente. Os procedimentos são apresentados na Figura 21.



**Figura 21 – Realização do ensaio para determinação da retração. (a) Equipamentos utilizados; (b) Medição no centro do comprimento; (c) Medição no centro da largura; (d) Medição da altura em uma extremidade; (e) Medição da altura na outra extremidade**

### **3.4.5 Absorção de água por capilaridade**

A metodologia utilizada neste ensaio foi embasada na indicada pela norma EN 1015-18 (European Committee for Standardization, 2002). Foram utilizados três corpos de prova cilíndricos por composição para cada idade analisada.

Os equipamentos e materiais utilizados foram uma balança digital com precisão de 0,1 g, um recipiente plástico de aproximadamente 70 x 230 x 340 mm, dois tubos maciços de silicone, hidrófugo e pincel. No dia anterior à realização do ensaio, preparou-se os corpos de prova lixando-se a base dos mesmos para garantir nivelamento, fez-se marcas com caneta vermelha das alturas de 5 e 10 mm a partir da base, aplicou-se hidrófugo com o pincel nas laterais por toda a altura de 30 mm a partir da base e colocou-se os mesmos em estufa aquecida a 65°C ±5 por 24 horas. No dia seguinte, após o tempo em estufa estar completo, retirou-se os corpos de prova e os deixou arrefecer por alguns minutos. Depois de arrefecidos, pesou-se a massa dos corpos de prova na balança digital, anotando-as. Posteriormente, colocou-se o recipiente plástico em bancada nivelada, alojou-se os tubos de silicone em seu interior paralelamente separados por aproximadamente 30 mm e colocou-se os três corpos de prova sobre os tubos. Finalmente, inseriu-se água no recipiente até que o nível da mesma estivesse entre as duas marcas (5 e 10 mm) em todos os corpos de prova. Manteve-se o nível da água entre estes limites durante todo o ensaio. Após inserir-se a água, disparou-se um temporizador e nos tempos de 10 minutos, 90 minutos e 24 horas aferiu-se a massa dos corpos de prova na balança digital, anotando-se os resultados. Com os valores encontrados confeccionou-se um gráfico que relaciona a quantidade absorvida de água por unidade de área da base do corpo de prova e a raiz quadrada dos instantes medidos (curvas de absorção). A quantidade de água absorvida por unidade de área da base, valores de ordenada do gráfico, é calculada com a Equação 10.

$$Q = \frac{M_2 - M_1}{A} \quad (10)$$

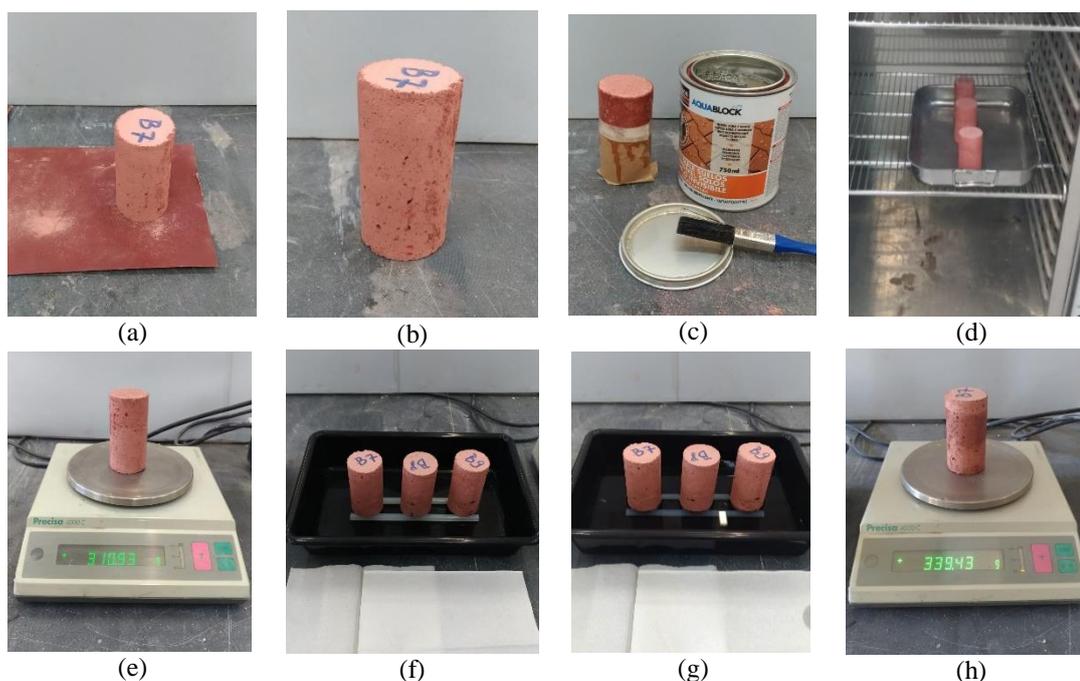
Onde:

M<sub>2</sub> – massa do corpo de prova no instante t<sub>2</sub> (Kg);

$M_1$  – massa do corpo de prova no instante  $t_1$  (Kg);

$A$  – área da base do corpo de prova ( $m^2$ ).

Com as curvas de absorção elaboradas, aplicou-se regressão linear ao trecho inicial (0, 10 e 90 minutos) para encontrar o coeficiente de absorção capilar para quase todos os tipos de utilização, exceto de renovação, em  $Kg/(m^2 \cdot min^{0.5})$ . Para argamassas de renovação, o procedimento é o mesmo, entretanto, o intervalo avaliado é o de 0 e 24 horas (1440 minutos) e o coeficiente de absorção encontrado possui unidade de  $Kg/m^2$ . A Figura 22 apresenta a realização do ensaio.



**Figura 22 – Realização do ensaio de absorção de água por capilaridade. (a) Corpos de prova tendo a base lixadas; (b) Marcação das alturas de 5 e 10 mm; (c) Aplicação do hidrófugo; (d) Colocação dos corpos de prova em estufa; (e) Aferição da massa dos corpos de prova secos; (f) Montagem da bandeja com os tubos de silicone e corpos de prova; (g) Colocação de água no recipiente; (h) Pesagem dos corpos de prova úmidos nos tempos determinados**

### 3.4.6 Secagem

O processo de determinação do índice e taxa de secagem iniciou-se assim que o de absorção de água terminou, utilizando-se os mesmos corpos de prova. A metodologia utilizada tem por base o ensaio realizado por Vargas (Vargas, 2013).

Utilizou-se como equipamento apenas uma balança digital de precisão 0,1 g. Após anotar-se os valores aferidos de massa para todos os corpos de prova no ensaio de absorção, deixou-se os mesmos no recipiente com água até completarem 24 horas. Posteriormente, retirou-se os corpos de prova do recipiente com água, secou-se o excesso de água com papel absorvente e aferiu-se sua massa. Após a pesagem, colocou-se os mesmos em um tabuleiro sobre uma bancada nivelada em repouso. Aferiu-se a massa dos corpos de prova na balança na primeira uma hora após sua retirada do recipiente com água e a partir daí a cada 24 horas, até que se completasse 550 horas de secagem. Com os valores anotados, calculou-se o teor em água para cada instante através da Equação 11 e então traçou-se a curva de secagem com os resultados encontrados.

$$W = \frac{m_i - m_0}{m_0} \times 100 \quad (11)$$

Onde:

$m_i$  – massa do corpo de prova no instante  $t_i$  (g);

$m_0$  – massa do corpo de prova seco (g).

Para calcular a taxa de secagem, analisou-se o declive do trecho inicial da curva de secagem. A mesma é dada em massa por unidade de volume e hora e varia entre tempos de cura, então utilizou-se 24 horas de ensaio. Já o índice de secagem foi calculado através da Equação 12, e quanto menor seu resultado maior é a capacidade de secagem da argamassa.

$$IS = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (t_i - t_{i-1}) \times \frac{W_{t,i-1} + W_{t,i}}{2}}{W_{m\acute{a}x} \times t_t} \quad (12)$$

Onde:

$t_i$  – tempo no instante  $i$  (h);

$t_{i-1}$  – tempo no instante anterior ao  $i$  (h);

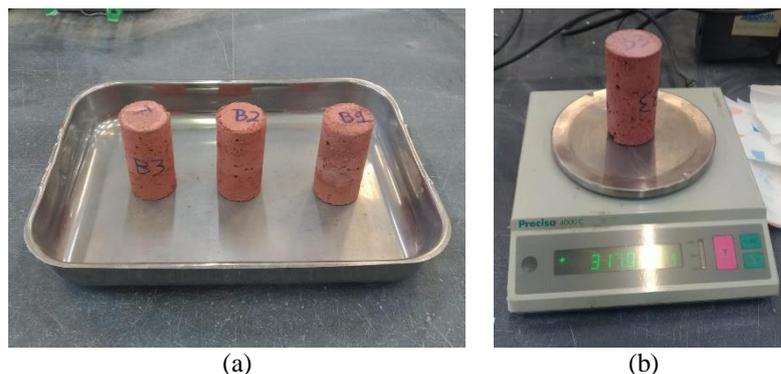
$W_{t,i}$  – teor em água no instante  $i$  (%);

$W_{t,i-1}$  – teor em água no instante anterior ao  $i$  (%);

$W_{t,m\acute{a}x}$  – teor em água máximo inicial (%);

$t_t$  – tempo total do ensaio (h).

A Figura 23 ilustra a realização do ensaio.



**Figura 23 – Realização do ensaio de secagem. (a) Colocação dos corpos de prova utilizados no ensaio de absorção após término do ensaio em um tabuleiro (b) Pesagem dos corpos de prova em tempos determinados**

### **3.4.7 Condutibilidade térmica**

O ensaio de condutibilidade térmica foi realizado de acordo com o apresentado pela norma EN 12667 (European Committee for Standardization, 2001) e foram utilizados três corpos de prova prismáticos de dimensões 40 x 150 x 150 mm de cada composição para cada idade estudada.

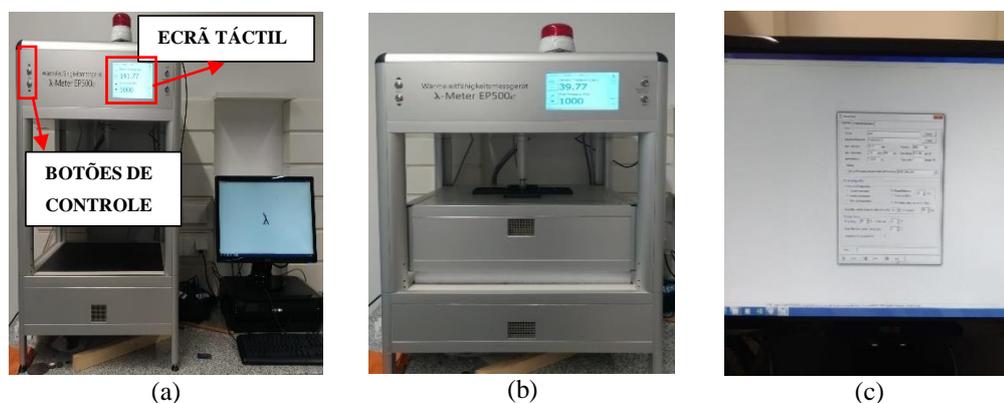
O equipamento utilizado foi um aparelho de placas quentes protegidas conhecido como *Thermal Conductivity Test Tool  $\lambda$ -Meter EP500e* da marca *Lambda-Meßtechnik*, que realiza o ensaio de acordo com a norma referida de maneira muito prática. Primeiramente, inseriu-se a amostra no equipamento seguindo os procedimentos do manual de instruções. Para isso ligou-se o equipamento, baixou-se através dos botões de controle a placa superior até que encostasse na placa inferior e no ecrã táctil do equipamento escolheu-se a opção *Zeroise Thickness*. Zerando-se a espessura, escolheu-se no ecrã táctil a pressão de 1000 Pa e com os botões de controle subiu-se a placa superior até que a abertura fosse suficiente para inserir o corpo de prova. Posteriormente, inseriu-se o corpo de prova envolto por material que não influi nos resultados e é disponibilizado pelo próprio equipamento, e escolheu-se a opção *Close* no ecrã táctil do equipamento, fazendo assim que a placa superior descesse até tocar por inteiro na amostra com a pressão escolhida. Com o corpo de prova inserido, abriu-se no computador com conexão ao equipamento o seu *software* e configurou-se o ensaio. Neste momento inseriu-se informações como massa da amostra, largura e comprimento (a espessura já fora medida no processo de inserção da amostra no equipamento e preencheu-se automaticamente), temperaturas de ensaio, diferença de temperatura entre placas e parâmetros de término do

ensaio. Os dados inseridos são apresentados no Quadro 16.

**Quadro 16 – Dados inseridos no software para configurar o ensaio**

Dados	Valores
Massa	Variável de acordo com o corpo de prova, mas no geral entre 1500 e 1600 g
Largura e comprimento	Fixo de 150 x 150 mm
Espessura	Mensurada na inserção da amostra, entretanto, com valores entre 39 e 41 mm
Temperaturas	Escolheu-se ensaiar duas temperaturas, 10°C e 20°C
Diferença de temperatura entre placas	5°C
Parâmetros de término de ensaio	1% de desvio ou 180 minutos (para cada temperatura escolhida)

Escolheu-se a temperatura de 10°C devido a ser utilizada por demais autores e pelas referências, já a temperatura de 20°C foi definida a fim de se obter uma análise de comportamento numa temperatura média um pouco mais elevada. Com o ensaio configurado, clicou-se em *Start* para iniciar. A duração de cada ensaio variou, uma vez que teve como parâmetros de término o momento em que se obtivesse valores com máximo de 1% de desvio em 180 minutos de ensaio para cada temperatura. Entretanto, a duração total (para as duas temperaturas) esteve entre 4 e 6 horas. Quando o ensaio se encerrou, foi possível obter-se diretamente no ecrã táctil do equipamento o valor do coeficiente de condutibilidade térmica assim como o desvio do mesmo nos últimos 15 minutos de ensaio. Resultados mais completos, com gráficos e demais informações, foram obtidos através do programa. A Figura 24 ilustra a realização do ensaio.



**Figura 24 – Realização do ensaio de condutibilidade térmica. (a) Equipamento *Thermal Conductivity Test Tool λ-Meter EP500e*; (b) Rebaixamento da placa superior até contato com o corpo de prova e início do ensaio; (c) Configuração do ensaio no *software***

### 3.4.8 Aderência

O ensaio de aderência utilizou a metodologia indicada pela norma EN 1015-12 (European Committee for Standardization, 2000) e foram utilizados três tijolos + argamassa por composição para cada idade analisada. Cada tijolo + argamassa utilizado forneceu dois corpos de prova, sendo realizado no total seis ensaios por composição em cada idade estudada.

O equipamento utilizado foi uma prensa hidráulica automática da marca *Shimadzu* com célula de carga para realização de ensaios deste tipo, que realizou uma aplicação de carga na velocidade de 1 mm/min de forma a respeitar o tempo indicado em norma para a ocorrência do arrancamento. Três dias antes do ensaio cortou-se os tijolos ao meio para que houvesse a separação de cada corpo de prova e lixou-se os espaços onde as placas metálicas de dimensões 50 x 50 mm seriam coladas de forma a melhorar o nivelamento da superfície e ter uma colagem mais eficiente, limpando-se ao término completamente o pó. No dia posterior, realizou-se a colagem aplicando-se uma camada fina de cola indicada para o processo sobre a área delimitada e pressionando-se a placa metálica por alguns segundos contra o tijolo. Depois de pressionar a placa metálica por alguns segundos, colocou-se os corpos de prova sobre bancada nivelada com pedaços de granito apoiados sobre as placas metálicas por 48 horas, visando manter a pressão sobre as mesmas e garantir uma boa colagem. Depois desse tempo, realizou-se os ensaios um a um aos corpos de prova, posicionando os mesmos na prensa e fixando-os à base com grampos. Os ensaios acabaram quando o arrancamento se deu e então anotou-se os resultados das cargas suportadas. Com a máxima carga aplicada, calculou-se a resistência ao arrancamento em MPa (N/mm<sup>2</sup>) através da Equação 13.

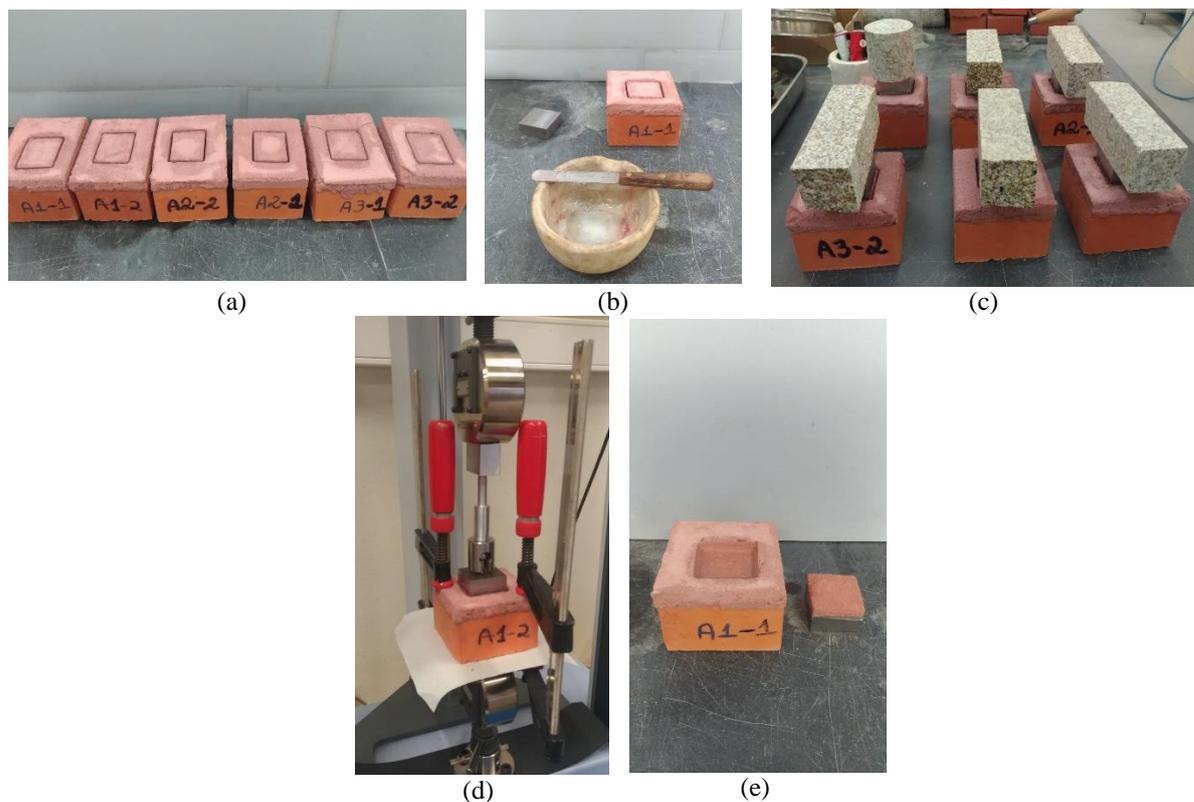
$$f_u = \frac{F_u}{A} \quad (13)$$

Onde:

$F_u$  – máxima carga aplicada (N);

$A$  – área da placa metálica (mm<sup>2</sup>).

A Figura 25 apresenta a realização do ensaio.



**Figura 25 - Realização do ensaio de aderência. (a) Corpos de prova separados e com superfície lixada; (b) Aplicação de cola e colagem da placa metálica; (c) Corpos de prova em bancada nivelada e com granito apoiado sobre as placas metálicas; (e) Corpo de prova posicionado no equipamento com grampos de fixação; (e) Corpo de prova com ensaio finalizado**

### 3.4.9 Absorção de água a baixa pressão

O ensaio de absorção de água a baixa pressão, ou conhecido como Tubo Karsten, utilizou a metodologia proposta na ficha do LNEC FE Pa 39.1 (Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2002) e foram usados dois tijolos por composição para cada idade analisada. Cada tijolo proporcionou três ensaios, o que totalizou seis ensaios por composição em cada idade estudada.

Os equipamentos utilizados foram vidrarias conhecidas como Tubo Karsten, massas de aderência e pisseta. Primeiramente, fixou-se cada tubo com a massa aderente ao tijolo de forma que o mesmo não se soltasse e não vazasse água ao ser enchido. Depois de devidamente fixados, encheu-se cada tubo com água até a marca de  $0 \text{ cm}^3$  e disparou-se o cronômetro. Foram medidos os volumes absorvidos nos tempos de 5, 10, 15, 20, 25, 30 e 60 minutos.

Com estas medições, foram realizados gráficos do volume de água absorvido em função do tempo. A inclinação das retas obtidas representa os coeficientes de absorção, entretanto, os mesmos puderam ser obtidos através da Equação 14 em  $\text{Kg}/(\text{m}^2 \cdot \sqrt{h})$ .

$$C_{\text{absorção}} = \frac{X \times 10^{-3}}{d^2 \times \left(\frac{\pi}{4} \times 10^{-6} \times \sqrt{t}\right)} \quad (14)$$

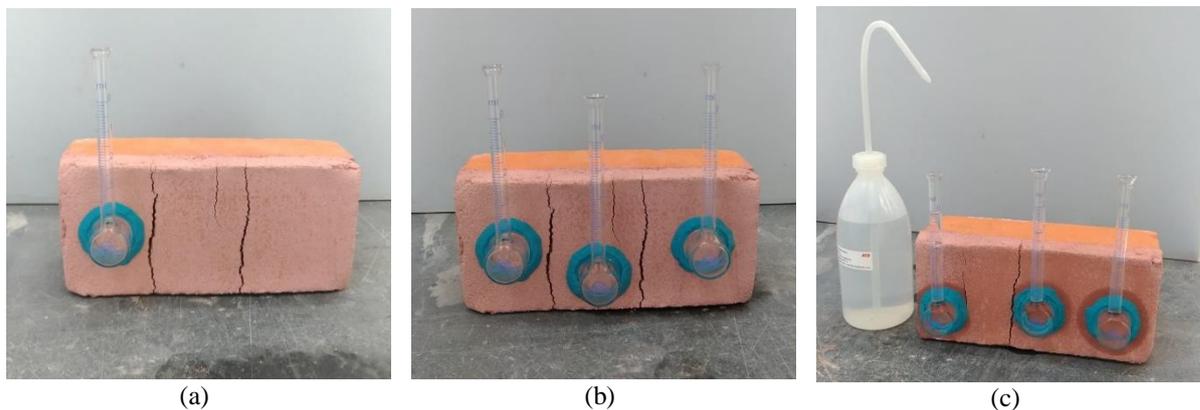
Onde:

X – quantidade de água absorvida durante um intervalo de tempo (ml);

d – diâmetro da superfície de penetração da água (mm);

t – intervalo de tempo (h).

A Figura 26 ilustra a realização do ensaio.



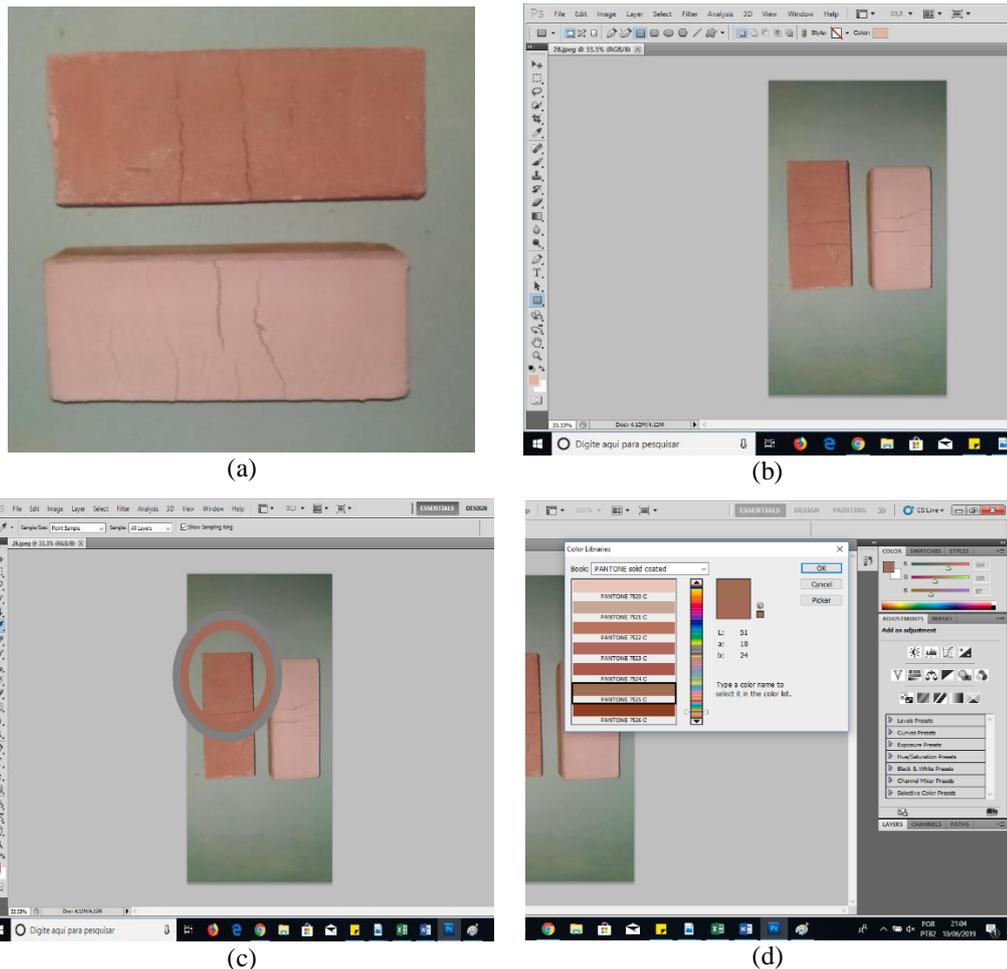
**Figura 26 – Realização do ensaio de absorção de água a baixa pressão. (a) Fixação do tubo Karsten no tijolo; (b) Tubos fixados e prontos para início do ensaio; (c) Tubos preenchidos com água e disparo do cronômetro**

### 3.4.10 Análise da cor

A análise da cor teve o intuito de avaliar o comportamento da coloração da argamassa com o passar do tempo, curando em condições padrões em câmara e ao ar livre (dentro do laboratório). Este ensaio não seguiu nenhuma normativa e foi realizado empiricamente. Foram utilizados dois corpos de prova por composição (um para cada cura) para todas as idades. Os corpos de prova que curaram ao ar livre foram nomeados de V1-2 (Composição 1), V2-2 (Composição 2) e V3-1 (Composição 3); já os de cura em câmara foram chamados de V1-1 (Composição 1), V2-1 (Composição 2) e V3-2 (Composição 3).

Como ferramenta de auxílio utilizou-se o *software Adobe Photoshop* de forma a aferir-se corretamente as mudanças de cor. Para realizar esta análise, primeiramente tirou-se fotos de cada corpo de prova na idade em que se desejava analisar e em mesmas condições de luz.

Posteriormente, abriu-se cada foto no *software* acima mencionado e com a ferramenta de “conta-gotas”, coletou-se uma amostra da coloração da argamassa, comparando-a então com uma fita de cores do próprio programa. A fita de cores foi acessada através da barra de cores lateral que aparece ao abrir a foto no *software*. Clicou-se no quadrado onde a cor coletada aparecia, escolheu-se a opção “*Color Libraries*” e então visualizou-se a fita. Dessa forma, foi possível perceber se houve variações na pigmentação comparando-se as amostras de cada idade do mesmo corpo de prova. A Figura 27 ilustra a realização desta análise.



**Figura 27 – Realização da análise de cor. (a) Foto dos corpos de prova; (b) Abertura da foto no Adobe PhotoShop; (c) Utilização da ferramenta “conta-gotas”; (d) Análise da cor utilizando a fita de cores do PhotoShop contida na “Color Libraries”**

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

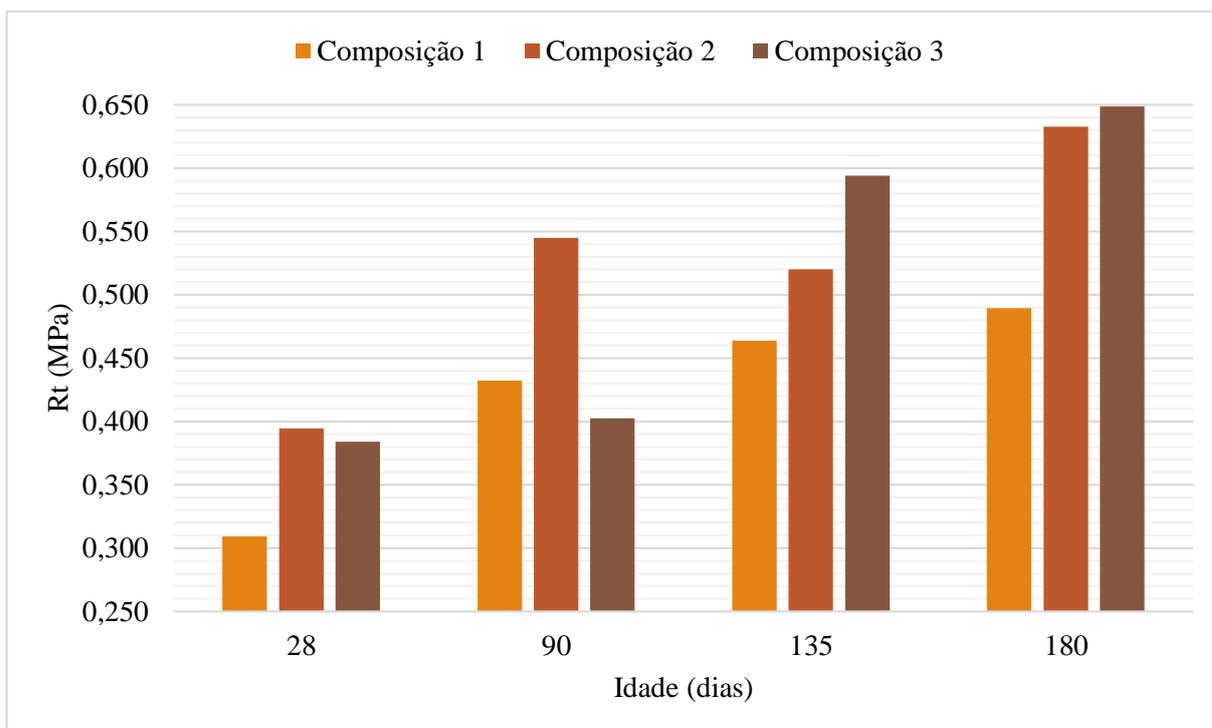
Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados aos corpos de prova, assim como sua análise e discussão. Para os ensaios de resistência a flexão, resistência à compressão, massa volúmica e retração foram realizados nas idades de 28, 90, 135 e 180 dias. Os ensaios de absorção de água por capilaridade, secagem e aderência foram realizados aos 28, 90 e 135 dias. O ensaio de absorção de água a baixa pressão foi realizado nas idades de 28 e 60 dias. Já o de condutibilidade térmica foi realizado aos 28, 60 e 90 dias. A idade máxima ensaiada foi 180 dias devido ao tempo disponível para realização da dissertação, já a não padronização de realização dos ensaios em mesmas idades foi decorrente de imprevistos que ocorreram ao longo da execução deste trabalho.

### 4.1 RESISTÊNCIA À FLEXÃO

Ao término dos ensaios de flexão em cada idade, foram realizados a cada corpo de prova os cálculos da resistência à flexão utilizando a Equação 7. Com os valores obtidos, calculou-se a média aritmética e desvios padrão para cada composição. Estes resultados são apresentados no Quadro 17 e seu desenvolvimento é ilustrado na Figura 28.

**Quadro 17 – Média aritmética de três corpos de prova e desvios padrão dos valores de resistência à flexão de cada composição**

Argamassa	Rf (MPa)							
	28		90		135		180	
	Média	D.P	Média	D.P	Média	D.P	Média	D.P
Composição 1	0,30910	0,11429	0,43237	0,10798	0,46388	0,04925	0,48953	0,08468
Composição 2	0,39463	0,08360	0,54475	0,04807	0,52029	0,08664	0,63271	0,05626
Composição 3	0,38393	0,02122	0,40241	0,03815	0,59419	0,11398	0,64864	0,03612



**Figura 28 – Resistência à flexão média de todas as composições nas idades de 28, 90, 135 e 180 dias**

A média mais baixa foi apresentada pela Composição 1 (referência) aos 28 dias, enquanto que a maior foi obtida pela Composição 3 (30% de pó de tijolo) aos 180 dias. Percebe-se que as Composições 1 e 3 apresentam um comportamento similar, onde a resistência aumentou com o passar do tempo. Já a Composição 2 (15% de pó de tijolo), apresenta um grande acréscimo de resistência dos 28 para os 90 dias, um pequeno decréscimo dos 90 para os 135 dias, voltando a crescer dos 135 para os 180 dias. Observa-se que aos 28 dias, a Composição 1 apresenta a menor resistência, a Composição 2 o melhor resultado e a Composição 3 o resultado intermediário. Aos 90 dias, a Composição 2 continua com o melhor resultado, enquanto as Composições 1 e 3 invertem a representatividade. Já a partir dos 135 dias, a Composição 1 retorna ao menor valor de resistência, enquanto que a Composição 2 apresenta valor intermediário e a Composição 3 passa a apresentar o melhor resultado de resistência. Tais avaliações permitem compreender que a substituição da cal por pó de tijolo confere à argamassa incrementos de resistência de diferentes modos e proporções com o passar do tempo. A curto prazo (28 a 90 dias) percebem-se melhores resultados com menor percentual de substituição por pó de tijolo (15%), já a longo prazo (135 e 180 dias) observam-se melhores resultados com a maior substituição (30%).

Matias, Faria e Torres (2014a) analisaram argamassas com substituições de 10% e 20% de cal por resíduo de tijolo com granulometria inferior a 0,063 mm, e obtiveram resultados de

resistência à flexão aos 60 dias entre 0,2 e 0,4 MPa para ambas, sendo que a composição com menor percentual de substituição (10%) apresentou o valor mais alto e próximo de 0,4 MPa. Tal comportamento, coincide com o obtido neste trabalho, o qual indica que a curto prazo (até 90 dias) menores substituições por pó de tijolo conferem melhor resultado para resistência à flexão. Aponta-se que os valores obtidos pelas autoras aos 60 dias, são menores que os obtidos no presente trabalho aos 28 dias (mais baixos resultados apresentados). Este fator pode indicar a influência da granulometria do pó de tijolo utilizado no ganho de resistência à flexão, sendo os acréscimos melhorados com granulometrias maiores que 0,063 mm.

Santos e Veiga (2012) apresentam como valores indicados para resistência à flexão em argamassas de substituição em edifícios antigos (Quadro 6), o intervalo de 0,20 a 0,70 MPa quando revestimentos interior e exterior, e os limites de 0,40 a 0,80 MPa no caso de juntas. Comparando os resultados obtidos neste trabalho com os indicados pelas autoras, observa-se que todas as composições se apresentam, independentemente da idade analisada, dentro dos limites apresentados para rebocos. Para a utilização como juntas, todas as composições passam a se situar dentro dos valores limitantes apenas aos 90 dias, sendo que aos 28 dias nenhuma apresenta resultados acima de 0,40 MPa.

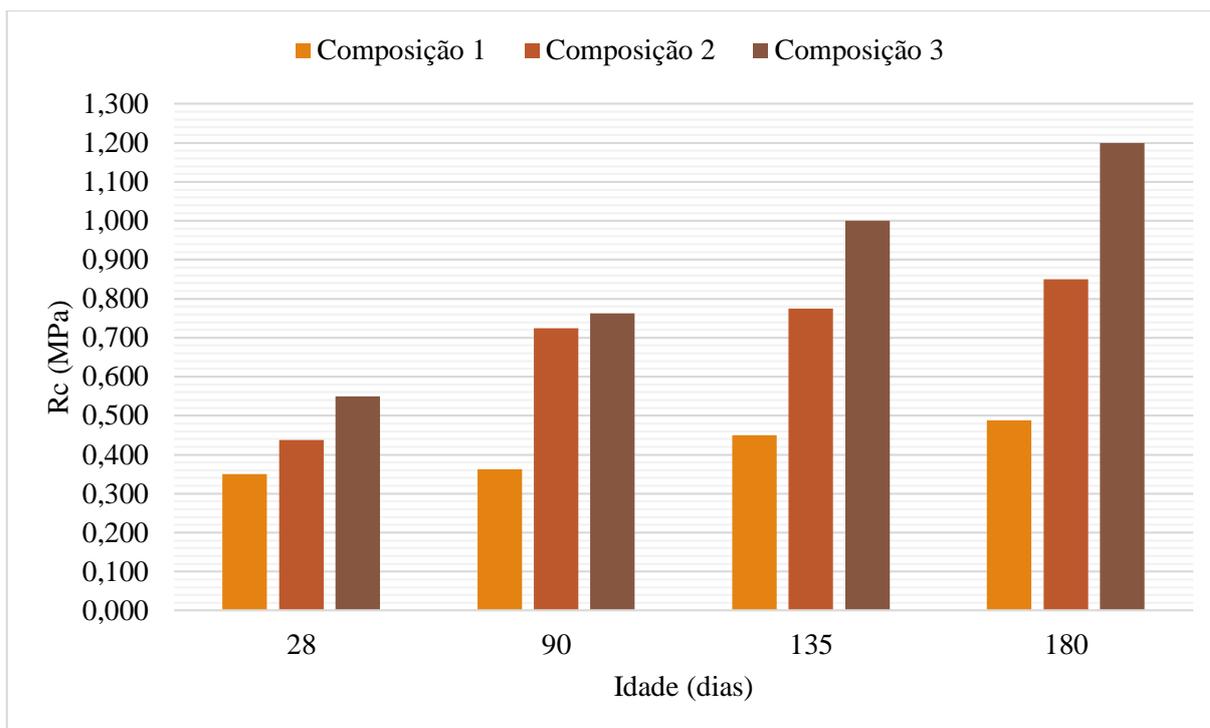
#### 4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Após a execução do ensaio de compressão aos corpos de prova, realizou-se o cálculo da resistência à compressão através da Equação 8. Aos valores obtidos, calculou-se a média aritmética e os desvios padrão a cada idade analisada. Estes resultados são apresentados no Quadro 18.

**Quadro 18 - Média aritmética de seis corpos de prova e desvios padrão dos valores de resistência à compressão de cada composição**

Argamassa	Rc (MPa)							
	28		90		135		180	
	Média	D.P	Média	D.P	Média	D.P	Média	D.P
Composição 1	0,350	0,077	0,363	0,056	0,450	0,095	0,488	0,041
Composição 2	0,438	0,056	0,725	0,039	0,775	0,077	0,850	0,061
Composição 3	0,550	0,039	0,763	0,146	1,000	0,131	1,200	0,095

A evolução dos resultados das argamassas nas diferentes idades pode ser percebida na Figura 29.



**Figura 29 – Resistência à compressão média de todas as composições nas idades de 28, 90, 135 e 180 dias**

Em todas as idades analisadas, observa-se que a Composição 1 (referência) apresenta as médias mais baixas, a Composição 2 (15% de pó de tijolo) apresenta valores intermediários enquanto que a Composição 3 (30% de pó de tijolo) apresenta os valores mais altos de resistência. Isto permite perceber que a substituição da cal por pó de tijolo possibilita o ganho de resistência à compressão, sendo o mesmo maior conforme se eleva o percentual de alteração. Analisando a mesma composição nas diferentes idades, percebe-se que todas tiveram acréscimo de resistência com o passar do tempo, entretanto, com valores iniciais de resistência diferentes.

Matias, Faria e Torres (2014a) analisaram argamassas com substituições de 10% e 20% de cal por resíduo de tijolo com granulometria inferior a 0,063 mm, e obtiveram valores de resistência à compressão aos 60 dias entre 0,40 e 0,60 MPa (argamassa com 10% de substituição) e 1,2 e 1,4 MPa (argamassa com 20% de substituição). Percebe-se que assim como os resultados obtidos no presente trabalho, os resultados das autoras confirmam que a maior substituição de cal por pó de tijolo confere à argamassa maior resistência à compressão. Aponta-se que a argamassa com 10% de pó de tijolo das autoras aos 60 dias apresenta valores similares de resistência aos obtidos aos 28 dias pela Composição 2 (15% de pó de tijolo) do presente trabalho. Da mesma forma, nota-se que o valor obtido aos 60 dias para a argamassa com 20% de pó de tijolo das autoras é superior ao obtido pela composição de melhor resultado neste

trabalho (Composição 3 aos 180 dias). Tais observações podem indicar influência da granulometria do pó de tijolo utilizado, a curto e longo prazo, no ganho de resistência à compressão.

De acordo com os valores indicados por Santos e Veiga (2012) para argamassas de substituição em edifícios antigos e que são apresentados no Quadro 6 do presente trabalho, os resultados obtidos para as Composições 2 e 3 em todas as idades se encontram na faixa aceitável para utilização como reboco exterior e interior. A partir dos 90 dias, estas composições passam a apresentar resultados dentro do intervalo aceitável para uso em juntas. Já a Composição 1 apresenta resultados dentro da faixa aceitável para uso em rebocos interiores e exteriores a partir dos 135 dias, e não apresenta valores dentro do indicado para uso em juntas em nenhuma idade analisada.

#### 4.3 MASSA VOLÚMICA

A fim de minimizar os erros, marcou-se pontos específicos dos corpos de prova de modo que sempre as medições ocorressem no mesmo lugar. Mesmo assim, a irregularidade de uma das faces e a degradação dos vértices e arestas, são fatores que podem ter influenciado nos resultados. Após medir-se as dimensões de cada corpo de prova na idade estudada e pesar-se sua massa na balança, utilizou-se a Equação 9 para obter-se a massa volúmica. Posteriormente, calculou-se a média aritmética destes valores assim como seu desvio padrão. Os resultados encontrados são apresentados no Quadro 19 e sua evolução é ilustrada na Figura 30.

**Quadro 19 – Média aritmética de seis corpos de prova e desvios padrão dos resultados de massa volúmica de cada composição**

Argamassa	Massa Volúmica (g/cm <sup>3</sup> )							
	28		90		135		180	
	Média	D.P	Média	D.P	Média	D.P	Média	D.P
Composição 1	1,736	0,036	1,694	0,020	1,705	0,019	1,793	0,197
Composição 2	1,742	0,031	1,720	0,018	1,727	0,015	1,723	0,015
Composição 3	1,719	0,026	1,706	0,018	1,713	0,011	1,713	0,011

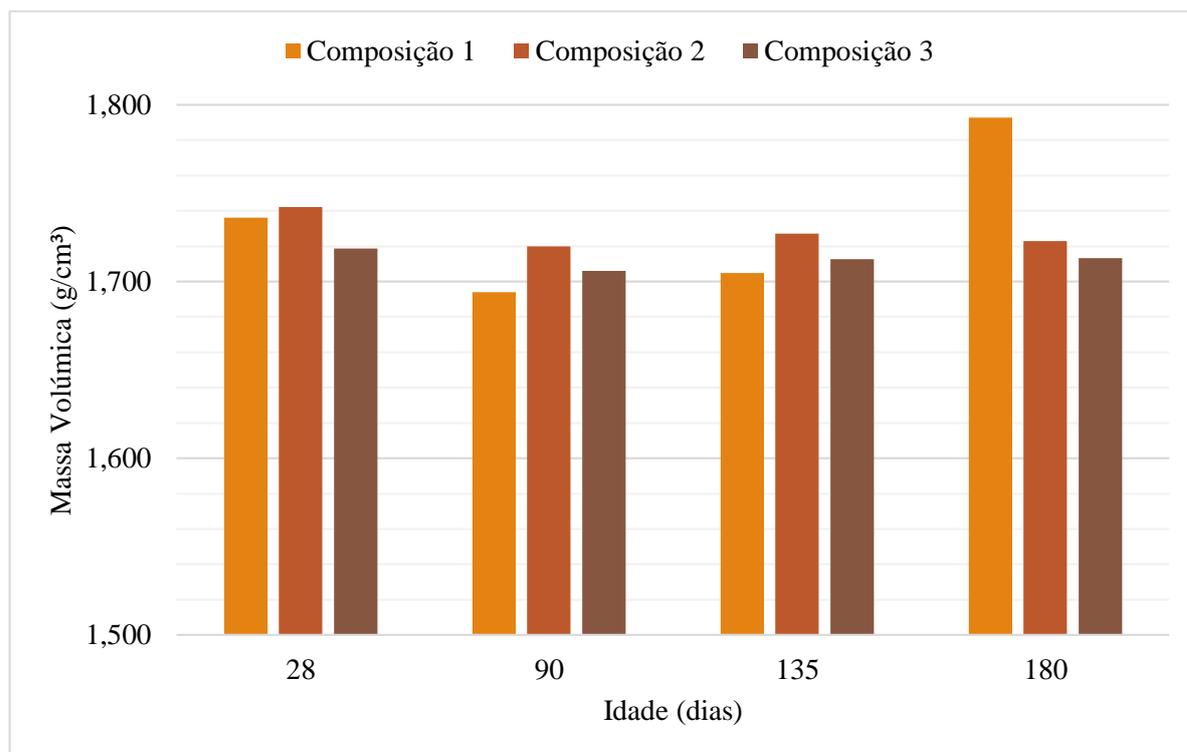


Figura 30 – Massa volúmica média de todas as composições nas idades de 28, 90, 135 e 180 dias

Observa-se que nenhuma composição apresenta variação significativa ao longo do período de cura. Tais fatores fazem com que não se registre nenhuma diferença evidente devido à substituição da cal por pó de tijolo, contudo, devido à maior constância das composições com pó de tijolo, pode-se pensar que estas apresentam maior estabilidade de valores de massa volúmica devido à inserção do mesmo.

No trabalho realizado por Matias (2014), ao analisar argamassas com inserção de pó de tijolo com frações granulométrica finas (menor que 0,063mm) e grossas (maior que 0,063mm), a autora obteve aos 60 dias valores de massa volúmica de 1,846 e 1,663 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente. Comparando os resultados da autora com os do presente trabalho, percebe-se que o valor encontrado para a massa volúmica da sua composição fina aos 60 dias, é superior ao encontrado para a sua composição grossa e também ao maior valor apresentado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** deste trabalho. Isto nos permite notar que a granulometria utilizada de pó de tijolo pode ter influência na massa volúmica do material fabricado, sendo maior conforme o teor de finos.

Moropoulou, Bakolas e Aggelakopoulou (2005) apresentam como dados obtidos em estudos realizados para caracterização de argamassas antigas, valores de massa volúmica entre 1,6 e 1,9 g/cm<sup>3</sup>, para este tipo de revestimento quando composto por cal e pozolanas naturais. Observa-se que os resultados obtidos em todas as composições e idades estudadas, estão dentro

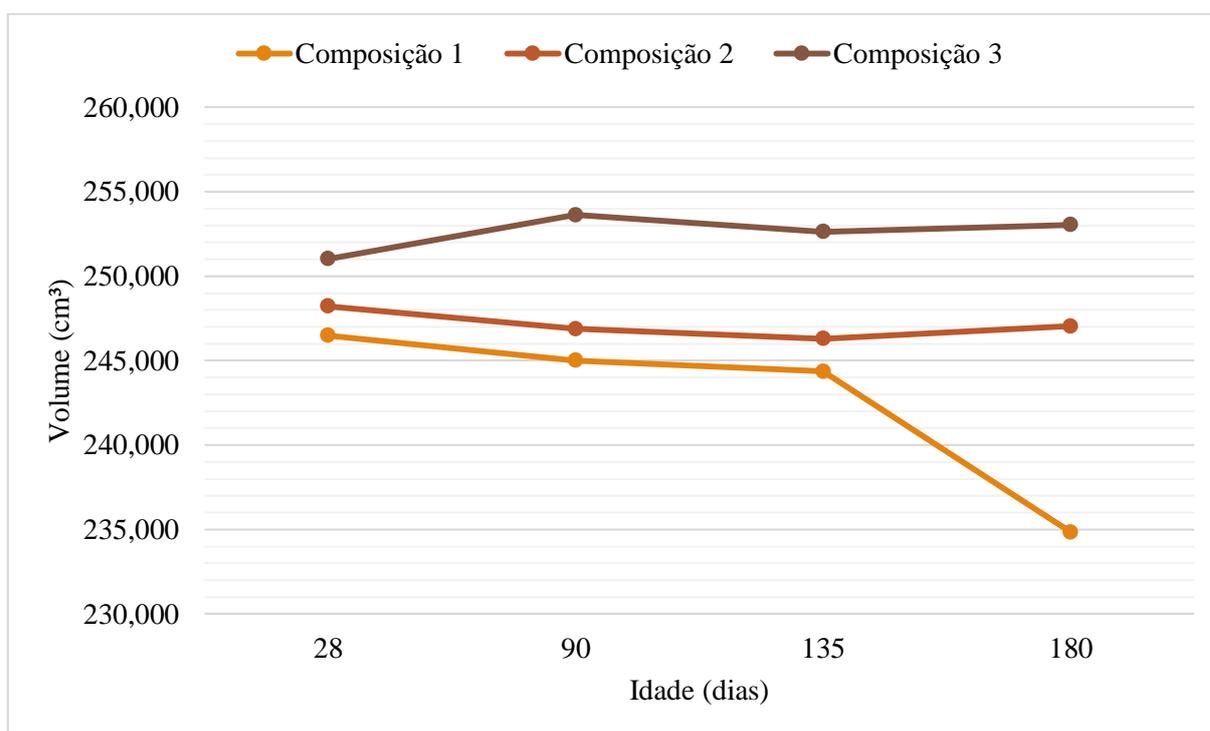
deste intervalo encontrado pelos autores. Tal fator permite perceber a compatibilidade das argamassas estudadas com as já existentes em edifícios antigos, princípio fundamental que se busca atingir quanto aos materiais a serem utilizados em ações de reabilitação e reparação.

#### 4.4 RETRAÇÃO

A retração foi avaliada a partir da variação das dimensões dos corpos de prova e da avaliação visual do surgimento de fissuras. Após medir-se os corpos de prova com o paquímetro, calculou-se os volumes e posteriormente as médias aritméticas e desvios padrão aos valores obtidos em cada idade. O Quadro 20 apresenta os resultados obtidos e a Figura 31 ilustra o desenvolvimento destas grandezas.

**Quadro 20 – Média aritmética de seis corpos de prova e desvios padrão do volume de cada composição**

Argamassa	Volume (cm <sup>3</sup> )							
	28		90		135		180	
	Média	D.P	Média	D.P	Média	D.P	Média	D.P
Composição 1	246,493	3,662	245,003	3,134	244,359	3,159	234,843	23,756
Composição 2	248,215	2,795	246,881	2,874	246,299	2,844	247,037	2,790
Composição 3	251,031	4,175	253,629	3,433	252,637	3,023	253,045	0,855



**Figura 31 – Variação do volume médio nas idades de 28, 90, 135 e 180 dias**

Percebe-se que as composições não apresentam mesmo comportamento ao longo do tempo. A Composição 1 apresenta decréscimos de valores em todas as idades, a Composição 2 apresenta decréscimos até os 135 dias e desta idade para os 180 dias apresenta elevação dos resultados, já a Composição 3 apresenta aumento dos 28 para os 90 dias, declínio dos 90 para os 135 dias e novo aumento dos 135 para os 180 dias. A variação do volume relaciona-se com o processo de cura da argamassa, portanto, a perda de água que ocorre na mesma pode ser a causa da diminuição destes valores. Observa-se através da curva que com exceção dos 180 dias, a quantidade da variação é muito similar entre a Composição 1 e 2, mesmo que os valores não sejam os mesmos. Quanto à avaliação visual, não se constatou o surgimento de fissuras ou sinais que indicassem a retração significativa do material. Tais resultados não possibilitam o registro de diferenças significativas quanto à inserção de pó de tijolo nas composições, entretanto, percebe-se que o não surgimento de fissuras nos corpos de prova prismáticos de 40 x 40 x 160 mm é um resultado positivo, uma vez que o surgimento destas fragilizam o material.

Na fabricação dos corpos de prova em tijolo para os ensaios de absorção de água à baixa pressão, análise visual e aderência, percebeu-se visualmente o surgimento de fissuras em alguns logo após a desfôrma ou com poucos minutos de cura. Mesmo que não tenham sido confeccionados para este fim, tais corpos de prova proporcionaram resultados quanto à retração. Como o surgimento não se deu em todos os tijolos confeccionados, e que quando ocorreu não se deu de maneira igual, deve-se levar em consideração como principais intervenientes o modo de aplicação da argamassa nos tijolos, o prendimento da argamassa nos moldes de madeira e a saturação do suporte, uma vez que são fatores dos quais mesmo com extremo rigor de execução e controle não se consegue exatidão.

#### 4.5 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Após a realização dos ensaios em cada idade analisada, calculou-se o coeficiente de absorção de água por capilaridade de cada corpo através da aplicação de regressão linear às curvas de absorção. Além disso, obteve-se o valor assintótico de absorção, que consiste na massa total absorvida de água ao término do período de ensaio. Aos valores assintóticos foi realizado o cálculo da média aritmética e desvio padrão. Os resultados encontrados para o coeficiente de absorção geral e valores assintóticos deste intervalo de ensaio (0, 10 e 90

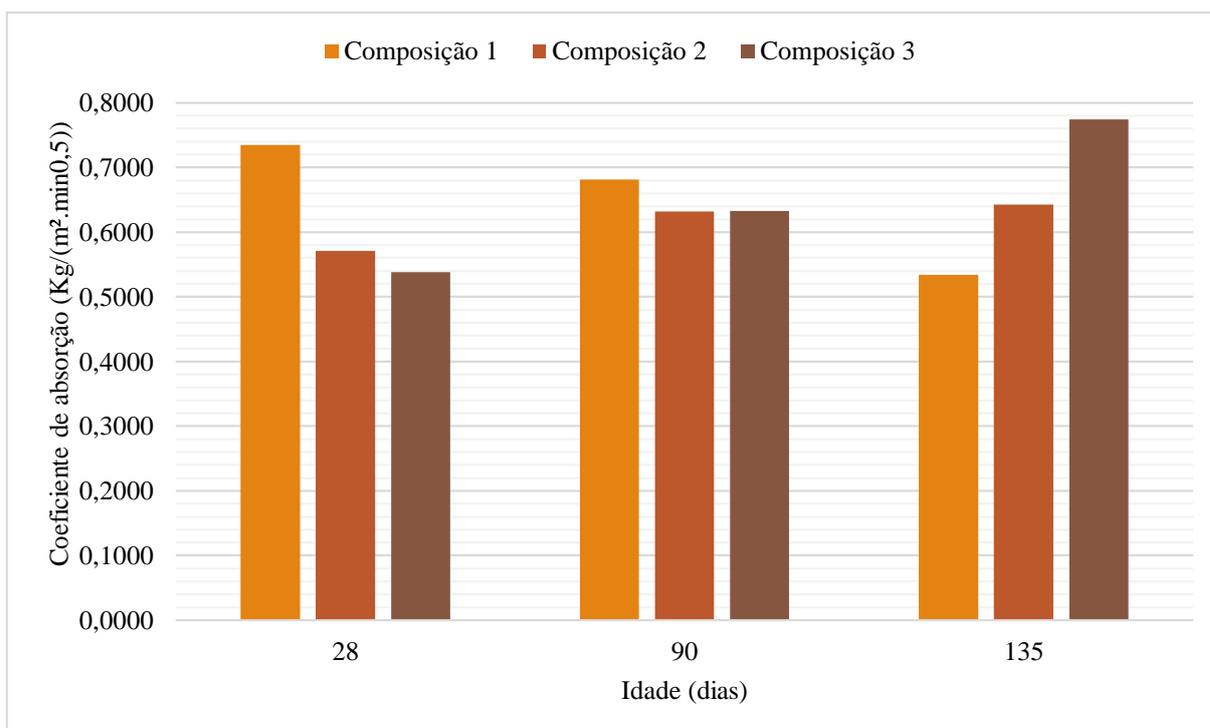
minutos) são apresentados nos Quadro 21 e Quadro 22, sendo suas evoluções ao longo do tempo são ilustradas na Figura 32 e Figura 33.

**Quadro 21 – Coeficientes de absorção de água por capilaridade**

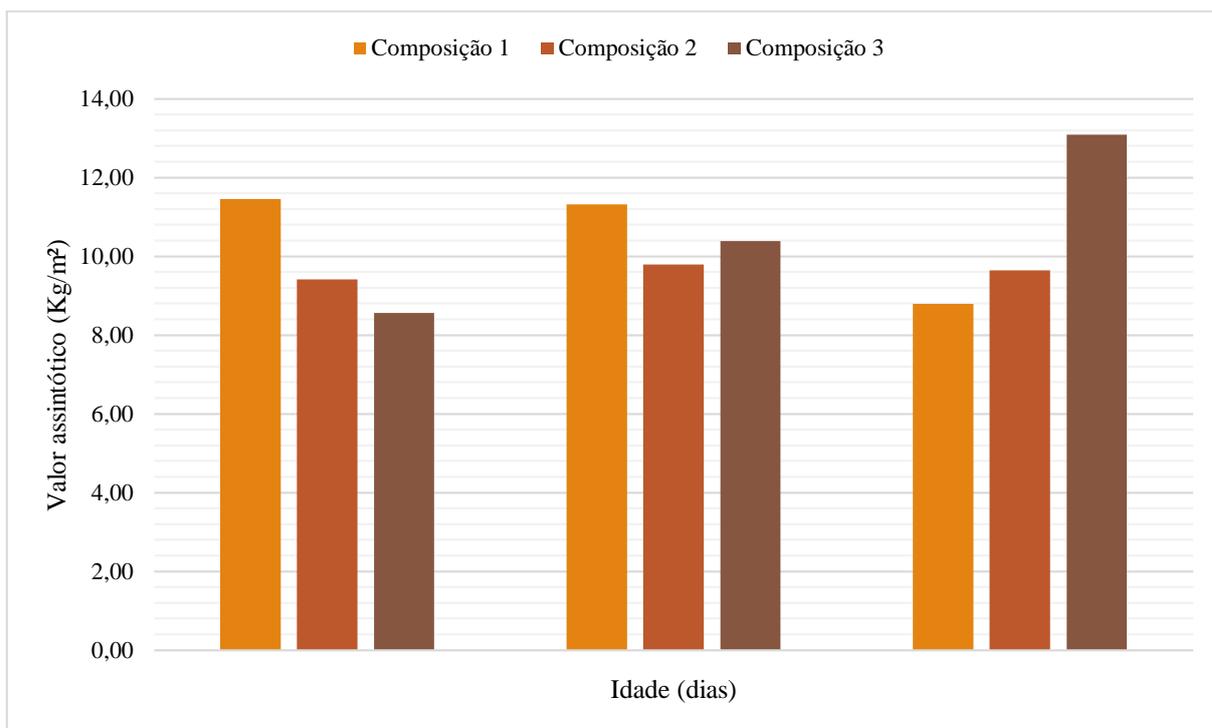
Argamassa	Coeficiente de absorção (Kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> ))		
	28	90	135
Composição 1	0,7345	0,6810	0,5342
Composição 2	0,5712	0,6318	0,6427
Composição 3	0,5378	0,6325	0,7746

**Quadro 22 – Média aritmética de três corpos de prova e desvios padrão dos valores assintóticos de absorção de água por capilaridade**

Argamassa	Valor assintótico (g)					
	28		90		135	
	Média	D.P	Média	D.P	Média	D.P
Composição 1	28,62	1,25	28,29	0,66	21,97	4,09
Composição 2	23,54	1,03	24,49	0,98	24,11	2,08
Composição 3	21,40	0,38	25,96	3,47	32,71	1,36



**Figura 32 – Variação do coeficiente de absorção de água por capilaridade de todas as composições nas idades de 28, 90 e 135 dias**



**Figura 33 – Valores assintóticos de absorção médios de todas as composições nas idades de 28, 90 e 135 dias**

Não foi possível obter um mesmo padrão de absorção ao longo do tempo para todas as composições. Observa-se que aos 28 dias a Composição 1 apresenta os maiores valores de absorção (coeficiente e assintótico), a Composição 2 os intermediários e a Composição 3 os mais baixos. Aos 90 dias, esse comportamento se altera, e a Composição 2 passa a apresentar os menores valores, a Composição 3 os intermediários, enquanto que a Composição 1 continua com os mais elevados. Já aos 135 dias, a Composição 1 exibe os valores mais baixos, a Composição 2 os intermediários e a Composição 3 os maiores. Tais observações possibilitam o entendimento de que até os 90 dias o acréscimo de pó de tijolo nas formulações provavelmente proporciona benefícios ao comportamento à água, uma vez que reduzem a taxa de absorção da argamassa. Entretanto, aos 135 dias, e talvez a maiores prazos, estes benefícios se findam e as composições com pó de tijolo apresentam os maiores valores de absorção, o que pode indicar a não melhora de comportamento com a inclusão do mesmo a longo prazo. Quanto à proporção de pó de tijolo, observa-se que o maior percentual de substituição (30%) condiciona a melhor resultado inicial (até 28 dias), entretanto, nas demais idades o menor percentual parece conferir melhores resultados à argamassa.

Ao analisar argamassas de cal aérea no traço 1:2, com inserções de pó de tijolo de diferentes granulometrias e percentuais em substituição ao ligante, Matias (2014) obteve aos 60 dias coeficientes de absorção de água por capilaridade iguais a 2,27 e 2,33 Kg/(m<sup>2</sup>.min<sup>0,5</sup>),

para composições com 20% de pó de tijolo e granulometrias inferior a 0,063 mm e superior a 0,063 mm, respectivamente. Observa-se que tais resultados são maiores que o mais alto valor obtido no presente trabalho, que foi exibido pela Composição 3 aos 135 dias. Tal fator possibilita perceber que no traço utilizado (1:2) a granulometria do pó de tijolo utilizado tem influência nos resultados e que frações com abundância de finos não conferem resultados satisfatórios.

Analisando a mesma composição ao longo do tempo, observa-se que as composições com pó de tijolo (Composição 2 e 3) apresentaram a tendência de crescimento de resultados ao longo do tempo, enquanto que a Composição 1 apresentou decréscimo. Quando Matias (2012) analisou argamassas do mesmo tipo, mas no traço 1:3, obteve resultados de coeficiente de absorção mais elevados do que os encontrados no presente trabalho, e com diferentes comportamentos dependendo do percentual utilizado. Para 10% de pó de tijolo, encontrou resultados entre 1,18 e 1,27 Kg/(m<sup>2</sup>.min<sup>0,5</sup>), e o comportamento observado foi de elevação do coeficiente de absorção dos 60 para os 120 dias, mas que voltou a diminuir dos 120 para os 365 dias. Já para 20% de pó de tijolo, os resultados variaram entre 1,36 e 1,65 Kg/(m<sup>2</sup>.min<sup>0,5</sup>), e percebeu-se que os valores cresceram ao longo do tempo. Isto faz notar que assim como no presente trabalho, que independentemente do traço ou granulometria do pó de tijolo, maiores percentuais de substituição conduzem a resultados mais elevados em algum momento e de comportamento ascendente. No traço utilizado pela autora, estes aumentos são maiores ao longo do tempo, o que pode indicar a influência do traço no desempenho à água e que seja menos eficiente do que 1:2 neste quesito. Comparando os resultados obtidos por Matias (2014) para ambos os traços e os do presente trabalho, observa-se também que de forma geral, para o traço 1:2 a utilização de granulometria mais grossa (maior que 0,063 mm) conduz a melhores resultados. Já no traço 1:3, a utilização de menores partículas é mais benéfica no comportamento à água. Além disso, analisando o comportamento apresentado das composições com pó de tijolo de crescimento de valores enquanto que a de referência apresenta decréscimo, percebe-se que tal fator pode ser decorrente da água necessária e absorvida para a hidratação do próprio pó de tijolo.

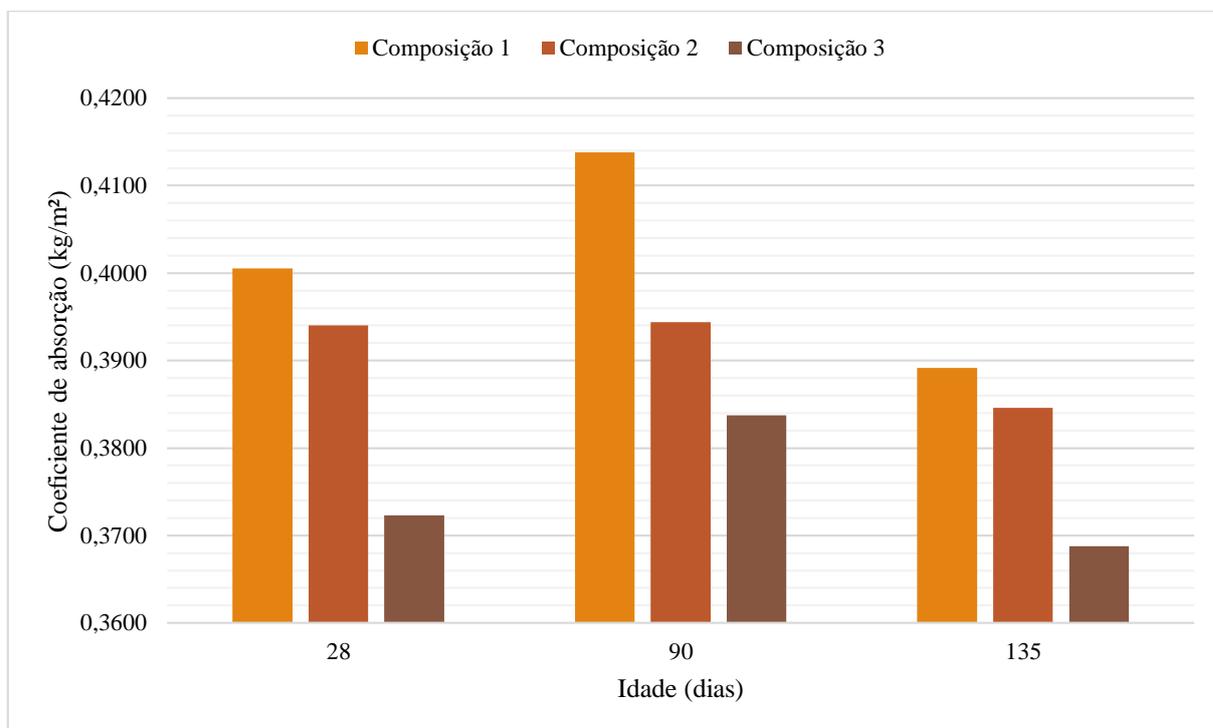
Santos e Veiga (2012) apresentam como valores indicados para coeficientes de absorção em argamassas para utilização em rebocos ou juntas, o intervalo de 1 a 1,5 Kg/(m<sup>2</sup>.min<sup>0,5</sup>). Nota-se que não há resultados situados dentro destes limites, uma vez que em todas as composições os valores não ultrapassam 0,80 Kg/(m<sup>2</sup>.min<sup>0,5</sup>). Entretanto, como percebe-se comportamento ascendente nas Composições 1 e 2, a maiores prazos, provavelmente atinjam o

intervalo indicado pelas autoras. Observa-se que os valores assintóticos seguem em todos os casos, o comportamento do coeficiente de absorção para a respectiva composição.

Conforme apresentado no programa experimental, para analisar a aptidão como argamassa de renovação leva-se em consideração outro intervalo de tempo, e o coeficiente de absorção foi calculado através da regressão da curva de absorção confeccionada para este caso, levando em consideração os instantes de 0 e 1440 minutos (24 horas). O Quadro 23 apresenta os resultados encontrados para os coeficientes de absorção utilizando o intervalo de tempo indicado para argamassas de renovação e a Figura 34 seu desenvolvimento.

**Quadro 23 - Coeficiente de absorção considerando procedimento de cálculo para argamassas de renovação**

Argamassa	Coeficiente de absorção (Kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> ))		
	28	90	135
Composição 1	0,4005	0,4138	0,3892
Composição 2	0,3941	0,3944	0,3846
Composição 3	0,3723	0,3838	0,3688



**Figura 34 – Variação do coeficiente de absorção de água por capilaridade considerando argamassa de renovação de todas as composições nas idades de 28, 90 e 135 dias**

Observa-se comportamento similar para todas as composições, entretanto, as Composições 2 e 3 apresentam valores mais baixos que a Composição 1. Todas as formulações

apresentam crescimento de valores dos 28 para os 90 dias, mas decréscimo dos 90 para os 135 dias. Percebe-se que em todas as idades a Composição 1 apresenta os maiores valores, a Composição 2 os intermediários e a Composição 3 os menores. Dessa forma, nota-se que quando considerado o intervalo de tempo indicado para avaliar argamassas para renovação, a inclusão do pó de tijolo confere melhor comportamento à água, visto que os coeficientes de absorção são menores. Percebe-se também que quanto maior o percentual de substituição, menores os coeficientes e conseqüentemente melhor o comportamento à água.

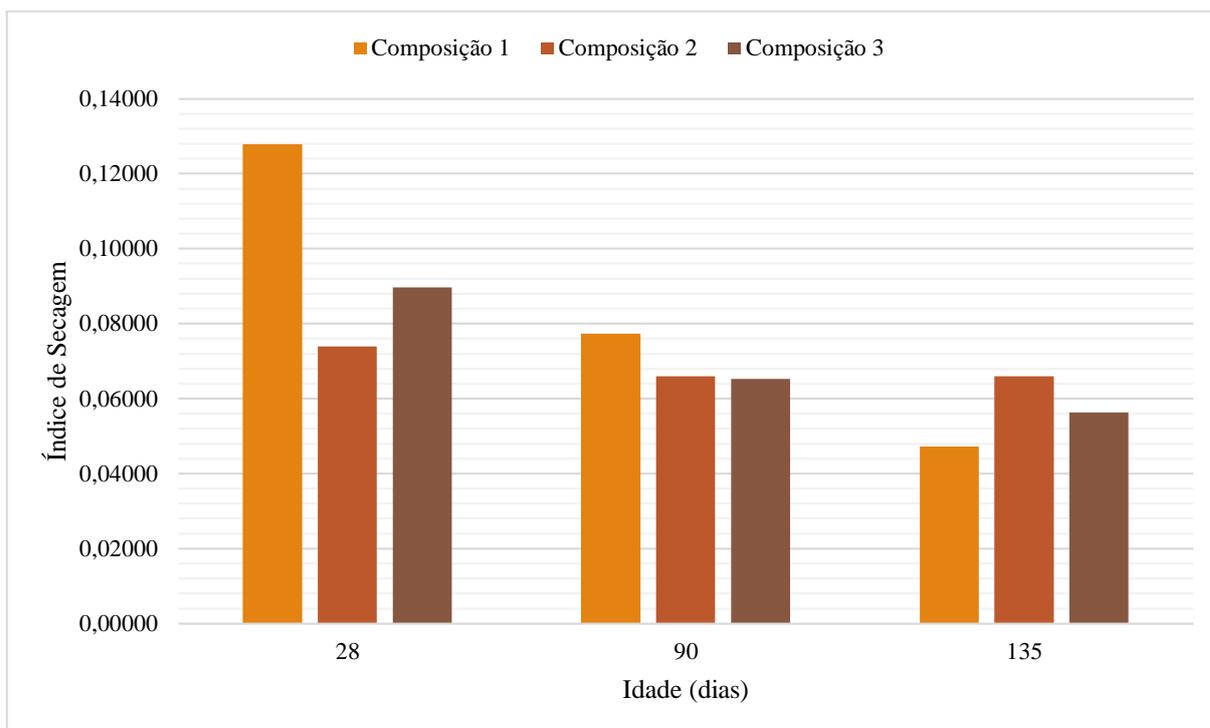
Comparando com o valor indicado como requisito para argamassas de renovação pela norma EN 998-1 (European Committee Standardization, 2016), que é coeficiente de absorção igual ou maior que 0,3 kg/m<sup>3</sup>, nota-se que os resultados encontrados são adequados uma vez que se apresentam dentro desta condição.

#### 4.6 SECAGEM

Após o término do ensaio de secagem, que se deu quando a diferença entre as medições foi inferior a 1% da massa seca do corpo de prova analisado, e depois que os valores voltam a aumentar, calculou-se o índice de secagem de cada instante analisado através da Equação 12. Aos resultados obtidos, realizou-se as médias aritméticas e desvios padrão encontrando-se assim os índices de secagem médios que são exibidos no Quadro 24. Já a Figura 35 ilustra seu comportamento ao longo do tempo.

**Quadro 24 – Média aritmética de três corpos de prova e desvios padrão dos valores de índice de secagem de cada composição**

Argamassa	Índice de Secagem (adimensional)					
	28		90		135	
	Média	D.P	Média	D.P	Média	D.P
Composição 1	0,12788	0,04448	0,07739	0,05003	0,04722	0,02360
Composição 2	0,07397	0,02184	0,06598	0,02839	0,06595	0,03405
Composição 3	0,08970	0,05447	0,06521	0,02639	0,05636	0,03876



**Figura 35 – Índice de secagem médio para as idades de 28, 90 e 135 dias**

Todas as composições apresentam mesmo padrão de decréscimo de valores ao passar do tempo, entretanto, as com pó de tijolo apresentam menores índices de secagem iniciais. Aos 28 dias, a Composição 1 exibe o maior índice de secagem, a Composição 2 o menor e a Composição 3 o intermediário. Já aos 90 dias, a Composição 1 mantém o maior valor enquanto que as Composições 2 e 3 apresentam valores muito próximos. Por fim aos 135 dias a Composição 1 exibe o menor índice de secagem, a Composição 2 o intermediário e a Composição 3 o menor. Com isso, pode-se associar que a inclusão do pó de tijolo na formulação conduz a melhores resultados iniciais, mas não tão satisfatórios com o passar do tempo, uma vez que a argamassa de referência (Composição 1) exibe o menor resultado aos 135 dias. Entretanto, o pó de tijolo parece conferir à argamassa índices de secagem mais uniformes, uma vez que não há grandes variações nas formulações que o contém. Quanto à proporção de pó de tijolo, entre as duas composições avaliadas, observa-se que o menor percentual de substituição (Composição 2) parece propiciar índices de secagem mais uniformes ao longo do tempo, uma vez que seus valores decaem, mas em menor escala, enquanto que o maior teor de substituição apresenta maiores diminuições, mas também melhor comportamento com mais tempo de cura.

Matias (2014) obteve para argamassas no traço 1:2 com incorporação de 20% de pó de tijolo (granulometria  $\leq 0,063$  mm) no lugar da cal aérea, índice de secagem igual a 0,18 aos 60

dias de cura. Este resultado é igual ao de sua argamassa de referência, entretanto, é maior que qualquer valor obtido no presente trabalho. Mesmo assim, os resultados encontrados em ambos os trabalhos se situam próximos aos das argamassas de referência e não são elevados, o que indica boa capacidade de secagem. Porém, como os da autora são maiores, podem indicar que a granulometria do pó de tijolo influencia na capacidade de secagem, uma vez que suas argamassas possuem maior teor de finos que as composições aqui estudadas.

#### 4.7 CONDUTIBILIDADE TÉRMICA

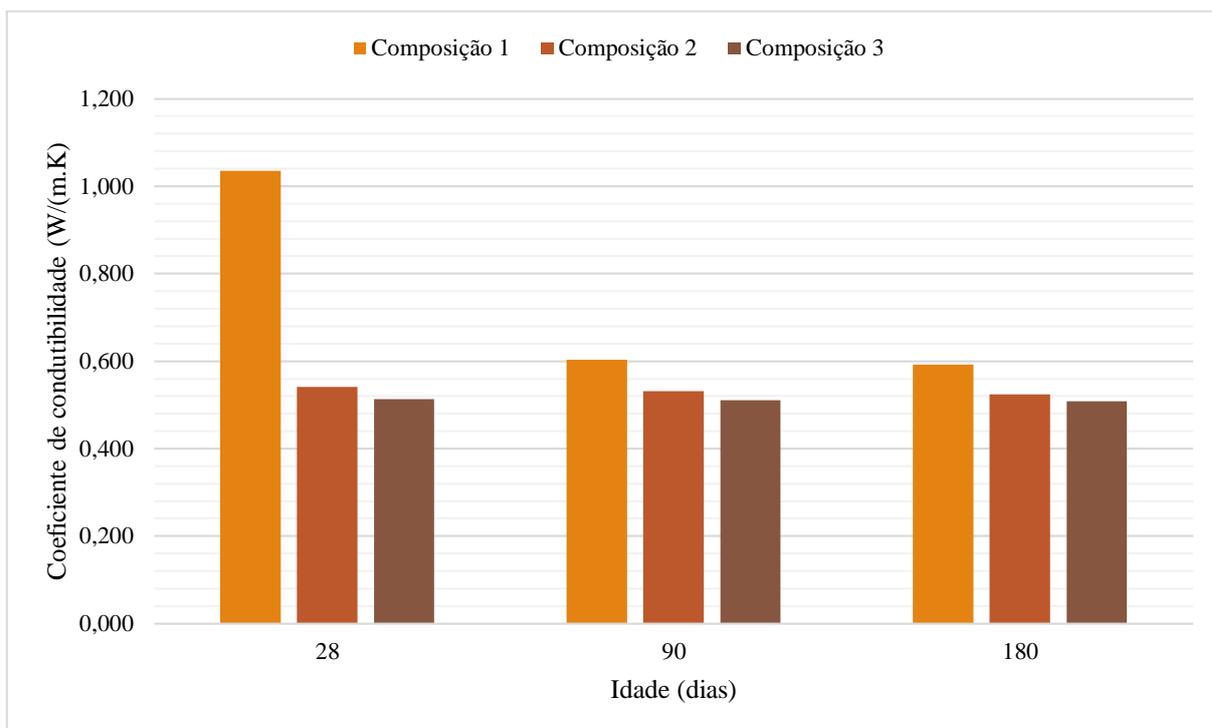
Após a realização do ensaio, calculou-se as médias aritméticas e desvios padrão aos resultados de lambda obtidos para as temperaturas de 10 e 20°C. Os resultados médios e desvios padrão são apresentados nos Quadro 25 e Quadro 26 e sua evolução nas Figura 36 e Figura 37.

**Quadro 25 – Média aritmética de três corpos de prova e desvios padrão dos coeficientes de condutibilidade térmica para a temperatura de 10° de cada composição**

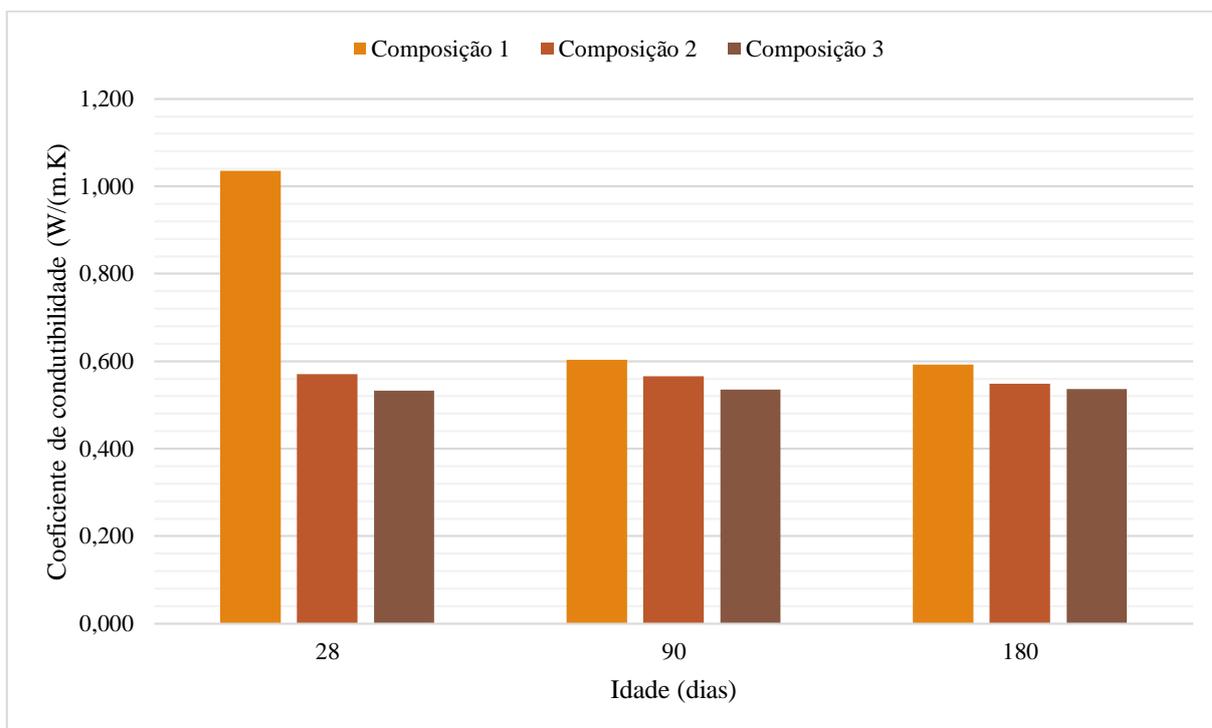
Argamassa	$\lambda_{10}$ (W/(m.K))					
	28		60		90	
	Média	D.P	Média	D.P	Média	D.P
Composição 1	0,902	0,048	0,568	0,090	0,572	0,054
Composição 2	0,542	0,048	0,532	0,009	0,524	0,008
Composição 3	0,514	0,014	0,511	0,079	0,508	0,072

**Quadro 26 – Média aritmética de três corpos de prova e desvios padrão dos coeficientes de condutibilidade térmica para a temperatura de 20° de cada composição**

Argamassa	$\lambda_{20}$ (W/(m.K))					
	28		60		90	
	Média	D.P	Média	D.P	Média	D.P
Composição 1	1,035	0,058	0,603	0,099	0,592	0,052
Composição 2	0,570	0,052	0,566	0,012	0,549	0,005
Composição 3	0,533	0,012	0,536	0,074	0,537	0,068



**Figura 36 – Coeficiente de condutibilidade para a temperatura de 10°C nas idades de 28, 60 e 90 dias**



**Figura 37 – Coeficientes de condutibilidade para a temperatura de 20°C nas idades de 28, 60 e 90 dias**

Observa-se que para a temperatura de 10°C as composições apresentam comportamentos diferentes ao longo do tempo. A Composição 1 apresenta diminuição de valores dos 28 para os 60 dias e aumento dos 60 para os 90 dias, já as Composições 2 e 3 exibem

decréscimo de valores entre todas as idades. Além disso, em todas as idades a Composição 1 exibe os maiores valores, a Composição 2 os intermediários e a Composição 3 os menores. Analisando os coeficientes da temperatura de 20°C, observa-se que as Composições 1 e 2 apresenta decréscimo de valores ao longo do tempo e a Composição 3 exibe aumento. Entretanto, assim como para temperatura de 10°C a Composição 1 apresenta os maiores valores, a Composição 2 os intermediários e a Composição 3 os mais baixos. Percebe-se que em ambas as temperaturas analisadas que a inclusão do pó de tijolo nas formulações proporciona melhoria de resultados, visto que os coeficientes são menores e mais estáveis em variação. Em relação a proporção de pó de tijolo, constata-se que o maior percentual confere melhores resultados pois exibe os coeficientes mais baixos em ambas as temperaturas.

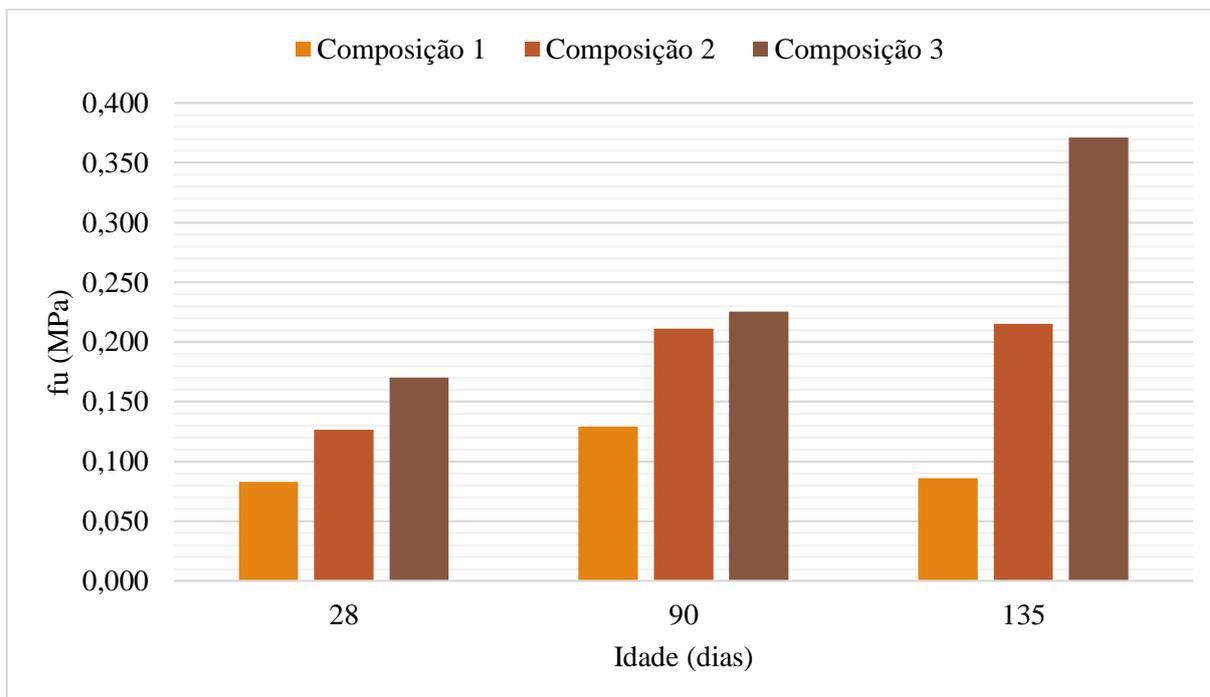
Vargas (2013) estudou argamassas com incorporação de 10% e 20% metacaulino em diferentes percentuais submetidas a diferentes curas. Os valores obtidos pelo autor variaram entre 0,3 e 0,7 W/(m.K) e nem sempre a inclusão do metacaulino conferiu melhores resultados, sendo apenas na cura marítima que o beneficiamento em relação a argamassa de referência foi observado. Comparando os resultados do autor com os do presente trabalho, percebe-se que os valores são muito similares em idades de cura mais elevadas. Os valores apresentados pelas argamassas de referência do autor foram menores aos 28 dias do que os deste trabalho. Constata-se assim que o comportamento térmico apresenta melhorias tanto com a inserção de pó de tijolo quanto de metacaulino, percebendo-se que a cura tem influência no mesmo.

#### 4.8 ADERÊNCIA

A resistência ao arrancamento foi calculada através da Equação 13, posteriormente à realização dos ensaios nas idades estudadas. Com os resultados obtidos, calculou-se as médias aritméticas e desvios padrão de cada composição no determinado período de cura analisado. O apresenta os valores médios e desvios padrão da resistência ao arrancamento, já a Figura 38 ilustra o desenvolvimento ao longo do tempo.

**Quadro 27 – Média aritmética de seis corpos de prova e desvios padrão dos valores de resistência ao arrancamento de cada composição**

Argamassa	fu (MPa)					
	28		90		135	
	Média	D.P	Média	D.P	Média	D.P
Composição 1	0,08292	0,02460	0,12926	0,01905	0,08622	0,02376
Composição 2	0,12638	0,04345	0,21140	0,04903	0,21542	0,04720
Composição 3	0,17046	0,03817	0,22552	0,06678	0,37125	0,06060



**Figura 38 – Resistência ao arrancamento média para as idades de 28, 90 e 135 dias**

Observa-se que com exceção da Composição 1, que tem um decréscimo dos 90 para os 135 dias, as demais apresentam acréscimo de resistência ao longo do tempo. Em todas as idades a Composição 1 exibe os valores mais baixos de resistência, sendo aos 28 dias o menor de todos. A Composição 2 apresenta resultados intermediários em todas as idades, e percebe-se que a partir dos 90 dias o acréscimo de resistência ocorre, mas em menor proporção. Já a Composição 3 possui os resultados mais altos em todas as idades estudadas, sendo aos 135 dias o maior deles. Isto permite observar que a adição do pó de tijolo no lugar da cal, conferiu melhores resultados de resistência, sendo maiores conforme o maior percentual de substituição.

Matias (2014) analisou em seu trabalho, quanto à resistência ao arrancamento, composições de diferentes traços, tipos de cal e substituições de resíduos cerâmicos. No ensaio de aderência executado aos 60 dias pela autora, apenas três argamassas continham resíduos de tijolos e cal aérea em sua formulação, uma no traço 1:2 e as outras no 1:3. No entanto, ambas

exibiam a substituição do agregado pelos fragmentos de tijolo e não do ligante como neste trabalho. Os resultados obtidos neste ensaio foram valores de 0,06 e 0,05 MPa para as composições de traço 1:3, com percentuais de substituição de 20 e 50% respectivamente, e de 0,04 MPa para a composição de traço 1:2 (percentual de substituição de 40%). Tais resultados foram iguais ou maiores que a resistência das argamassas de referência em seu estudo, mas ao comparar-se os mesmos com os resultados do presente trabalho, percebe-se que são menores do que quaisquer valores obtidos para qualquer composição já aos 28 dias (idade de menores resultados). Isto permite notar que a adição de resíduo no lugar do ligante pode justificar a apresentação melhores resultados quanto à aderência do que a substituição do agregado, independentemente do traço. Além disso, a granulometria do material também pode ter influência, uma vez que no referido trabalho a autora utiliza fragmentos de maiores dimensões do que no presente trabalho.

Silva e Veiga (2012) apresentam como valores indicados de resistência ao arrancamento para argamassas em edifícios antigos, os intervalos de 0,1 a 0,3 MPa para utilização em rebocos e 0,1 a 0,5 para juntas. Nota-se que as composições com pó de tijolo (Composições 2 e 3) encontram-se em conformidade com os limites para utilização em rebocos em quase todas as idades, sendo apenas aos 135 dias que a Composição 3 exibe valores superiores a 0,3 MPa. Já a Composição 1 apresenta resultados dentro do intervalo apenas aos 90 dias, possuindo nas demais idades valores abaixo de 0,1 MPa. Avaliando as indicações das autoras quanto à utilização em juntas, as Composições 2 e 3 encontram-se dentro dos limites em todas as idades enquanto que a Composição 1 situa-se apenas aos 90 dias, exibindo nos outros momentos valores inferiores a 0,1 MPa.

Quanto ao local da rotura, independentemente da idade estudada, com exceção de um corpo de prova da Composição 3 aos 90 dias que apresentou rotura entre placa metálica e cola (teve seu resultado desprezado), sempre ocorreram na interface do suporte com argamassa ou na própria argamassa. Segundo a norma EN 1015-12 (European Committee for Standardization, 2000), tais resultados são considerados os desejáveis para este ensaio, não é possível mensurar diferenças significativas quanto a melhora de rotura com inserção do pó de tijolo na composição. Entretanto, percebe-se que aos 135 dias a Composição 1 aparentou desprendimento da argamassa ao entorno do local do ensaio, antes mesmo de sua realização, o que não foi identificado em outras composições. A Figura 39 ilustra os corpos de prova das composições após rotura.



(a)



(b)



(c)

**Figura 39 – Corpos de prova das composições após rotura. (a) Composição 1; (b) Composição 2; (c) Composição 3**

#### 4.9 ABSORÇÃO DE ÁGUA À BAIXA PRESSÃO

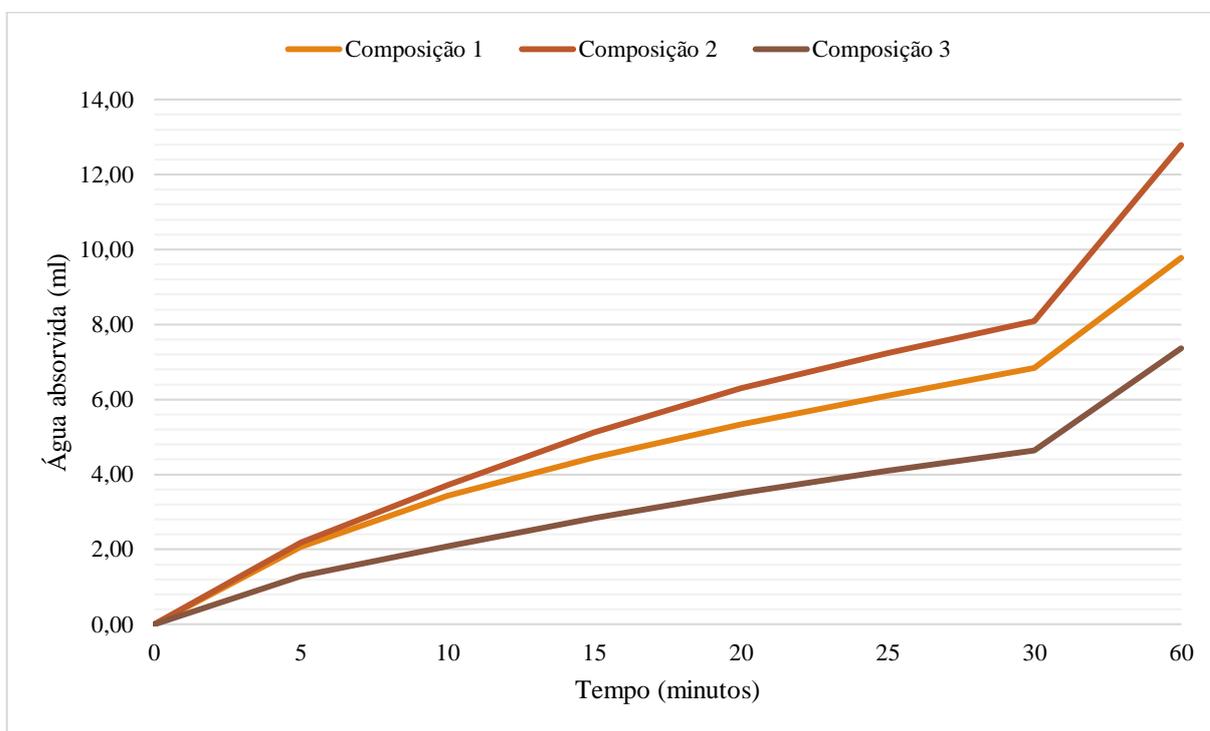
Com o ensaio executado a cada idade estudada, realizou-se a média aritmética e desvios padrão aos valores de absorção. Posteriormente, calculou-se os coeficientes de absorção para o período de uma hora. Os resultados obtidos são apresentados nos Quadro 28 e Quadro 29, já as curvas de absorção são ilustradas nas Figura 40 e Figura 41.

**Quadro 28 – Média aritmética de seis corpos de prova e desvios padrão da quantidade de água absorvida de cada composição**

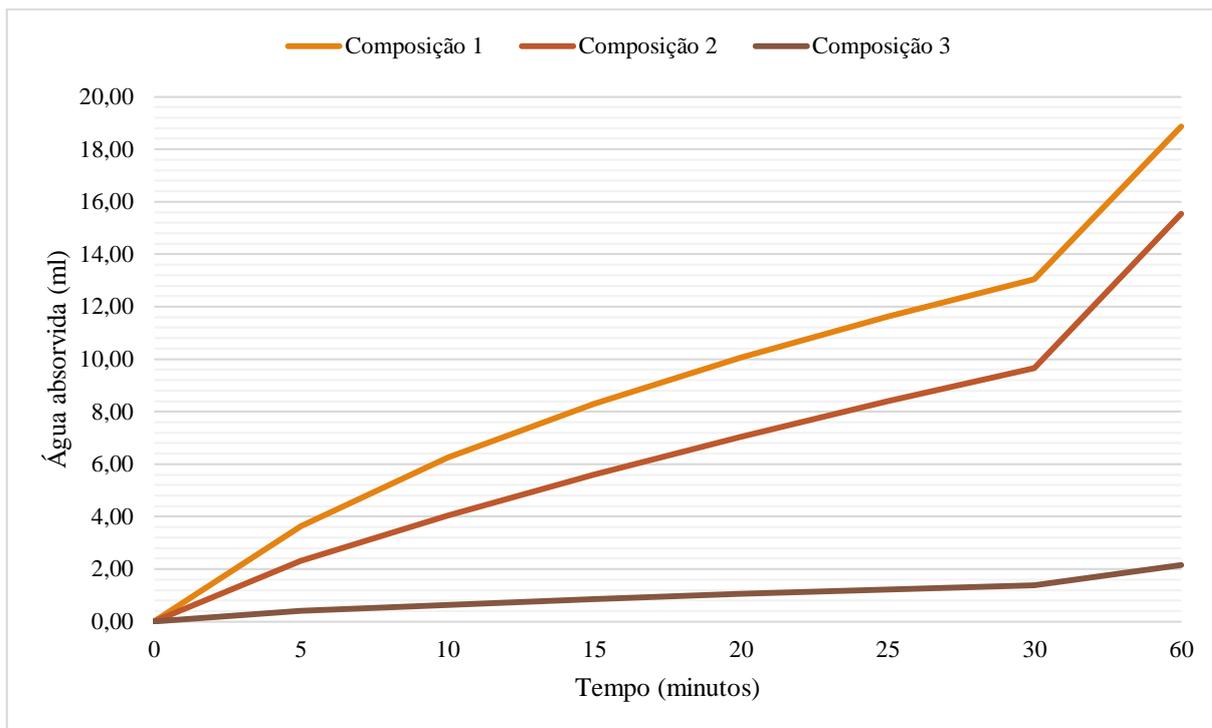
Argamassa	Água absorvida (ml)			
	28		60	
	Média	D.P	Média	D.P
Composição 1	9,783	3,296	18,867	3,780
Composição 2	12,783	9,832	15,533	2,857
Composição 3	7,367	3,624	2,158	0,690

**Quadro 29 – Coeficientes de absorção do período de 1 hora**

Argamassa	Coeficiente de absorção ((Kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> ))	
	28	60
Composição 1	55,364	106,767
Composição 2	72,341	87,903
Composição 3	41,688	12,214



**Figura 40 – Curva de absorção de água a baixa pressão aos 28 dias**



**Figura 41 – Curva de absorção de água a baixa pressão aos 60 dias**

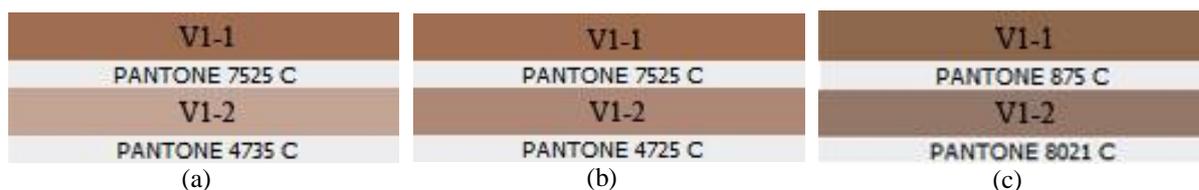
Observa-se que os comportamentos da Composição 1 e Composição 2 são muito similares. Aos 28 dias, percebe-se que até os 5 minutos a absorção de ambas é quase a mesma, sendo que a partir deste instante a Composição 2 começa a superar a quantidade de água absorvida, tornando-se finalmente a de maior valor. A Composição 3, nesta idade, apresenta o resultado mais baixo de absorção mas apresenta comportamento similar ao das demais. Analisando a curva de absorção desta idade, nota-se que independentemente da composição, a maior quantidade de água absorvida ocorre nos primeiros intervalos de tempo, sendo que nos posteriores vai decaindo gradativamente. Já aos 60 dias, a Composição 2 apresenta resultado intermediário de absorção, enquanto que a Composição 1 assume o valor mais elevado e a Composição 3 continua com o mais baixo. Observando a curva dos 60 dias, nota-se que as Composições 1 e 2 continuam com comportamento similar ao dos 28 dias, já a Composição 3 apesar de se observar uma maior absorção inicial como as demais, apresenta ao longo de todo o período de análise quantidade absorvidas muito baixas. Tais fatores possibilitam perceber que a inserção do pó de tijolo na formulação apresenta influência no comportamento a água à baixa pressão, sendo mais benéfico conforme maior o percentual de substituição e ao longo do tempo.

Matias (2014) testou aos 60 dias, entre outras formulações, uma composição de argamassa com cal aérea e traço 1:2 com incorporação de 40% de resíduo cerâmico proveniente de tijolo como substituição do agregado, tendo a mesma absorvido 4 ml antes de 5 minutos de

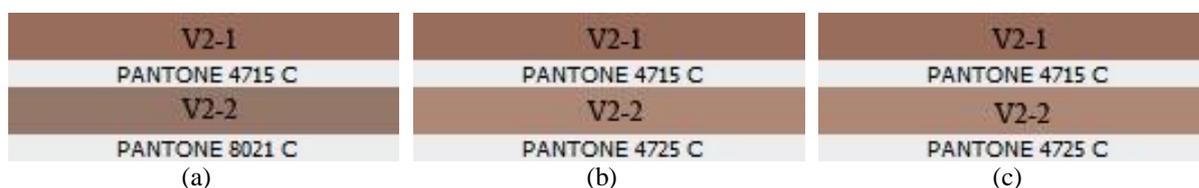
ensaio. Tal resultado foi melhor que o da argamassa de referência de seu estudo, entretanto, inferior aos obtidos no presente trabalho. As Composições 2 e 3, com 15 e 30% de substituição do ligante, respectivamente, exibem melhor comportamento, visto que na mesma idade de cura a primeira atinge 4 ml de água absorvida em cerca de 10 minutos, enquanto que a segunda não atinge tal quantidade durante todo o ensaio (60 minutos). Observa-se que a substituição do agregado por resíduo cerâmico de tijolo proporciona melhoria do comportamento à água sob baixa pressão, porém, não é tão vantajosa quanto à substituição do ligante pelo mesmo.

#### 4.10 ANÁLISE DE COR

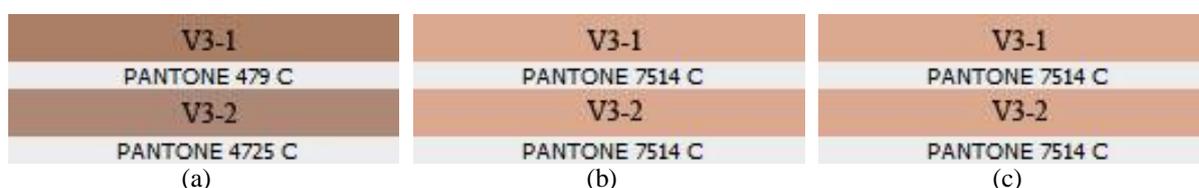
Depois de tirar as fotos nas idades analisadas, realizou-se sua análise no software Adobe Photoshop. Logo que se obteve a fita de cores com a cor coletada da imagem, salvou-se a informação em forma de figura com a captura de tela. Os resultados de cor encontrados para cada composição ao longo das idades são apresentados nas Figura 42, Figura 43 e Figura 44, com a diferenciação dos corpos de prova nas mesmas.



**Figura 42 – Fita de cores para os corpos de prova da Composição 1. (a) Aos 28 dias; (b) Aos 90 dias; (c) Aos 135 dias**



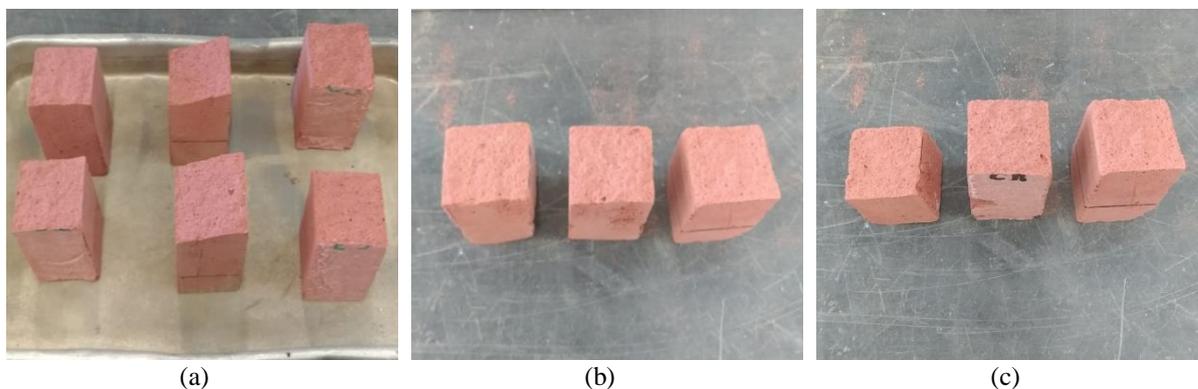
**Figura 43 - Fita de cores para os corpos de prova da Composição 2. (a) Aos 28 dias; (b) Aos 90 dias; (c) Aos 135 dias**



**Figura 44 - Fita de cores para os corpos de prova da Composição 3. (a) Aos 28 dias; (b) Aos 90 dias; (c) Aos 135 dias**

Observa-se que na maioria dos casos, os corpos de prova da mesma composição apresentam colorações diferentes na mesma idade analisada. A Composição 1, independente da cura, apresenta tendência de escurecer com o passar do tempo e em todas as idades analisadas há mudança de coloração. A Composição 2, apresenta para a cura em câmara (V2-1) uma uniformidade da cor em todas as idades, enquanto que na cura ao ar livre (V2-2) a única alteração de tonalidade ocorre dos 28 para os 90 dias, sendo que depois se mantém a mesma cor. Já a Composição 3, apresenta independentemente da cura, variação de tonalidade dos 28 para os 90 dias e depois uniformidade de coloração. Inclusive entre as amostras, percebe-se aos 90 e 135 dias, a mesma cor. Tais fatores indicam que a inclusão do pó de tijolo na formulação pode significar uma maior fixação do pigmento na argamassa, uma vez que as composições que o contém apresentaram menores variações de coloração. Além disso, nota-se que nas composições com pó de tijolo, há menor variação de cor entre as amostras com diferentes curas (mantém-se a mesma cor ou tons mais próximos).

Uma análise de cor que surgiu no decorrer do trabalho foi nos corpos de prova prismáticos. Não se percebe nenhuma variação significativa de coloração nos mesmos, entretanto, considera-se importante enfatizar a boa fixação do pigmento nas argamassas. Observou-se ao rompimento dos corpos de prova prismáticos de 40 x 40 x 160 mm, que o pigmento fica bem e uniformemente impregnado nas argamassas, não apresentando portanto locais de diferentes tonalidades ou sem coloração, independentemente da idade ou composição. A Figura 45 ilustra os corpos de prova rompidos onde pode-se notar esta uniformidade e bom comportamento.



**Figura 45 – Corpos de prova prismáticos rompidos à flexão. (a) Composição 1; (b) Composição 2; (c) Composição 3**

#### 4.11 CLASSIFICAÇÃO DA ARGAMASSA - NORMA EN 998-1:2016

Ao fim dos ensaios realizou-se a classificação das argamassas a partir da norma em vigor e posteriormente a verificação dos requisitos apresentados pela própria normativa para os diferentes tipos de argamassas de revestimento. O Quadro 30 apresenta a classificação das argamassas estudadas neste trabalho.

**Quadro 30 – Classificação das argamassas estudadas segundo a norma EN 998-1 (European Committee for Standardization, 2016)**

Argamassas	Rc (MPa)		CC (Kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> ))		$\lambda_{10}$ (W/(m.K))	
	28 dias	Classificação	28 dias	Classificação	28 dias	Classificação
Composição 1	0,350	-	0,7345	W0	0,902	-
Composição 2	0,438	CS I	0,5712	W0	0,542	-
Composição 3	0,550	CS I	0,5378	W0	0,514	-

Observa-se que com exceção da argamassa de referência (Composição 1), as demais argamassas classificam-se em função da resistência à compressão aos 28 dias como CS I, a classe mais baixa de resistência. Em função do coeficiente de capilaridade, todas as argamassas se enquadram na categoria W0, também a mais baixa. Já em função do coeficiente de condutibilidade térmica, as argamassas não apresentam classificação por esta norma pois a mesma as classifica como isolantes térmicos se tiverem valores abaixo ou iguais a 0,2 e 0,1, sendo os tipos T2 e T1 respectivamente. Com as formulações classificadas quanto à resistência à compressão e absorção de água por capilaridade, verificou-se na mesma norma a quais requisitos são atendidos para as diferentes utilizações, além de outros valores para os coeficientes de condutibilidade que são recomendados de serem consultados na norma EN 1745:2012. O Quadro 31 apresenta essa verificação.

**Quadro 31 – Verificação dos requisitos da norma EN 998-1 (European Committee Standardization, 2016)**

Tipo de argamassa	Classificações esperadas			Composição 1			Composição 2			Composição 3		
	Rc	CC	$\lambda_{10}$	Rc	CC	$\lambda_{10}$	Rc	CC	$\lambda_{10}$	Rc	CC	$\lambda_{10}$
GP	CS I – CS IV	W0 – W2	Valores entre 0,61 e 0,82 <sup>a</sup>	-	X	-	X	X	-	X	X	-
LW	CS I – CS III	W0 – W2	Valores entre 0,61 e 0,82 <sup>a</sup>	-	X	-	X	X	-	X	X	-
CR	CS I – CS IV	W0 – W2	Valores entre 0,61 e 0,82 <sup>a</sup>	-	X	-	X	X	-	X	X	-
OC	CS I – CS IV	W1 – W2	Valores entre 0,61 e 0,82 <sup>a</sup>	-	-	-	X	-	-	X	-	-
R	CS II	$\geq 0,3$ kg/m <sup>2</sup> após 24 h	Valores entre 0,61 e 0,82 <sup>a</sup>	-	X	-	-	X	-	-	X	-
T	CS I – CS II	W1	T1 ou T2 <sup>b</sup>	-	-	-	X	-	-	X	-	-

**Notas:**

(a) Segundo a norma EN 998-1:2016 para estas utilizações de argamassa, deve-se recorrer à norma EN 1745:2012 considerando P=50% e a densidade do material, para encontrar valores tabelados de condutibilidade. No caso das composições estudadas, a densidade das amostras esteve entre 1600 e 1800 kg/m<sup>3</sup>, logo o intervalo de valores de coeficiente de condutibilidade são os apresentados.

(b) Classificações prontamente exibidas pela norma EN 998-1 com alguns valores, apenas para as argamassas do tipo “T”.

Nota-se que quanto à resistência à compressão, com exceção da Composição 1 que não se apresenta dentro da classificação exigida para nenhum tipo de argamassa, as demais composições encontram-se adequadas como todos os tipos de argamassa excetuando as de renovação. Quanto ao coeficiente de absorção, todas as composições apresentam mesma verificação, e não se enquadram como argamassa de camada única (OC) e argamassa térmicas isolantes (T). Já quanto à condutibilidade térmica, nenhuma argamassa estudada apresentou valores dentro dos intervalos indicados. Entretanto, as argamassas com pó de tijolo exibiram menores valores que o limite inferior do intervalo indicado, o que é um bom comportamento pois representa a redução da condução do calor através do material.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As diferentes composições estudadas possibilitaram a análise do desempenho de argamassas de cal aérea pigmentadas e a influência da inclusão de pó de tijolo de mesma granulometria (inferior a 0,50 mm) em diferentes proporções (15 e 30%) no lugar do ligante. Como não se fabricou argamassas com diferentes traços ou com variações da granulometria do pó de tijolo, não foi possível concluir muito a respeito destas alterações, entretanto, comparando os resultados obtidos com trabalhos já realizados, foi possível se obter algum direcionamento a respeito. Com os ensaios realizados às composições estudadas, constatou-se que de forma geral a inserção do pó de tijolo conferiu melhores resultados às argamassas, mesmo que em curto ou longo prazo, ou expresso como uma menor variação de valores.

Quanto às características mecânicas (resistência à flexão, compressão e ao arrancamento) constatou-se ganho de resistência com a inserção do pó de tijolo nas formulações. Com exceção da resistência à flexão, onde a menor proporção de pó de tijolo se mostrou melhor nas idades de 28 e 90 dias, em todas as idades o maior percentual de substituição conferiu a valores mais elevados. Em relação aos limites indicados por norma e por autores para utilização em edifícios antigos e demais aplicações, as composições com pó de tijolo exibiram maior número de resultados em conformidade com os mesmos do que a composição de referência. Na resistência à flexão, todas as composições estudadas apresentaram-se, independentemente da idade, situadas dentro do intervalo indicado por autores para utilização como rebocos em edifícios antigos, mas apenas aos 90 dias passaram a estar aptas para utilização em juntas. Já na resistência à compressão, as composições com pó de tijolo apresentaram-se aptas segundo autores para utilização em edifícios antigos, mas conforme a norma, mostraram-se indicadas para todos os tipos de aplicação exceto de renovação. Enquanto isso, a composição sem pó de tijolo apresentou-se adequada apenas segundo autores para utilização em edifícios antigos, mas a partir dos 135 dias, sendo considerada não adequada a qualquer tipo de aplicação de acordo com a norma. Finalmente, examinando a resistência ao arrancamento, a composição de cal e areia só esteve situada dentro dos limites indicados por autores para aplicação em edifícios antigos aos 90 dias, enquanto que as demais composições apresentaram valores em conformidade em todas as idades, e no caso da composição com maior quantidade de pó de tijolo superiores a partir dos 135 dias.

Em relação às características físicas, nem sempre as composições com pó de tijolo exibiram os melhores resultados. Analisando a massa volúmica e retração, não se obteve

resultados com expressiva diferença. Entretanto, constatou-se que todas as composições apresentaram valores de massa volúmica dentro do intervalo aceitável por autores para utilização em edifícios antigos. Não se confirmou efeito significativo da retração nos corpos de prova prismáticos, porém, como em alguns corpos de prova de suporte tijolo houve o surgimento de fissuras, este comportamento deve ser melhor analisado a fim de verificar se é uma consequência da má aplicação ou da retração propriamente dita. Analisando o comportamento à água, constatou-se diferentes desenvolvimentos para absorção por capilaridade e baixa pressão. Na primeira, quando se analisou os coeficientes calculados com a metodologia geral, constatou-se que a inclusão do pó de tijolo conferiu melhorias a curto prazo, enquanto que a argamassa de referência apresentou melhor resultado no longo prazo. As formulações apresentaram-se em conformidade com todas as aplicações definidas pela norma, exceto a de renovação, não exibindo também valores válidos segundo autores para o uso em edifícios antigos. Como este comportamento diverge um pouco do obtido em outros trabalhos, além de não se perceber um padrão muito definido do comportamento ao longo do tempo, seria adequada uma análise em período mais longo. Ao examinar os coeficientes calculados através da metodologia indicada exclusivamente para argamassas de renovação, constatou-se a melhoria de valores conforme o maior percentual de pó de tijolo na argamassa, padrão de comportamento definido e valores em conformidade com a norma para argamassas de renovação, porém, ainda sem concordância com autores. Já na absorção sob baixa pressão, comprovou-se a melhoria de resultados com o maior percentual de substituição por pó de tijolo, independentemente da idade analisada. Quanto à secagem, como aos resultados são muito próximos e em cada idade uma composição diferente apresentou o índice de secagem mais baixo, é difícil constatar qual composição apresentou melhor desempenho. Entretanto, confirmou-se que a argamassa com o percentual de 15% de substituição por pó de tijolo exibiu resultados mais estáveis e muito próximos dos mais baixos ao longo do tempo, e a composição com 30% de pó de tijolo apresentou comportamento muito similar ao da composição de menor percentual, porém com declínios de valores mais significativos ao longo das idades. Como a composição de referência também apresentou decréscimo de valores ao longo do tempo e aos 135 dias o menor índice de secagem, seria interessante avaliar durante um período mais extenso a fim de comprovar se ela se confirma como a de desempenho mais satisfatório.

Considerando o aspecto térmico, nenhuma argamassa estudada situou-se dentro de intervalos indicados por referências, não sendo recomendada então para nenhuma das utilizações da norma EN 998-1. Entretanto, constatou-se que as argamassas com substituição

de cal por pó de tijolo obtiveram melhor comportamento térmico, visto que seus coeficientes de condutibilidade foram menores. Além disso, percebeu-se que a melhoria de resultados é maior quando o percentual de substituição é mais elevado.

A respeito da coloração, constatou-se de forma geral, boa fixação do pigmento e uniformidade da cor em todas as composições. Entretanto, ao analisar as formulações em diferentes curas, confirmou-se que a com maior teor de pó de tijolo apresentou o melhor desempenho, visto que a longo prazo não se verificou diferença de cor entre as amostras. Já examinando o mesmo tipo de cura, constatou-se que as composições com pó de tijolo apresentaram, independentemente do percentual, melhores resultados, uma vez que ambas exibiram estabilidade de cor em suas amostras a partir dos 90 dias. Já formulação de referência exibiu, independentemente da cura ou idade, variação de coloração.

Considerando os resultados obtidos e as limitações percebidas no decorrer deste trabalho, sugere-se para trabalhos futuros:

- Análise das mesmas composições estudadas em idades de cura mais extensas e/ou condições diferentes, além de aplicação *in situ*;
- Avaliação do desempenho de outros traços, proporções e de diferentes granulometrias de pó de tijolo;
- Realização da análise química e mineralógica dos componentes e das argamassas estudadas a fim de entender como melhorá-las;
- Desenvolvimento de outros ensaios relevantes para análise de demais propriedades importantes das composições desenvolvidas no presente trabalho.

## 6 REFERÊNCIAS

- APCER. (2014). Controlo de Produção em Fábrica. Recuperado de: <http://www.calcidrata.pt/calcidrata/index.php/welcome/qualidade>
- Arizzi, A. & Cultrone, G. (2012). Aerial lime-based mortars blended with a pozzolanic additive and different admixtures: A mineralogical, textural and physical-mechanical study. *Construction and Building Materials*, 31, 135–143. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.069>
- EN 197-1, de 21 de maio de 2000. Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements. Brussels: European Committee for Standardization.
- EN 998-1, de 9 de abril de 2016. Specification for mortar for masonry - Part 1: Rendering and plastering mortar. Brussels: European Committee for Standardization.
- EN 1015-10, de 08 de julho de 1999. Methods of test for mortar for masonry - Part 10: Determination of dry bulk density of hardened mortar. Brussels: European Committee for Standardization.
- EN 1015-11, de 08 de julho de 2006. Methods of test for mortar for masonry – Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. Brussels: European Committee for Standardization.
- EN 1015-12, de 2000. Methods of test for mortar for masonry - Part 12: Determination of adhesive strength to hardened rendering and plastering mortars on substrates. Brussels: European Committee for Standardization.
- EN 1015-18, de 06 de julho de 2002. Methods of test for mortar for masonry - Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar. Brussels: European Committee for Standardization.
- EN 1015-2, de 15 de fevereiro de 1999. Methods of test for mortar for masonry - Part 2: Bulk Sampling of mortars and preparation of test mortars. Brussels: European Committee for Standardization.
- EN 1015-3, de 15 de junho de 1999. Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table). Brussels: European Committee for Standardization.
- EN 12267, de 07 de março de 2001. Thermal performance of building materials and products. Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods. Products of high and medium thermal resistance. Brussels: European Committee for Standardization.
- EN 1745, de 09 de março de 2012. Masonry and masonry products - Methods for determining thermal properties. Brussels: European Committee for Standardization.
- Calcidrata - Indústrias de Cal S.A. (2017). *Ficha de dados de segurança de cal hidratada - Hidróxido de Cálcio - Ca(OH)<sub>2</sub>*. Recuperado de:

<http://www.calcidrata.pt/calcidrata/index.php/welcome/qualidade>

- Carreira, J. M. R. (2013). *Soluções de Reabilitação de Rebocos Exteriores em Edifícios Antigos* (Dissertação de Mestrado). Área Departamental de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, Portugal. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10400.21/2402>
- Carvalho, C. R. (2011). *Estudo da cor e de argamassas de revestimento de edifícios do Centro Histórico de Tomar* (Dissertação de Mestrado). Escola Superior de Tecnologia de Tomar, Instituto Politécnico de Tomar, Tomar, Portugal. Recuperado de: <https://comum.rcaap.pt/handle/10400.26/22365>
- Catarino, L. G. & Gil, F. P. S. C. (2014). *Pigmentos de origem mineral : caso de estudo dos revestimentos do Centro Histórico de Coimbra*. (FCTUC Ciências da Terra - Livros e Capítulos de Livros). Coimbra: Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10316/32072>
- Damas, A. L., Veiga, M.R. & Faria, P. (2016, novembro). Caracterização de argamassas antigas de Portugal – contributo para a sua correta conservação. *Congresso Ibero-Americano “Património, Suas Matérias e Imatérias*, Lisboa, Portugal. Recuperado de: <http://run.unl.pt/handle/10362/19316>
- Ergenç, D., & Fort, R. (2018). Accelerating carbonation in lime-based mortar in high CO<sub>2</sub> environments. *Construction and Building Materials*, 188, 314–325. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.125>
- Instituto Nacional de Estatística (2012). *Censos 2011 Resultados Definitivos - Portugal*. Lisboa: Instituto Nacional de Estatística - INE.
- Instituto Nacional de Estatística (2018). *Estatísticas da Construção e Habitação 2017*. Lisboa: Instituto Nacional de Estatística - INE.
- Faria, P., Costa, J., Lourenço, T., Figueiredo, T. & Silva, V. (2014, junho). Cal hidráulica natural com metacaulino e resíduos cerâmicos em exposição natural. *Simpósio de Argamassas e Soluções Térmicas de Revestimento*, Coimbra, Portugal. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10362/12508>
- Flores-Colen, I., Ruivo, S., Teixeira, P., Neto, N., Silvestre, J., & Fernandes, C. (n.d.). Revestimentos de paredes [Aulas da disciplina de Tecnologia da Construção de Edifícios - Mestrado Integrado em Engenharia Civil]. Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal. Recuperado de: [http://www.civil.ist.utl.pt/~joaof/tc-pb/21 Revestimentos de paredes - 22<sup>a</sup> a 24<sup>a</sup> aulas teóricas.pdf](http://www.civil.ist.utl.pt/~joaof/tc-pb/21%20Revestimentos%20de%20paredes%20-%2022%20a%20a%20aulas%20teóricas.pdf)
- Laboratório Nacional de Engenharia Civil (2002). *Ficha de Ensaio - Revestimento de Paredes FE Pa 39 - Ensaio de Absorção de Água sob Baixa Pressão*. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil - LNEC.
- Margalha, M. G. (2011). Argamassas [Documento de apoio às aulas de Conservação e Recuperação do Património]. Universidade de Évora - Engenharia Civil. Recuperado de: <https://www.google.pt/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCEQFjAA&url=https%3A%2F%2Fdspace.uevora.pt%2Frdpc%2Fbitstream%2F10174%2F496>

9%2F1%2FArgamassas.pdf&ei=o3mwVM-  
NEYTjaJ3MgagG&usg=AFQjCNEy4AN4jd\_Iy20MtfG48YEPSlwuwg&bvm=bv.83339  
334,d.d2s&cad

Matias, G., Faria, P., & Torres, I. (2014a). Lime mortars with ceramic wastes: Characterization of components and their influence on the mechanical behaviour. *Construction and Building Materials*, 73, 523–534. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.108>

Matias, G., Faria, P., & Torres, I. (2014b). Lime mortars with heat treated clays and ceramic waste: A review. *Construction and Building Materials*, 73, 125–136. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.028>

Matias, G. M. L. (2014). *Argamassas de reabilitação com resíduos de cerâmica* (Tese de Doutoramento). Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal. Recuperado de: <https://estudogeral.sib.uc.pt/bitstream/10316/26467/1/Argamassas%20de%20Reabilita%C3%A7%C3%A3o%20com%20Res%C3%ADduos%20de%20Cer%C3%A2mica.pdf>.

Moropoulou, A., Bakolas, A., Moundoulas, P. & Aggelakopoulou, E. (2005). Reverse Engineering: A proper methodology for compatible restoration mortars. *RILEM Workshop Repair Mortars for Historic Masonry*. Delft, The Netherlands. Recuperado de: <https://www.rilem.net/images/publis/pro067-025.pdf>.

NP EN 459-1, de 15 de dezembro de 2015. Cal de construção - Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade. Monte da Caparica: Instituto Português da Qualidade.

NP EN 1097-3, de 18 de julho de 2002. (2002). Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Parte 3: Determinação da baridade e do volume de vazios. Monte da Caparica: Instituto Português da Qualidade.

NP EN 1097-6, de 2003. (2003). Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água. Monte da Caparica: Instituto Português da Qualidade.

NP EN 933-1, de 07 de J. de 2000. (2000). Ensaios das propriedades geométricas dos agregados - Parte 1: Análise granulométrica. Monte da Caparica: Instituto Português da Qualidade.

Santos, A.R. & Veiga, M. R. (2012, junho). Argamassas compatíveis para edifícios antigos. *Jornadas LNEC - Engenharia para a sociedade, investigação e inovação, cidades de desenvolvimento*, Lisboa, Portugal. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/266171461\\_ARGAMASSAS\\_COMPATIVEIS\\_PARA\\_EDIFICIOS\\_ANTIGOS](https://www.researchgate.net/publication/266171461_ARGAMASSAS_COMPATIVEIS_PARA_EDIFICIOS_ANTIGOS)

Torres, I., & Matias, G. (2016). Sustainable mortars for rehabilitation of old plasters. *Engineering Structures*, 129, 11–17. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.07.009>

Trigo, T. M. P. da M. dos S. (2014). *Caracterização e avaliação de argamassas de reboco e camada de base com ligante PC e CSA* (Dissertação de Mestrado). Instituto Superior

Técnico, Lisboa, Portugal. Recuperado de:  
<https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/cursos/mec/dissertacao/2353642477841>

Vargas, D. L. F. de. (2013). *Argamassas de cal aérea e metacaulino: A influência do traço e da cura* (Dissertação de Mestrado). Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal. Recuperado de:  
<http://hdl.handle.net/10362/11209>

Veiga, M. R. (2009). *Conservação e Reparação de Revestimentos De Paredes De Edifícios Antigos - Métodos e Materiais*. (1a ed., Coleção Teses e Programas de Investigação). Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil - LNEC. Recuperado de:  
<http://repositorio.lnec.pt:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/16735/Tpi58.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Veiga, R. (2017). Air lime mortars: What else do we need to know to apply them in conservation and rehabilitation interventions? A review. *Construction and Building Materials*, 157, 132–140. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.080>

Vilhena, A. (2013, novembro). Reabilitação habitacional e o setor da construção civil. *O Parque Habitacional e a Sua Reabilitação: Retrato e Prospetiva*, Lisboa, Portugal.

Zulian, C. S., Doná, E. C., & Vargas, C. L. (2002). Notas de aulas da disciplina Construção Civil - Assunto: Revestimentos. Universidade Estadual de Ponta Grossa - UEPG, Ponta Grossa, Brasil. Recuperado de:  
[www.uepg.br/denge/aulas/revestimentos/revestimentos.doc](http://www.uepg.br/denge/aulas/revestimentos/revestimentos.doc)