



Ingrid Nayara Firmino de Lima

Licenciada em Engenharia Civil

**Caracterização in situ de rebocos de cal
expostos a envelhecimento natural**

Dissertação para obtenção do Grau Mestre em
Engenharia Civil – Reabilitação de Edifícios

Orientadora: Prof. Doutora Paulina Faria, Professora Associada,
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa

Presidente: Prof. Doutor Fernando F. Pinho

Arguente: Prof. Doutora Isabel Torres

Vogal: Prof. Doutora Paulina Faria

Caracterização in situ de rebocos de cais expostos a envelhecimento natural

‘Copyright’ Ingrid Nayara Firmino de Lima, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho surge após um período bastante conturbado, onde a pandemia e a distância da família mostraram-se obstáculos maiores que o que esperava. Ao chegar ao fim e olhar para o futuro, é fácil ver que as incertezas que antes pareciam enormes, agora não mais assustam.

Em primeiro lugar, agradeço às mulheres da minha vida. Minha mãe, Sandra, que sempre me incentivou a seguir os meus sonhos, sabendo que ela sempre estaria ao meu lado em todos os momentos, mesmo que longe. A minha irmã, Isis, meu principal modelo de quem eu quero ser, que me faz sempre querer ser melhor, mesmo quando eu mesma não consigo enxergar. A nossa família é pequena e, incompleta, mas é boa. É boa sim.

À minha segunda mãe, minha “madinha Kôca”, que me ensinou que levar a vida mais leve não quer dizer que devamos fugir às nossas responsabilidades e que, mesmo em momentos de tristeza, nunca deixaremos de estar juntas.

Ao meu marido Rafael, a quem foi prometido um parágrafo exclusivo após toda ajuda neste trabalho, que sempre apoia as minhas decisões e que, em momentos de desespero, sempre acreditou no meu potencial, mesmo quando eu mesma não acreditava, o meu muito obrigada.

À professora Dra. Paulina, que teve papel fundamental na partilha de conhecimento que tivemos em diversas chamadas de vídeo para orientar o desenvolvimento deste trabalho, além de sempre se importar em como eu estava, acima de tudo.

Aos amigos que fiz em Portugal, Sérgio, Bibi, Sofia, Luís, André, Ernani e Kamila, por todas as conversas e momentos que fizeram Portugal ser meu lar.

Aos meus amigos do Brasil, Rafael, Marina, Mariana e as meninas do “melhor grupo”, espero que nossa amizade permaneça a mesma, a minha vida é mais feliz com vocês nela.

RESUMO

A reabilitação de edifícios antigos é um campo de grande crescimento na construção civil. Porém, a compatibilização do uso de cimento com os suportes, mostra-se um grande desafio encontrado para a conservação destas edificações. A utilização de argamassas de cal aérea e hidráulica, mais compatível com paredes antigas, tem sido objeto de estudos laboratoriais mas são raros os estudos de caracterização após anos em exposição natural.

No presente estudo, foi realizada uma campanha experimental *in situ* em painéis de reboco de argamassas de cal hidráulica natural (NHL) e de cal aérea, aplicados em muretes de alvenaria de tijolo cerâmico furados assente com argamassa corrente de cimento, expostos com orientação a norte e a sul. As argamassas de NHL têm traços de 1:4 e 1:3 (ligante: areia) com substituições em volume de 25% e 10% da NHL por resíduos cerâmicos, e de 0%, 2,5% e 5% da NHL por metacaulin, respetivamente. As argamassas de cal aérea hidratada, de traço 1:2 (ligante: areia) com substituições em volume de 0%, 10% e 20% de cal por metacaulin, também foram aplicadas em reboco de muretes dos mesmos tijolos e com orientação a norte e sul. Argamassas de cal aérea, de traço 1:2 e 1:3 (cal: areia) com substituição de 0% e 20% de terra caulinítica, foram aplicadas em reboco de murete de taipa com orientação este. Todos os ensaios realizaram-se após aproximadamente 7 anos de exposição destes muretes.

Observa-se nos resultados obtidos que a substituição parcial por metacaulin e resíduos cerâmicos contribuiu para a melhoria das características mecânicas das argamassas de NHL e de cal aérea. Para além da sua compatibilidade com edifícios antigos, demonstra-se assim a sua durabilidade em exposição natural mesmo em suportes correntes, tornando-as adequadas para utilização em edifícios antigos mas também em construção de alvenaria de tijolo furado corrente. Já as argamassas de cal aérea com substituição de terra não apresentaram resultados satisfatórios, talvez devido a problemas graves do suporte de taipa. Assim o seu uso para este tipo de paredes não é estimulado, sendo necessário mais estudos para garantir o desempenho necessário.

Palavras-chave: muretes experimentais, cal hidráulica natural, cal aérea hidratada, terra caulinítica, metacaulin, taipa, argamassa, reboco, ensaios *in situ*.

ABSTRACT

In the present study, an experimental campaign was carried out *in situ* on natural hydraulic lime (NHL) and aerial lime mortar plasterboards, applied on ceramic brick masonry walls perforated with cement-running mortar, exposed with a north orientation and to the south. NHL mortars have traces of 1:4 and 1:3 (binder: sand) with replacements by volume of 25% and 10% of NHL by ceramic waste, and 0%, 2.5% and 5% of NHL by metakaolin, respectively. The hydrated aerial lime mortars, of 1:2 trait (binder: sand) with volume substitutions of 0%, 10% and 20% of lime by metakaolin, were also applied in plastering walls of the same bricks and with a north orientation and south. Aërae lime mortars, with a 1:2 and 1:3 mix (lime: sand) with replacement of 0% and 20% of kaolinitic earth, were applied in a rammed earth plaster with east orientation. All tests were carried out after approximately 7 years of exposure to these walls.

It is observed in the results obtained that the partial replacement by metakaolin and ceramic residues contributed to the improvement of the mechanical characteristics of NHL and aerial lime mortars. In addition to their compatibility with old buildings, this demonstrates their durability in natural exposure even on common substrates, making them suitable for use in old buildings but also in common perforated brick masonry construction. On the other hand, aerial lime mortars with earth replacement did not show satisfactory results, perhaps due to serious problems in the rammed earth support. Therefore, its use for this type of walls is not encouraged, and further studies are needed to ensure the necessary performance.

Keywords: walls, natural hydraulic lime, hydrated aerial lime, kaolinitic earth, metakaolin, rammed earth, mortar, plaster, *in situ* tests.

ÍNDICE

| | | |
|-----|---|----|
| 1 | Introdução | 1 |
| 1.1 | Enquadramento | 1 |
| 1.2 | Objetivos e metodologia | 3 |
| 1.3 | Estrutura e organização do texto | 3 |
| 2 | Estado dos conhecimentos sobre argamassas de reboco | 5 |
| 2.1 | Sustentabilidade e construção civil | 5 |
| 2.2 | Requisitos de desempenho das argamassas e dos rebocos | 5 |
| 2.3 | Matérias-primas e argamassas | 8 |
| 2.4 | Caracterização de argamassas | 12 |
| 3 | Caracterização dos muretes, rebocos e argamassas a ensaiar na campanha experimental | 21 |
| 3.1 | Caracterização dos suportes | 21 |
| 3.2 | Argamassas e rebocos em estudo | 24 |
| 4 | Procedimentos de ensaios in situ | 27 |
| 4.1 | Inspeção visual | 28 |
| 4.2 | Dureza superficial por durómetro <i>Shore A</i> | 28 |
| 4.3 | Dureza superficial por esclerómetro pendular | 29 |
| 4.4 | Impacto de esfera | 30 |
| 4.5 | Velocidade de pulso ultrassónico | 31 |
| 4.6 | Absorção de água sob baixa pressão por tubos de Karsten | 32 |
| 5 | Resultados e discussão | 35 |
| 5.1 | Inspeção visual | 35 |
| 5.2 | Durómetro <i>Shore A</i> | 38 |
| 5.3 | Esclerómetro pendular | 48 |
| 5.4 | Impacto de esfera | 57 |

| | | |
|-----|---|----|
| 5.5 | Velocidade de pulso ultrassônico..... | 63 |
| 5.6 | Absorção de água a baixa pressão por tubos de Karsten | 72 |
| 6 | Conclusões | 81 |
| 6.1 | Conclusões finais | 81 |
| 6.2 | Desenvolvimentos futuros..... | 82 |
| | Referências bibliográficas..... | 85 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 3.1- Planta com a localização e exposição dos muretes na Estação de Exposição Natural de Alvenarias e Rebocos da FCT NOVA | 21 |
| Figura 3.2– Organização das argamassas nos muretes: (a) 1 (Madeira, 2013); b) 2 (Valério, 2013); c) 3 (Vargas, 2013); d) 4 (Jamú, 2013)..... | 22 |
| Figura 4.1 - Ordem de realização dos ensaios <i>in situ</i> | 27 |
| Figura 4.2 – Termohigrometro: (a) em clima seco; b) em clima húmido | 28 |
| Figura 4.3 – a) Durómetro <i>Shore A</i> e b) Pontos de medição no murete | 29 |
| Figura 4.4 – a) Esclerómetro Pendular; b) Pontos de medição nos muretes | 30 |
| Figura 4.5 - Pontos de medição do impacto de esfera nos muretes | 31 |
| Figura 4.6 - Pontos de medição da velocidade de pulso ultrassónico nos muretes..... | 32 |
| Figura 4.7 – a) Tubo de Karsten; b) Pontos de medição dos tubos de Karsten em cada murete | 33 |
| Figura 5.1 - Inspeção visual no Murete 1 com reboco de NHL, resíduos cerâmicos e resíduos de tijolo | 35 |
| Figura 5.2 - Inspeção visual no Murete 2 com rebocos de NHL e metacaulin | 36 |
| Figura 5.3 - Inspeção visual no Murete 3 com rebocos de cal aérea e metacaulin | 36 |
| Figura 5.4 - Inspeção visual no Murete 4 com rebocos de cal aérea e terra | 37 |
| Figura 5.5 - Dureza superficial por durómetro das argamassas aplicadas no Murete 2, com 0%, 2,5% e 5% de substituição da NHL por Mk, expostas a norte e a sul, avaliada em clima seco e húmido | 39 |
| Figura 5.6 - Valores da dureza superficial por durómetro na base, no meio e no topo dos painéis de reboco de argamassas com 0%, 2,5% e 5% de Mk, aplicadas a norte e sul no murete 2..... | 40 |
| Figura 5.7 - Dureza superficial por durómetro dos rebocos de argamassa com 25% e 10% de resíduos de cerâmica T1 e T2, aplicados no Murete 1 em clima seco e húmido, expostos a norte e a sul..... | 41 |

| | |
|--|----|
| Figura 5.8 - Valores da dureza superficial por durómetro na base, no meio e no topo dos rebocos de argamassas com 25% e 10% de resíduos cerâmicos T1 e T2, aplicados no murete 1 a norte e sul | 42 |
| Figura 5.9 - Dureza superficial por durómetro dos rebocos de argamassas de cal aérea com 0%, 10% e 20% de Mk aplicadas no Murete 3 a norte e sul, avaliada em clima seco e húmido | 43 |
| Figura 5.10 - Valores da dureza superficial por durómetro na base, no meio e no topo de rebocos de argamassas de cal aérea com 0%, 5% e 10% de Mk, expostos a norte e sul, aplicadas no murete 3..... | 43 |
| Figura 5.11 - Dureza superficial por durómetro dos rebocos de argamassas de cal aérea e terra com traço 1:2 e 1:3, com 10% de cal aérea, expostos a este, no Murete de taipa avaliada em clima seco e húmido..... | 44 |
| Figura 5.12 - Valores da dureza superficial por durómetro na base, no meio e no topo de rebocos de argamassas de traço 1:2 e 1:3, com 0%, 10% e 25% de cal aérea expostos a estes, aplicadas no murete 4..... | 45 |
| Figura 5.13 Dureza superficial por esclerómetro pendular dos rebocos de argamassas de cal hidráulica com 0%, 2,5% e 5% de Mk aplicadas no Murete 2 a norte e sul, avaliada em clima seco e húmido..... | 49 |
| Figura 5.14 - Dureza superficial por esclerómetro dos rebocos de argamassas de cal hidráulica com 0%, 2,5% e 5% de Mk aplicadas, a norte e sul, na base, no meio e no topo de argamassas aplicadas no murete 2..... | 50 |
| Figura 5.15 - Dureza superficial por esclerómetro dos rebocos de argamassa com 25% e 10% de resíduos de cerâmica T1 e T2, aplicados no Murete 1 em clima seco e húmido, expostos a norte e a sul..... | 51 |
| Figura 5.16 - Dureza superficial por esclerómetro dos rebocos de argamassa com 25% e 10% de resíduos de cerâmica T1 e T2, aplicados no Murete 1 em clima seco e húmido, expostos a norte e a sul, na base, no meio e no topo de argamassas aplicadas no murete 1 | 52 |
| Figura 5.17 - Dureza superficial por esclerómetro dos rebocos de argamassas de CL com 0%, 10% e 20% de Mk aplicadas no Murete 3 a norte e sul, avaliada em clima seco e húmido | 53 |

| | |
|--|----|
| Figura 5.18 - Dureza superficial por durómetro dos rebocos de argamassas de cal aérea com 0%, 10% e 20% de Mk aplicadas no Murete 3 a norte e sul, na base, no meio e no topo de argamassas aplicadas no murete 3..... | 54 |
| Figura 5.19 - Dureza superficial por esclerómetro dos rebocos de argamassas de terra de traço 1:2 e 1:3 com 0%, 25% e 10% de cal aérea aplicadas no Murete 3 a este, avaliada em clima seco e húmido..... | 55 |
| Figura 5.20 - Dureza superficial por esclerómetro dos rebocos de argamassas de terra de traço 1:2 e 1:3 com 0%, 25% e 10% de cal aérea aplicadas no Murete 3, no meio e no topo de argamassas aplicadas no murete 4..... | 55 |
| Figura 5.21 - Diâmetro da massa provocada pelo ensaio de impacto de esfera nos painéis das argamassas no Murete 1, com 10% e 25% de substituição da NHL por resíduos cerâmicos, expostas a norte e a sul, avaliada em clima seco e húmido..... | 58 |
| Figura 5.22 – Diâmetro da massa provocada pelo ensaio de impacto de esfera no topo, meio e base dos painéis de argamassas aplicadas no Murete 2, com 10% e 25% de substituição da NHL por resíduos cerâmicos, expostas a norte e a sul, avaliada em clima seco e húmido..... | 59 |
| Figura 5.23 - Diâmetro da massa provocada pelo ensaio de impacto de esfera nos painéis de argamassas aplicadas no Murete 2, com 0%, 2,5% e 5% de substituição da NHL por Mk, expostas a norte e a sul, avaliada em clima seco e húmido | 60 |
| Figura 5.24 - Diâmetro da massa provocada pelo ensaio de impacto de esfera nos painéis de argamassas aplicadas no Murete 2, com 0%, 2,5% e 5% de substituição da NHL por Mk, expostas a norte e a sul, no topo, meio e base dos painéis..... | 60 |
| Figura 5.25 - Diâmetro da massa provocada pelo ensaio de impacto de esfera nos painéis de argamassas aplicadas no Murete 3, com 0%, 10% e 20% de substituição da CL por Mk, expostas a norte e a sul, avaliada em clima seco e húmido | 61 |
| Figura 5.26 - Diâmetro da massa provocada pelo ensaio de impacto de esfera nos painéis de argamassas aplicadas no Murete 3, com 0%, 10% e 20% de substituição da CL por Mk, expostas a norte e a sul, no topo, meio e base dos painéis de argamassa | 62 |
| Figura 5.27 – Velocidade de pulso ultrassônico dos rebocos de argamassa com 25% e 10% de resíduos de cerâmica T1 e T2, aplicados no Murete 1, expostos a norte..... | 64 |

| | |
|---|----|
| Figura 5.28 - Dureza superficial por esclerómetro dos rebocos de argamassa com 25% e 10% de resíduos de cerâmica T1 e T2, aplicados no Murete 1 em clima seco e húmido, expostos a sul..... | 65 |
| Figura 5.29 - Resultado da velocidade de pulso ultrassônico das argamassas aplicadas no Murete 2, com 0%, 2,5% e 5% de substituição da NHL por Mk, expostas a sul | 66 |
| Figura 5.30 - Resultado da velocidade de pulso ultrassônico das argamassas aplicadas no Murete 2, com 0%, 2,5% e 5% de substituição da NHL por Mk, expostas a norte | 67 |
| Figura 5.31 - Resultado da velocidade de pulso ultrassônico dos painéis de argamassas de cal aérea com 0%, 10% e 20% de Mk aplicadas no Murete 3 a sul | 68 |
| Figura 5.32 - Resultado da velocidade de pulso ultrassônico dos painéis de argamassas de cal aérea com 0%, 10% e 20% de Mk aplicadas no Murete 3 a norte | 69 |
| Figura 5.33 - Valor da velocidade de pulso ultrassônico dos painéis de argamassas de traço 1:2 e 1:3, com 0%, 10% e 25% de cal aérea expostos a estes, aplicadas no murete 4..... | 70 |
| Figura 5.34 – Absorção de água por tubos de Karsten no painel de argamassa NHL com 25% e 10% de resíduos de cerâmica T1 e T2, aplicados no Murete 1, exposto a sul..... | 73 |
| Figura 5.35 - Absorção de água por tubos de Karsten dos rebocos de argamassa com 25% e 10% de resíduos de cerâmica T1 e T2, aplicados no Murete 1, expostos a norte | 74 |
| Figura 5.36 - Absorção de água a baixa pressão por tubos de Karsten no painel de aplicadas no Murete 2, com 0%, 2,5% e 5% de substituição da NHL por Mk, expostas a sul | 75 |
| Figura 5.37 - Absorção de água a baixa pressão por tubos de Karsten no painel de aplicadas no Murete 2, com 0%, 2,5% e 5% de substituição da NHL por Mk, expostas a norte | 75 |
| Figura 5.38 - Absorção de água a baixa pressão por tubos de Karsten no painel de argamassas de cal aérea com 0%, 10% e 20% de Mk aplicadas no Murete 3, exposto a sul | 76 |
| Figura 5.39 - Absorção de água a baixa pressão por tubos de Karsten no painel de argamassas de cal aérea com 0%, 10% e 20% de Mk aplicadas no Murete 3 a norte | 77 |
| Figura 5.40 - Absorção de água a baixa pressão por tubos de Karsten no painel de argamassas de traço 1:2 e 1:3, com 0%, 10% e 25% de cal aérea expostos a este, aplicadas no murete 4 | 77 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 2.1 - Funções e requisitos de desempenho de diferentes tipos de argamassa (Henriques & Faria, 2006) | 6 |
| Tabela 2.2 – Gamas de valores aos 90 dias de argamassas a serem utilizadas em edifícios antigos (Veiga et al., 2010)..... | 7 |
| Tabela 2.3 - Classificação das argamassas no estado endurecido segundo a NP EN 998-1 (CEN, 2017) | 7 |
| Tabela 2.4- Relação entre ensaios <i>in situ</i> e as propriedades das argamassas adaptado de Veiga (2017)..... | 8 |
| Tabela 2.5 – Caracterização de rebocos de cais através de ensaios que podem ser feitos <i>in situ</i> | 18 |
| Tabela 2.6 - Caracterização de rebocos de cais com pozolanas através de ensaios que podem ser feitos <i>in situ</i> | 18 |
| Tabela 2.7 – Resultados de outros autores para o ensaio de durómetro <i>Shore A</i> | 19 |
| Tabela 2.8 - Resultados de outros autores para o ensaio de esclerómetro pendular | 19 |
| Tabela 2.9 - Resultados de outros autores para o ensaio de velocidade de pulso ultrassônico..... | 19 |
| Tabela 2.10 - Resultados de outros autores para o ensaio de resistência ao impacto de esfera | 20 |
| Tabela 2.11 - Resultados de outros autores para o ensaio de absorção de água a baixa pressão por tubos de Karsten..... | 20 |
| Tabela 3.1 – Caracterização nos suportes de tijolo furado e taipa | 23 |
| Tabela 3.2 – Caracterização dos rebocos de cal aérea e terra no murete de taipa e suporte de tijolo | 23 |
| Tabela 3.3 - Caracterização dos rebocos de cal aérea e metacaulin em suporte de tijolo..... | 24 |
| Tabela 3.4 - Localização e principais características das argamassas de NHL em estudo | 25 |
| Tabela 3.5 - Localização e principais características das argamassas de CL em estudo | 25 |

| | |
|--|----|
| Tabela 5.1 – Inspeção visual das argamassas com substituição por NHL..... | 37 |
| Tabela 5.2 - Inspeção visual das argamassas com substituição por CL..... | 38 |
| Tabela 5.3 – Comparação dos resultados do ensaio de durómetro, em Graus <i>Shore A</i> , em argamassas com substituição por NHL com resultados de outros autores..... | 46 |
| Tabela 5.4 – Comparação dos resultados do ensaio de durómetro, em Graus <i>Shore A</i> , em argamassas com substituição por CL com resultados de outros autores..... | 48 |
| Tabela 5.5 - Comparação dos resultados do ensaio de esclerómetro pendular, em Graus Vickers, em argamassas com substituição por CL com resultados de outros autores..... | 56 |
| Tabela 5.6 – Comparação dos resultados do ensaio de esclerómetro pendular, em Graus Vickers, em argamassas com substituição por NHL com resultados de outros autores | 57 |
| Tabela 5.7 - Comparação dos resultados do ensaio de impacto de esfera em argamassas com substituição por NHL com resultados de outros autores..... | 63 |
| Tabela 5.8 - Comparação dos resultados do ensaio de impacto de esfera em argamassas com substituição por CL com resultados de outros autores..... | 63 |
| Tabela 5.9 - Comparação dos resultados do ensaio de velocidade de pulso ultrassónico em argamassas de NHL com resultados de outros autores | 71 |
| Tabela 5.10 - Comparação dos resultados do ensaio de velocidade de pulso ultrassónico em argamassas de CL com resultados de outros autores | 72 |
| Tabela 5.11 - Comparação dos resultados do coeficiente de absorção aos 5 min de água à baixa pressão de argamassas de NHL com resultados de outros autores | 78 |
| Tabela 5.12 - Comparação dos resultados do coeficiente de absorção aos 5 min de água à baixa pressão de argamassas de CL com resultados de outros autores | 79 |

1 Introdução

1.1 Enquadramento

No contexto histórico, as argamassas são uma das formas mais antigas de revestimento que se encontram nas construções humanas. É possível encontrar vestígios arqueológicos das primeiras sociedades agrícolas utilizando a terra em rebocos. Sendo a terra vulnerável à ação da água, este tipo de rebocos só tem durabilidade quando protegido da sua ação. Ainda no contexto arqueológico há registros de argamassas de cal de 7000 A.C. utilizadas pelos Galileus em Israel (Bentur, 2002). Nota-se que uma das soluções encontradas para eliminar a vulnerabilidade dos rebocos de terra quando em contacto com a água foi adicionar cal aérea à formulação das argamassas de terra, tornando-as mais resistentes à chuva e mais duráveis (Faria, 2018). Há registro ainda de edificações Greco-Romanas onde foi observada a adição de resíduos cerâmicos afim de garantir alguma hidraulicidade e maior durabilidade às argamassas de cal aérea (Matias et al., 2014), o que mostra que a adição dessa e de outras pozolanas era vulgar. Desde o início do século XIX, com o surgimento das argamassas com base em cimento Portland, o uso de argamassas de terra e de cal para rebocos foram sendo sucessivamente descontinuados e os seus métodos construtivos caíram no esquecimento.

Com o aumento do conhecimento sobre argamassas de cimento, veio a comprovar-se não serem física e quimicamente compatíveis com elementos de construção executados com materiais anteriores ao uso do cimento. As argamassas de cal aérea, no entanto, mostram-se as mais compatíveis para rebocos de paredes antigas, pois conseguem mais se aproximar das argamassas originais em questão de compatibilidade estética e funcional (Veiga, 2017). Com efeito as argamassas de cimento Portland mostraram-se inadequadas para este fim, pois, além de outros fatores, apresentam rigidez elevada e teores elevados de sais solúveis, que, por sua vez, causam uma incompatibilidade com os materiais das paredes antigas, podendo, ao invés de sanar, até mesmo agravar algumas anomalias existentes (Santos, et. al, 2011).

Sendo a conservação de construções históricas e a reabilitação de edifícios antigos uma necessidade prioritária em diversos países, e nomeadamente na Europa, e ser condicionada por requisitos de compatibilidade e só depois de durabilidade, há décadas que se tornou necessário então, um maior estudo e conhecimento sobre argamassa com base em cal. Por outro lado, os rebocos são um produto da construção que não necessita de elevada resistência mecânica pois não constitui elementos

estruturais. Assim, mesmo em obra nova podem ser executados com argamassas com ligantes com menor impacto ambiental que o cimento, como são as cais.

Tal como referido, a adição de pozolanas à argamassas de cal foi uma técnica utilizada pelo menos desde há milénios. Onde existiam lavas vulcânicas, estas eram utilizadas; onde não existiam, utilizavam-se resíduos de material cerâmico, como pó de tijolo, telhas ou ladrilhos de barro vermelho, como adição à cal aérea. Alternativas mais recentes são cinzas volantes de centrais termoelétricas, metacaulin obtido pela calcinação a menor temperatura que a cal de caulinos, ou cinzas de resíduos agrícolas como casca de arroz ou bagaço de cana de açúcar.

Na atualidade, para além de aspetos técnicos, de propriedades das argamassas, co-existem também aspetos de sustentabilidade, nomeadamente em termos de energia incorporada. A NP 459-1, determina ainda que para além de cais aérea, existem também cais hidráulicas naturais, de entre o grupo das cais com propriedades hidráulicas (IPQ, 2015). Sendo as pozolanas materiais que podem provir de resíduos, e que têm menor energia incorporada que a cal que substituem, a adição de pozolanas, além de conferir alguma hidraulicidade às argamassas de cal aérea, também pode garantir o decréscimo da sua energia incorporada.

Assim, a vantagem ecológica associada a melhorias das características técnicas das argamassas de cais com pozolanas, como seja o aumento da sua durabilidade ou o aumento da velocidade de endurecimento, e à compatibilidade com os materiais antigos, deveriam promover a utilização destas argamassas em obras novas e principalmente na reabilitação de edificações antigas. Com efeito, as intervenções em edifícios antigos, devem, sobretudo, ser realizadas com o menor impacto possível e, sempre que possível, conservando os materiais existentes na edificação intervencionada. Porém esta prática ainda é pouco utilizada na reabilitação e conservação de edificações antigas originalmente à base de cal (Veiga, 2017).

Desta forma, as argamassas de cal tornaram-se objeto de estudo de diversos investigadores a fim de reintroduzir este material e garantir a forma correta de sua utilização. Os rebocos exteriores estão sujeitos a maior acção de intempéries com o tempo e, desta forma, carecem de uma atenção especial na hora de serem intervencionados. A substituição parcial ou total deste revestimento não deve ser feita de forma indiscriminada, de forma que a argamassa escolhida deve cumprir os critérios de compatibilidade com a original, sem agravar as anomalias que se desejava corrigir (Santos, et. al, 2011). e sem criar outras. Assim, relativamente à utilização de pozolanas em argamassas de cais, um

dos aspetos que não tem sido muito estudado é o seu comportamento não só a curto, mas também a mais longo prazo e, principalmente, em condições de exposição natural.

1.2 Objetivos e metodologia

Esta dissertação de mestrado surge em sequência de outros trabalhos realizados nos quais se produziram e caracterizaram em laboratório argamassas de cais (aérea calcítica e hidráulica natural) com diversas adições, tais como diferentes teores de terra, de metacaulin e de pó de tijolo e ladrilho. Algumas dessas argamassas foram aplicadas em rebocos em muretes experimentais, na Estação de Exposição Natural de Alvenarias e Revestimentos do Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa (FCT NOVA), onde têm estado em envelhecimento natural já há aproximadamente 8 anos.

Assim o objetivo principal é, através da análise das características originais das argamassas e dos rebocos nos muretes, avaliar as características atuais desses rebocos após anos de envelhecimento natural e, dessa forma, contribuir para um maior conhecimento sobre argamassas de cal aérea e de cal hidráulica natural com adições de baixa energia incorporada. Dessa forma pretende-se poder contribuir para aferir a sua adequação efetiva para aplicação em rebocos, não só na reabilitação de construções antigas, mas também para aplicação como rebocos em construção nova.

Para tal vai-se proceder a uma campanha experimental realizada *in situ*, nos painéis de reboco nos muretes experimentais em laboratório e em amostras retiradas desses rebocos.

1.3 Estrutura e organização do texto

O presente trabalho foi dividido em 6 capítulos. Neste primeiro capítulo, foi realizado um enquadramento ao tema, a apresentação dos objetivos que fundamentaram o estudo realizado e a estrutura que a dissertação possui.

No segundo capítulo apresenta-se o estado do conhecimento na área, o enquadramento da sustentabilidade e a construção civil, os valores das funções e exigências das argamassas e as matérias primas que a constituem. São ainda apresentados outros trabalhos realizados nesta área.

No terceiro capítulo são descritos os constituintes das argamassas assim como suas características, os materiais dos suportes, a localização dos muretes e organização das argamassas nos painéis.

No quarto capítulo apresenta-se os procedimentos utilizados nos ensaios *in situ* realizados nas argamassas em estudo.

No quinto capítulo são apresentados os resultados dos ensaios *in situ* realizados nos painéis de argamassas expostos nos muretes, a sua devida discussão e comparação dos resultados obtidos com o de outros autores com trabalhos nesta área.

No sexto e último capítulo é apresentado a conclusão desta investigação e, também, a sugestão de desenvolvimento de trabalhos futuros no tema deste trabalho.

2 Estado dos conhecimentos sobre argamassas de reboco

2.1 Sustentabilidade e construção civil

O termo sustentabilidade vem sendo cada vez mais aplicado na construção civil. O uso de matérias-primas com menores necessidades energéticas para sua fabricação e transporte, além da reutilização e reciclagem correta dos resíduos gerados pela construção e demolição, terá de ser cada vez mais aplicado desde a fase de projeto até a fase de manutenção ao longo da vida útil do edifício (Braga & Rocheta, 2007).

A energia incorporada em um edifício pode ser subdividida em duas partes: a energia para a respectiva construção e a energia para a manutenção e exploração ou funcionamento desse edifício. A quantidade de energia utilizada nestas duas fases pode variar bastante, dependendo, majoritariamente, da escolha das matérias-primas, das soluções construtivas e técnicas utilizadas para a sua utilização (Venkatarama, 2003).

A fim de reduzir o impacto ambiental e, principalmente, a redução das emissões de CO₂, as argamassas à base de cal apresentam ser uma solução mais vantajosa em comparação às argamassas de cimento, que possuem seu uso mais difundido na construção civil. Apesar das argamassas apenas corresponderem à uma pequena parte da construção, pois se encontram apenas no setor de revestimentos, são consumidos grandes volumes em camadas intermédias e, quando em camadas exteriores, são as que mais estão sujeitas aos desgastes naturais, acrescentando assim, a sua necessidade de manutenção.

2.2 Requisitos de desempenho das argamassas e dos rebocos

Argamassa é o termo dado à mistura de agregado, ligante e água, que pode, ou não, possuir ainda aditivos em sua constituição. Em muitos edifícios, as argamassas possuem papel fundamental na área dos revestimentos, em contato com o exterior e com o interior, nomeadamente aplicadas em rebocos, termo dado para a aplicação de argamassas em paredes e tetos, quando esta tem a função de regularizar o substrato. Esta exposição faz com que as argamassas estejam mais sujeitas às agressões atmosféricas e sujeitas a um maior desgaste e deterioração, sendo assim, os rebocos necessitam de um maior desempenho face à estas intempéries.

Sempre que possível, é mais interessante em uma intervenção que os revestimentos existentes sejam conservados e apenas sejam feitas reparações pontuais. Porém, ao ser necessária uma substituição dos

rebocos, total ou parcialmente, as argamassas devem ser escolhidas de forma a serem compatíveis mecânica, física e quimicamente com a localização de sua aplicação, estética e funcionabilidade (Veiga, 2017).

As aplicações de argamassas podem ser subdivididas em tipos, conforme as suas funções e requisitos de desempenho, conforme mostrado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Funções e requisitos de desempenho de diferentes tipos de argamassa (Henriques & Faria, 2006)

| Tipo de argamassa | Função | Requisitos de desempenho |
|--------------------------|--|--|
| Reboco exterior | Proteção contra à água (vapor ou líquida) | Baixa absorção de água; elevada permeabilidade ao vapor de água |
| Reboco interior | Proteção mecânica | Boa dureza superficial |
| Fechamento de juntas | Proteção contra à água e estabilidade estrutural | Baixa absorção de água; elevada permeabilidade ao vapor de água; expansibilidade |
| Injeções | Estabilidade estrutural | Facilidade de injeção |

Após caracterizar as argamassas a serem aplicadas em edifícios antigos, foi proposta por Veiga et al. (2010) uma gama de valores meramente indicativos, porém encontrados após experiência acumulada, que devem ser cumpridos pelas argamassas aos 90 dias de idade, conforme mostrado na Tabela 2.2. A norma NP EN 998-1 (IPQ, 2017) também apresenta valores a fim de classificar as argamassas de reboco interior e exteriores, de acordo com as propriedades apresentadas no estado endurecido, conforme a Tabela 2.3.

Como dito anteriormente, as argamassas aplicadas como revestimento são chamadas de rebocos. A fim de perceber como estas argamassas se comportam em uma situação real de exposição e não apenas em laboratório, surgiu a necessidade de realizar-se ensaios *in situ*, ou seja, em seu local de aplicação, a fim de perceber se as suas propriedades mecânicas face às intempéries realmente são correlacionadas com os resultados obtidos em laboratório.

Na Tabela 2.4, Veiga (2017) correlacionou os resultados de ensaios *in situ* realizados em argamassas a fim de correlacionar com as propriedades das argamassas.

Tabela 2.2 – Gamas de valores aos 90 dias de argamassas a serem utilizadas em edifícios antigos (Veiga et al., 2010)

| Argamassa | Características mecânicas | | | Comportamento face à água |
|----------------------|---------------------------|-----------|-------------|---------------------------------|
| | Rt [MPa] | Rc [MPa] | Ed [MPa] | CC [$kg/m^2 \cdot min^{1/2}$] |
| Reboco Exterior | 0,2 – 0,7 | 0,4 – 2,5 | 2000 – 5000 | 1,0 – 1,5 |
| Reboco Interior | 0,2 – 0,7 | 0,4 – 2,5 | 2000 – 5000 | - |
| Fechamento de Juntas | 0,4 – 0,8 | 0,6 – 3,0 | 3000 - 6000 | 1,0 – 1,5 |

Rt – Resistência à tração por flexão; Rc – Resistência à compressão; Ed – Módulo de Elasticidade Dinâmico; CC – Coeficiente de Capilaridade

Tabela 2.3 - Classificação das argamassas no estado endurecido segundo a NP EN 998-1 (CEN, 2017)

| Propriedades | Categoria | Valores |
|--------------------------------------|-----------|--|
| Resistência à compressão aos 28 dias | CS I | 0,4 – 2,5 MPa |
| | CS II | 1,5 – 5,0 MPa |
| | CS III | 3,5 – 7,5 MPa |
| | CS IV | ≥ 6 MPa |
| Absorção de água por capilaridade | W 0 | - |
| | W 1 | CC $\leq 0,4$ [$kg/m^2 \cdot min^{1/2}$] |
| | W 2 | CC $\leq 0,2$ [$kg/m^2 \cdot min^{1/2}$] |

Estas propriedades, ainda que não o suficiente, são utilizadas para analisar o comportamento que as argamassas devem apresentar após um período de exposição, sendo assim, um bom parâmetro para a possibilidade de aplicação de argamassas em rebocos de edifícios antigos.

Tabela 2.4- Relação entre ensaios *in situ* e as propriedades das argamassas adaptado de Veiga (2017)

| | Esclerómetro Pendular | Durómetro | Impacto de esfera | Velocidade de pulso ultrassônico | Tubos de Karsten |
|------------------------|------------------------------|------------------|--------------------------|---|-------------------------|
| Resistência Mecânica | ✔ | ✔ | ✔ | ✔ | - |
| Módulo de Elasticidade | ✔ | - | - | ✔ | |
| Permeabilidade à água | - | - | - | - | ✔ |

2.3 Matérias-primas e argamassas

2.3.1 Terra

A terra tem sua origem da meteorização das rochas por agentes físicos, químicos e biológicos. O clima é o maior exemplo dos agentes físicos, pois a variação de temperatura causa uma dilatação e contração nas rochas, levando as mesmas a fraturarem e mudar a sua formação original (Pimenta, 2014). Se a rocha sofrer um ataque de um ácido orgânico, pode-se considerar uma meteorização por agente químico. Estes exemplos causam uma maior porosidade da rocha, o que facilita a penetração da água e, conseqüentemente, a germinação de vegetais, o que caracteriza uma meteorização por agentes biológicos (Pimenta, 2014).

Os principais constituintes minerais do solo ocorrem do intemperismo da rocha de origem e podem ser divididos em provenientes da desintegração física e mecânica, que dão origem as areias e cascalhos, ou provenientes de desintegração química, que dará origem aos siltes e argilas. Para utilização na construção, o solo deve ter uma percentagem baixa de resíduos orgânicos, pois esta parcela orgânica os torna altamente compressíveis e com alta absorção de água (Hall & Djerbit, 2004).

Nas argamassas de terra a argila possui a função de ligante, ou seja, de aglutinar os constituintes que a argamassa possui. Estas argamassas são formadas por terra argilosa e, se esta for demasiado argilosa ou tiver pouca areia, depois adiciona-se areia e amassa-se com água. A fim de desempenhar a sua função de ligante, a argamassa deve possuir argila suficiente para aglutinar o esqueleto granular e evitar assim a erosão; não pode ter demasiado alto teor de argila para limitar a retração (Röhlen & Ziegert, 2011).

Nas construções que utilizam este tipo de argamassa é muito comum notar a degradação acentuada quando aplicadas em rebocos exteriores e o comportamento das argamassas de reparação variam de acordo com o tipo de suporte a que são aplicadas (Gomes, 2013). Quando aplicadas em rebocos é frequente as argamassas de terra serem protegidas por acabamentos adequados à exposição ou formuladas com produtos que lhes confirmam essa durabilidade. Um exemplo vernáculo é a utilização de cal aérea ou de resíduos, como excrementos de animais (Pachamama et al., 2020).

2.3.2 Cal aérea

As cals aéreas apenas têm o seu endurecimento em contacto com o dióxido de carbono presente no ar, e desta forma, não apresentam propriedades hidráulicas, conforme apresenta a NP EN 459-1 (IPQ, 2015). Ainda de acordo com esta norma, as cals aéreas podem ser classificadas em cals dolomíticas (DL) ou cals cálcicas (CL). A obtenção da cal aérea ocorre por um processo de cozedura dos calcários com elevado grau de pureza (>95%), ou seja, com elevado grau de carbonato de cálcio (CaCO_3). No que se inicia o processo de cozedura, num primeiro momento, ocorre a libertação da água que a rocha possui e depois de atingido certo tempo e temperatura, ocorre a decomposição do carbonato de cálcio, obtendo-se a cal viva anteriormente citada (Faria, 2004). A diferença do processo de decomposição das cals dolomíticas e cálcicas dá-se pela temperatura de cozimento, donde nas cals cálcicas a temperatura varia entre os 800°C e 1000°C e nas cals dolomíticas entre os 400°C e 480°C (Torraca, 2009). Após a obtenção da cal viva, esta deve ser extinta, de forma análoga ao citado anteriormente.

Para que ocorra o endurecimento da cal aérea é necessário que haja a carbonatação, ou seja, a transformação do hidróxido de cálcio novamente em carbonato de cálcio. Este fenómeno ocorre através da libertação da água e reação com o dióxido de carbono.

As argamassas de cal aérea hidratada carbonatam mais lentamente devido a existência de maior quantidade de hidróxido de cálcio no mesmo volume, o que demanda mais tempo para que haja a carbonatação completa (Faria-Rodrigues, 2004).

A utilização de argamassas de cal aérea hidratada traz consigo alguns problemas além do maior tempo para carbonatar completamente, como um endurecimento mais lento, alta retração inicial, baixa resistência mecânica e fraca proteção face à água (Faria et al., 2012)

2.3.3 Cal hidráulica natural

As cals hidráulicas naturais (NHL) resultam da calcinação direta de calcários impuros, ou seja, com pequenas quantidades de argila (5% a 20%) em sua composição. Para conferir a característica hidráulica a este material, deve-se submetê-lo a temperaturas na ordem dos 900°C aos 1200°C, à qual o óxido de cálcio formado (CaO) reage com a alumina (Al_2O_3) e a sílica (SiO_2) presentes na argila, formando a cal viva. Quanto maior a temperatura de cozimento (até 1500°C), o teor de argila e o tempo de cozimento, maior será a hidraulicidade desta cal (Faria-Rodrigues, 2004), pois a quantidade de óxido de cálcio livre será menor e, conseqüentemente, a quantidade de silicatos de cálcio ($\text{SiO}_2 \cdot 2\text{CaO}$) e aluminatos de cálcio ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaO}$) será maior.

Após findado o processo de cozedura, a cal retirada do forno deve ser extinta. O processo de extinção consiste em transformar o óxido de cálcio em hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH}_2)$), pelo processo de pulverização completa da cal hidratada, eliminando assim, a cal viva (Faria-Rodrigues, 2004).

O endurecimento da cal hidráulica natural consiste, basicamente, em duas fases distintas. A primeira ocorre logo após a amassadura e é decorrente da hidratação dos aluminatos e silicatos de cálcio, tendo uma característica essencialmente hidráulica. A segunda acontece a longo prazo e é resultante da reação do hidróxido de cálcio com o dióxido de carbono presente na atmosfera, tendo uma característica aérea (Coelho et al., 2009).

Para ser considerada uma cal hidráulica natural 3.5, a cal deve ter um teor mínimo de 25% de hidróxido de cal em sua composição e não possuir quaisquer outras adições e um teor máximo de 2% de sulfatos (IPQ, 2015).

2.3.4 Agregados e fibras

Constituinte em maior quantidade nas argamassas, a areia e outros agregados têm como função ser o esqueleto da argamassa. Assim, é imprescindível uma escolha rigorosa no agregado, pois a menor variação em sua característica pode alterar as propriedades finais da argamassa (Rato, 2006).

As areias naturais podem ser divididas em diversos grupos, do ponto de vista químico, por exemplo areias silicosas e calcárias. As areias silicosas tem sua origem de leitos de rio ou areeiros e as calcárias, da degradação de jazidas de rochas calcárias. Os agregados podem também resultar de resíduos, como partículas de cerâmica ou resíduos de construção e demolição com granulometria semelhante à areia. As areias podem conter maior ou menor quantidade de argila em sua composição e esta presença pode

dificultar a ligação do agregado com o ligante, aumentando, assim, a retração da argamassa, o que diminui a sua durabilidade (Faria-Rodrigues, 2004).

Do ponto de vista físico as características dos agregados possuem uma relação direta com a resistência e porosidade das argamassas. As argamassas que possuem agregados de pedra calcária possuem um aumento significativo na resistência mecânica, pois apresentam uma granulometria mais fina, o que facilita a coesão do agregado com o ligante. Em contrapartida agregados silicosos apresentam uma forma mais arredondada, causando um aumento no tamanho dos poros e, conseqüentemente, a redução da resistência mecânica, não sendo, portanto, o seu uso aconselhado (Grilo et al., 2014).

Para além dos agregados, as argamassas podem ainda conter fibras, como é o caso de fibras naturais, vegetais ou animais, ou de fibras sintéticas.

2.3.5 Resíduos cerâmicos

Há registros de argamassas de cal aérea com comportamento hidráulico com adição de resíduos cerâmicos por toda a Europa, sendo bastante evidenciada esta utilização em construções romanas (Faria-Rodrigues, 2004). A hidraulicidade destas argamassas de cal aérea com adições de argilas calcinadas é garantida pela reatividade pozolânica que elas possuem, por sua vez condicionada pela pequena dimensão das partículas e pela quantidade de sílica e alumina amorfas presente. A sílica e alumina amorfas, quando em reação com o hidróxido de cálcio presentes na cal, tornam-se aluminatos e silicatos, substâncias estas que garantem a hidraulicidade da argamassa (Matias, 2013). Se a fração fina tiver pouca reatividade pozolânica, no limite funciona como um filler, que pode contribuir para a trabalhabilidade das argamassas. Em fração mais grossa, os resíduos de cerâmica constituem um agregado reciclado, que pode substituir a areia natural. Moropoulou et al. (2004) utilizaram a análise termogravimétrica para estudar pozolanas naturais e artificiais encontradas em argamassas antigas e determinou que a que apresentava maior ocorrência era o pó de cerâmica.

2.3.6 Metacaulin

O metacaulin é uma pozolana artificial de origem natural, obtida através da calcificação da argila caulínica (o caulino) a temperaturas entre 600°C e 900°C. A água adsorvida é perdida ao atingir a temperatura de 100°C e a desidratação ocorre em torno dos 500°C, formando assim, o metacaulin a cerca de 600°C e até 900°C.

A ligação do metacaulin com a cal concede às argamassas uma maior durabilidade, trabalhabilidade, resistência mecânica, redução do tempo de cura, redução da permeabilidade, redução das emissões de CO₂, tornando-se, assim, uma adição mais sustentável em comparativo com os ligantes com que pode reagir (Moisés & Cabrera, 2002).

2.3.7 Aditivos ou adjuvantes

Todas as argamassas contêm pelo menos um ligante e um agregado (areia). É o caso frequente das argamassas feitas *in situ*. Mas podem conter também adições em complemento ou substituição do ligante, como alguns dos casos anteriormente mencionados. As argamassas pré doseadas podem ainda conter aditivos ou adjuvantes que, utilizados em muito baixas percentagens, podem ter uma importante ação no estado fresco ou endurecido das argamassas. Estes constituintes não vão ser aqui desenvolvidos por não serem utilizados nas argamassas analisadas.

2.4 Caracterização de argamassas

A realização de ensaios *in situ* em argamassas foi alvo de estudo de diversos autores. Ao variar o ligante, traço ligante:agregado e adição de pozolanas, foi possível obter resultados que fomentam a eficácia destas argamassas em um ambiente de exposição natural e, conseqüentemente, a sua utilização na construção. Os tipos de argamassas e síntese dos resultados obtidos, serão apresentados em Tabelas na secção 3.1 deste trabalho.

2.4.1 Argamassas de terra, de cal aérea e de cal e terra

Em seu trabalho, Faria et al. (2016) estudaram as argamassas de terra aplicadas no interior de edificações, classificando estas argamassas eco eficientes de forma que podem contribuir com aspectos importantes da edificação e a sustentabilidade da mesma (Lima et al., 2016). Porém, a maior vulnerabilidade deste tipo de argamassa acontece quando esta entra em contacto com a água (Santos et al., 2017).

Santos et al. (2020) buscaram alternativas à esta deficiência utilizando tratamentos superficiais com materiais ecológicos em rebocos com argamassas de terra em murete de tijolo e analisando o seu envelhecimento natural quando expostos a intempéries.

Minke (2006) mostrou que, a fim de melhorar a resistência mecânica e durabilidade dos rebocos de terra, a cal aérea surge como adição da terra argilosa no fabrico de argamassas. Porém esta melhoria não foi totalmente comprovada (Gomes et al., 2018; Santos et al., 2017).

Ao analisar a importância da cal aérea na evolução da construção, é aceitável que a mesma seja alvo de interesse de diversos estudos. Os conhecimentos sobre as técnicas de aplicação das argamassas de cal aérea eram transmitidos entre os pedreiros. Porém, com o passar do tempo, caíram no esquecimento (Veiga, 2017). Com o crescimento do setor da reabilitação de edifícios antigos constatou-se, então, a necessidade de buscar este conhecimento a muito perdido. Estudiosos no mundo todo realizaram estudos na tentativa de buscar a excelência no uso da cal como argamassa na reabilitação de edifícios.

A cal aérea em pasta adquire melhores resultados após um longo período de extinção. Porém, por necessitar da imersão em água e constituir uma pasta, não é muito compatível com as práticas mais modernas, sendo muitas vezes sendo preterida à cal hidratada seca em pó (Faria et al., 2008).

Santos et al. (2017), realizou ensaios *in situ* em argamassas de terra argilosa de traço 1:2 e 1:3 de areia silicosa não lavada e lavada aplicadas em muretes de tijolos furados, a fim de avaliar a influência da lavagem nas características dos rebocos. A estas argamassas foram adicionadas aproximadamente de 5% a 8% de cal aérea, a fim de avaliar a influência da adição no desempenho mecânico dos rebocos. Após quase 2 anos de exposição notou-se uma degradação, principalmente na zona inferior dos rebocos, apresentando inclusive perda de aderência ao suporte. Além disto, a baixa adição de cal aérea às argamassas não conferiu aumento na resistência mecânica dos rebocos.

A fim de analisar o comportamento da argamassa de cal aérea sem substituição de ligantes em comparação com argamassas com esta substituição Jamú (2013), Dias (2013) e Santos (2013) aplicaram rebocos de argamassas de cal aérea em painéis num murete de taipa exposto a Este e a Oeste. As argamassas de Jamú tinham traços de 1:2 e as de Dias traços de 1:3 em volume de ligante:agregado. Santos (2013) ainda adicionou fibras naturais.

As argamassas de cal aérea com substituição do ligante por terra caulinítica pode significar uma solução inovadora em comparação com as argamassas de cal aérea com outros aditivos (Jamú, 2013).

No quesito ambiental, a terra caulinítica torna-se uma melhor opção em comparação à outras argamassas de cal, pois a energia primária para sua fabricação é zero e, no quesito histórico, torna-se uma alternativa viável pela compatibilidade com suportes antigos (Jamú, 2013).

2.4.2 Argamassa de cal aérea e metacaulin

Arizzi e Cultrone (2012) produziram argamassas de cal aérea e areia, substituindo em massa 10% e 20% da cal aérea por metacaulin, em diferentes traços. A conclusão foi que a quantidade de metacaulin

substituído e a resistência à compressão e porosidade estão relacionados. O estudo tentou otimizar as proporções de substituição a serem utilizados em conservação de edifícios antigos.

O surgimento das argamassas de cal aérea com adição de pozolanas, neste caso, o metacaulin, vêm associado à necessidade de suprir a alta permeabilidade da cal aérea e melhora consideravelmente as suas características mecânicas (Lino, 2013).

O estudo desenvolvido por Lino (2013) contribui na avaliação do comportamento de argamassas de cal aérea com substituição por metacaulin. Neste estudo produziram-se argamassas com base em cal aérea e areia utilizando o traço de 1:2 em volume, com substituição de 0% e 30% em massa de cal aérea por metacaulin. Este estudo chegou à conclusão que a substituição realizada, contribuiu para a melhoria das características mecânicas e comportamento face à água das argamassas de cal aérea, tornando-as propícias para a utilização em reabilitação de edifícios antigos.

Vejmelková et al. (2012) caracterizaram argamassas de cal aérea e metacaulin com traço de 1:3 em volume e substituíram em massa 20% da cal aérea por metacaulin, variando o grau de pureza da cal. As conclusões deste estudo foi que, variando o grau de pureza da cal, é possível melhorar as características mecânicas das argamassas. A resistência à compressão atingiu valores cinco vezes mais altos que a da argamassa de referência, a resistência à flexão valores três vezes superiores. Levando em conta o comportamento face à água, foi apresentada uma redução de 25% do coeficiente de difusão ao vapor de água e 20% do coeficiente de absorção de água, em comparação as argamassas de referência.

As argamassas de cal aérea e metacaulin realizadas por Vargas (2013) em provetes prismáticos, simulando reboco sobre tijolo e painéis de rebocos em muretes em exposição natural possuem traço de 1:2 em volume na proporção ligante:agregado e sofreram substituição em massa de 10% e 20% de cal aérea por metacaulin. O estudo concluiu que as argamassas podem ser utilizadas em rebocos em edifícios antigos, devendo a areia ser otimizada, a fim de reduzir o coeficiente de capilaridade encontrado. Vargas (2013) ainda analisou em laboratório provetes de argamassas com traços volumétricos de 1:2 em proporção cal aérea:areia, com substituições da cal por 0%, 10% e 20% de metacaulin, e aplicou essas argamassas em painéis de reboco em murete de alvenaria de tijolo furado. Neste trabalho as argamassas com substituição de 20% mostraram melhor resultado e foram as únicas que cumpriram, no quesito de coeficiente de capilaridade e para rebocos exteriores e para fechamento de juntas, os requisitos definidos por Veiga et al. (2010).

Lino (2013) em seu trabalho realizou uma campanha experimental *in situ* em argamassas de cal aérea de traço 1:2, 1:2,5 e 1:3 com substituições de 0% e 30% de metacaulin em muretes experimentais, aos 28, 90 e 180 dias de cura, de forma a analisar o comportamento das argamassas à exposição natural. Este estudo concluiu que os traços volumétricos de 1:2 e 1:2,5 e substituições de 30% de metacaulin apresentaram melhor comportamento mecânico dentre as argamassas, sendo adequada para a sua utilização em edifícios antigos.

A fim de estudar a eficácia da adição de metacaulin e pigmentos minerais em argamassas de cal aérea Pascoal et al., (2014) realizaram argamassas de traços 1:4 e substituição de 25% de metacaulin e desta com adições de 3% e 5% de pigmentos minerais aplicadas sobre suporte de tijolo cerâmico. À estas argamassas optou-se por uma aplicação por uma técnica manual de spray e após sua consolidação procedeu-se uma cura em câmara húmida, de forma a promover a formação de produtos pozolânicos. Após uma campanha *in situ* concluíram que as argamassas estudadas apresentaram uma melhora moderada nas resistências mecânicas e durezas superficiais, além de redução de permeabilidade à água e alta durabilidade em variações climáticas.

2.4.3 Argamassas de cal hidráulica natural e dessa cal com metacaulin

Até a segunda metade do século XIX as argamassas de cal eram bastante utilizadas na construção de edifícios, sendo substituídas pelo cimento Portland e caindo em desuso progressivo. As vantagens do cimento Portland em comparação às cals são basicamente a sua maior resistência e o seu rápido endurecimento, fatores que são bastante significativos no cenário da construção (Veiga, 2017).

Porém, as argamassas cimentícias podem trazer sérios danos ao suporte, visto que sua baixa flexibilidade, baixa porosidade podem levar a um acúmulo de água entre o suporte e o reboco (Grilo, 2013).

Tal como referido na secção 2.3.3, a cal hidráulica natural (NHL) possui duas fases de endurecimento, uma mais rápida e outra mais lenta. Esta cura mais lenta resulta num aumento do volume, preenchendo os poros e fissuras da superfície da argamassa, reduzindo assim, a propagação do dióxido de carbono em grandes profundidades do reboco (Grilo & Faria, 2012).

Grilo et al. (2014a, 2014b) caracterizaram argamassas de NHL sem e com substituição parcial do ligante por metacaulin, mas apenas em provetes e não em rebocos em muretes em exposição natural. Valério (2013) caracterizou em laboratório provetes de argamassas de NHL ao traço volumétrico 1:3 com substituições de 0, 2,5% e 5% de NHL por metacaulin, e aplicou essas argamassas num murete

de alvenaria de tijolo furado, exposto a Norte e a Sul. Neste estudo concluiu-se que a adição de metacaulin não influenciou na redução da absorção de água, nem a quantidade de total de água absorvida. Em relação às características mecânicas não se observou nenhuma alteração com a substituição de metacaulin, porém, estas argamassas cumprem os requisitos mecânicos para sua utilização de edifícios antigos propostos por Veiga & Tavares (2002).

Lino (2013) realizou uma campanha experimental in situ em argamassas de cal hidráulica de traço 1:3 com substituições de 0%, 5% e 10% de metacaulin em muretes experimentais, aos 28, 90 e 180 dias de cura, de forma a analisar o comportamento das argamassas à exposição natural. Este estudo concluiu que as argamassas com substituições de 5% de metacaulin apresentaram melhor comportamento mecânico dentre as argamassas, sendo adequada para a sua utilização em edifícios antigos.

2.4.4 Argamassa de cal hidráulica natural e resíduos cerâmicos

Como dito anteriormente o uso de resíduos cerâmicos em argamassas de cal aérea remete a construções da Antiguidade, sendo assim algo que justifica o interesse em vários estudiosos de entender melhor o seu funcionamento.

Marques et al., (2006) desenvolveram uma metodologia a fim de caracterizar e simplificar a escolha de argamassas de cal hidráulica utilizadas na reabilitação de edifícios antigos. Os autores determinaram dois métodos essenciais para caracterizar e escolher as argamassas de reabilitação: a análise distintiva, a fim de determinar as proporções utilizadas e os principais constituintes das argamassas, e a caracterização comparativa, que consiste em replicar argamassas já existentes e realizar a sua caracterização física e mecânica para comparações futuras.

Maravelaki-Kalaitzaki (2005) realizou uma intervenção em argamassas históricas do século XV originais em Creta. As principais causas de deterioração das argamassas eram devidas a cristalização de sais, movimentação de sais e água pelas paredes devido à capilaridade. A argamassa original de cal magnesiana teve que ser substituída por uma argamassa de NHL com adição de areia silicosa e resíduos de tijolo triturado, pois intervenções anteriores utilizando argamassas de cimento aceleraram a sua degradação. Os ensaios realizados nas amostras retiradas foram de resistência a compressão, módulo de elasticidade, porosidade e distribuição dos poros foi determinado em estado inicial e após um ano de cura. Após 3 anos de intervenção, a análise dos materiais não revela nenhuma fissura ou ocorrência de sais solúveis, mostrando-se ter sido eficaz.

Torres et al. (2020) realizaram um estudo utilizando traços volumétricos de 1:3 de proporção NHL:agregado, com substituição da NHL por resíduos cerâmicos em pó nas percentagens de 0%, 20% e 40% em volume. Utilizando o traço em volume de 1:4 de ligante:agregado ainda realizaram argamassas de NHL com substituição de agregado por pó cerâmico nas percentagens de 0% e 30% . A análise deu-se no período de 28 dias de cura. Este estudo concluiu que a adição de resíduos cerâmicos nas argamassas de NHL levou a um aumento da porosidade aberta, absorção de água por capilaridade e permeabilidade ao vapor de água, módulo de elasticidade dinâmica e resistência mecânica, sendo, desta forma, aconselhado o seu uso em novas construções, porém, para seu uso na reabilitação de edifícios ainda devem ser tomadas algumas precauções.

Matias (2013) aplicou argamassas de NHL com proporção de 1:3 e substituições de 0%, 20% e 40% de agregado por resíduos cerâmicos em pó em painéis de reboco em edifício antigo em exposição natural. Este trabalho concluiu que as argamassas com substituição de 40% de agregado apresentaram melhor performance física, como permeabilidade ao vapor de água e absorção de água por capilaridade, porém, a sua alta resistência física pode não ser ideal para sua utilização em edifícios antigos.

Fontes (2013) realizou a caracterização de argamassas de NHL com substituições de massa de cal por resíduo cerâmico e metacaulin, donde a argamassa de referência não foi realizada substituição por metacaulin. O traço utilizado foi de 1:3, com substituições de 0%, 5% e 10% de resíduo cerâmico, além de 5% e 10% de metacaulin, e cada composição sujeita a três tipos de cura, onde constatou-se que as sujeitas a cura húmida apresentaram resistências mecânicas superior às demais. Ao realizar a substituição de resíduo cerâmico e metacaulin aumentaram consideravelmente a resistência mecânica das argamassas, porém, as que apenas tiveram substituição de resíduo cerâmico apresentam resistência menores que as argamassas de referência.

Madeira (2013) estudou argamassas de NHL com traços volumétricos de 1:4 de ligante:agregado, com substituição do ligante por resíduos de ladrilho e por resíduos de tijolo cerâmico em 0%, 10% e 25% e concluiu que a cura possui fator importante no desempenho físico das argamassas e ainda que, as argamassas com traço de 10% e 25% de resíduo cerâmico apresentam melhor resistência mecânica e menor absorção de água por capilaridade em comparação às argamassas de referência e, entre as duas, a de 25% mostrou-se a com melhores resultados.

2.4.5 Síntese da caracterização de outros autores

Poucos trabalhos de outros autores apresentam resultados de ensaios *in situ* em argamassas de cais. A Tabela 2.5 e 2.6 apresentam um resumo destes trabalhos. As Tabelas 2.7-2.11 apresentam os resultados encontrados por estes autores para os ensaios de durómetro, esclerómetro, velocidade de pulso ultrassônico, resistência ao impacto de esfera e absorção de água a baixa pressão por tubos de Karsten, respetivamente.

Tabela 2.5 – Caracterização de rebocos de cais através de ensaios que podem ser feitos *in situ*

| Ref. Bibli. | Ligante Principal | Ligante:agregado (volume) | | | Outros Ligantes | Proporção ligante:outros ligantes |
|---------------------|-------------------|---------------------------|-----|-------|-------------------|-----------------------------------|
| | | 1:2 | 1:3 | | | |
| Santos et. al, 2017 | Terra Caulinítica | 1:2 | 1:3 | | NHL | - |
| Santos et. al, 2019 | Terra Argilosa | Desconhecido | | | - | - |
| Faria et. al, 2014 | CL | CL2 | CL3 | | Terra Caulinítica | - |
| | | 1:2 | 1:3 | | | - |
| Veiga, 2009 | CL | 1:9 | 1:3 | | NHL | 1:2 |
| Lino, 2013 | CL | NHL | 1:2 | 1:2,5 | 1:3 | - |

Tabela 2.6 - Caracterização de rebocos de cais com pozolanas através de ensaios que podem ser feitos *in situ*

| Ref. Bibli. | Pozolana | Proporção ligante:pozolana | Substituições ao traço | | | | |
|----------------------|----------|----------------------------|--------------------------|------------------------|-------|-----------------------|------------------------|
| | | | CL2 | CL2_25e | CL3 | | |
| Santos et. al, 2017 | - | - | 5%-8% de adição ao traço | | 5%-8% | | |
| Faria et. al, 2014 * | - | - | CL2 | CL2_25e | CL3 | | |
| | - | - | - | 25% de agregado por CL | - | | |
| Veiga, 2009 ** | Mk | 1:0,5 | - | | | | |
| Lino, 2013 | Mk | - | CL | | NHL | | |
| | | | 0% | 30% de agregado por Mk | 0% | 5% de agregado por Mk | 10% de agregado por Mk |

* Murete de Taipa

** Parede Histórica de pedra com argamassa de cal

Tabela 2.7 – Resultados de outros autores para o ensaio de durômetro Shore A

| Ref. Bibli. | Santos et al., 2017 | | Faria, 2014 | | Lino, 2013 | |
|-----------------------------------|---------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|----------|
| Durômetro Shore A (Graus Shore A) | CL | 51 | NHL3,5_1:3_N | 79,9±2,6 | NHL3,5_1:3_N | 79,9±2,6 |
| | | | NHL3,5_1:3_S | 80,0±2,3 | NHL3,5_1:3_S | 80,0±2,3 |
| | | | NHL3,5_1:3_5Mk_N | 80,4±2,1 | NHL3,5_1:3_5Mk_N | 80,4±2,1 |
| | | | NHL3,5_1:3_5Mk_S | 80,3±1,7 | NHL3,5_1:3_5Mk_S | 80,3±1,7 |
| | | | NHL3,5_1:3_10Mk_N | 82,0±2,0 | NHL3,5_1:3_10Mk_N | 82,0±2,0 |
| | NHL3,5_1:3_10Mk_S | 81,4±2,2 | | | | |
| | NHL | 71 | NHL3,5_1:3_10Mk_S | 81,4±2,2 | CL_1:2 | 78,3±2,6 |
| | | | | | CL_1:3 | 73,9±2,3 |
| | | | CL_1:2 | 78,3±2,6 | CL_1:2_30Mk_N | 78,5±3,1 |
| | | | | | CL_1:2_30Mk_S | 79,3±2,8 |

Tabela 2.8 - Resultados de outros autores para o ensaio de esclerômetro pendular

| Ref. Bibli. | Santos et al., 2017 | | Santos et al., 2019 | Faria, 2014 | | Lino, 2013 | |
|---------------------------------------|---------------------|----|---------------------|-------------|------|-------------------|----------|
| Esclerômetro Pendular (Graus Vickers) | CL | 27 | 700 | CL2 | 79±4 | NHL3,5_1:3_N | 79,9±2,6 |
| | | | | | | NHL3,5_1:3_S | 80,0±2,3 |
| | | | | CL2_25e | 80±4 | NHL3,5_1:3_5Mk_N | 80,4±2,1 |
| | | | | | | NHL3,5_1:3_5Mk_S | 80,3±1,7 |
| | NHL | 42 | | CL2_10e | 84±6 | NHL3,5_1:3_10Mk_N | 82,0±2,0 |
| | | | | | | NHL3,5_1:3_10Mk_S | 81,4±2,2 |
| | | | | CL_1:2 | 83±5 | CL_1:2 | 78,3±2,6 |
| | | | | | | CL_1:3 | 73,9±2,3 |
| | | | | CL3 | 83±5 | CL_1:3_30Mk_N | 78,5±3,1 |
| | | | | | | CL_1:3_30Mk_S | 79,3±2,8 |

Tabela 2.9 - Resultados de outros autores para o ensaio de velocidade de pulso ultrassônico

| Ref. Bibli. | Santos et al., 2019 | Faria, 2014 | | Lino, 2013 | |
|--|---------------------|-------------|---------|-------------------|--------------|
| Velocidade de pulso ultrassônico (m/s) | 1180 | CL2 | 551±94 | NHL3,5_1:3_N | 1774,4±316,3 |
| | | | | NHL3,5_1:3_S | 1464,1±217,4 |
| | | | | NHL3,5_1:3_5Mk_N | 1554,9±283,5 |
| | | CL2_25e | 775±98 | NHL3,5_1:3_5Mk_S | 1553,6±289,2 |
| | | | | NHL3,5_1:3_10Mk_N | 1322,8±253,3 |
| | | - | - | NHL3,5_1:3_10Mk_S | 1384,8±249,9 |
| | | CL2_10e | 725±104 | CL_1:2 | 870,5±96,3 |
| | | | | CL_1:3 | 1102,7±137,2 |
| | | CL3 | 740±172 | CL_1:3_30Mk_N | 1086,9±136,9 |
| | | | | CL_1:3_30Mk_S | 1015,5±110,3 |

Tabela 2.10 - Resultados de outros autores para o ensaio de resistência ao impacto de esfera

| Ref. Bibli. | Santos et al., 2017 | | Veiga, 2009 | | |
|---------------------------------------|---------------------|----|-------------|------------|------|
| Resistência ao Impacto de Esfera (mm) | CL | 23 | CL+NHL | 6 semanas | 13 |
| | | | | 14 semanas | 11 |
| | NHL | 20 | CL + Mk | 6 semanas | 0,3 |
| | | | | 14 semanas | 0,23 |

Tabela 2.10 - Resultados de outros autores para o ensaio de resistência ao impacto de esfera (continuação)

| Ref. Bibli | Lino, 2013 | | Santos et al., 2019 |
|---------------------------------------|-------------------|----------|---------------------|
| Resistência ao Impacto de Esfera (mm) | NHL3,5_1:3_N | 8,2±0,4 | 19 |
| | NHL3,5_1:3_S | 8,4±1,1 | |
| | NHL3,5_1:3_5Mk_N | 10,4±0,5 | |
| | NHL3,5_1:3_5Mk_S | 10,6±1,3 | |
| | NHL3,5_1:3_10Mk_N | 9,6±1,5 | |
| | NHL3,5_1:3_10Mk_S | 10,0±0,7 | |
| | CL_1:2 | 19,0±1,6 | |
| | CL_1:3 | 18,6±1,1 | |
| | CL_1:3_30Mk_N | 16,2±1,8 | |
| | CL_1:3_30Mk_S | 14,0±1,0 | |

Tabela 2.11 - Resultados de outros autores para o ensaio de absorção de água a baixa pressão por tubos de Karsten

| Ref. Bibli. | Santos et al., 2017 | | Faria, 2014 | |
|---|---------------------|-----|-------------|------|
| Absorção de água (cm ³ /t ^{1/2}) | CL | 2,1 | CL2 | 11,4 |
| | | | CL2_25e | 17,9 |
| | NHL | 1,5 | CL2_10e | 5,1 |
| | | | CL3 | 8,2 |

Tabela 2.11 - Resultados de outros autores para o ensaio de absorção de água a baixa pressão por tubos de Karsten (continuação)

| Ref. Bibli. | Veiga, 2009 | | | Lino, 2013 | |
|---|-------------|------------|------------------|-------------------|-------|
| Absorção de água (cm ³ /t ^{1/2}) | CL+ NHL | 6 semanas | 2,60 (aos 45min) | NHL3,5_1:3_N | 08:09 |
| | | | | NHL3,5_1:3_S | 05:42 |
| | | 14 semanas | >3,53 | NHL3,5_1:3_5Mk_N | 15:16 |
| | | | | NHL3,5_1:3_5Mk_S | 03:32 |
| | CL + Mk | 6 semanas | 2,60 (aos 45min) | NHL3,5_1:3_10Mk_N | 17:19 |
| | | | | NHL3,5_1:3_10Mk_S | 16:32 |
| | | 14 semanas | >3,53 | CL_1:2 | 07:15 |
| | | | | CL_1:3 | 08:39 |
| | | | | CL_1:3_30Mk_N | 16:12 |
| | | | | CL_1:3_30Mk_S | 15:38 |

3 Caracterização dos muretes, rebocos e argamassas a ensaiar na campanha experimental

Nesta campanha experimental realizaram-se ensaios *in situ* em diversos painéis de reboco expostos na Estação de Exposição Natural de Alvenarias e Revestimentos do Departamento de Engenharia Civil da FCT NOVA. Esta Estação encontra-se localizada no Campus da FCT NOVA, a cerca de 3 km do Oceano Atlântico e 3 km do rio Tejo.

Das argamassas estudadas neste trabalho, apenas as argamassas de cal aérea e terra fabricadas por Dias e Jamú (2013) possuem ensaios resultados *in situ* realizados após 1 ano de sua aplicação, as demais não possuem outros estudos após o seu fabrico.

3.1 Caracterização dos suportes

Os painéis de reboco analisados são constituídos pelas argamassas, suportes e exposições que se ilustram nas Figuras 3.1 e 3.2.

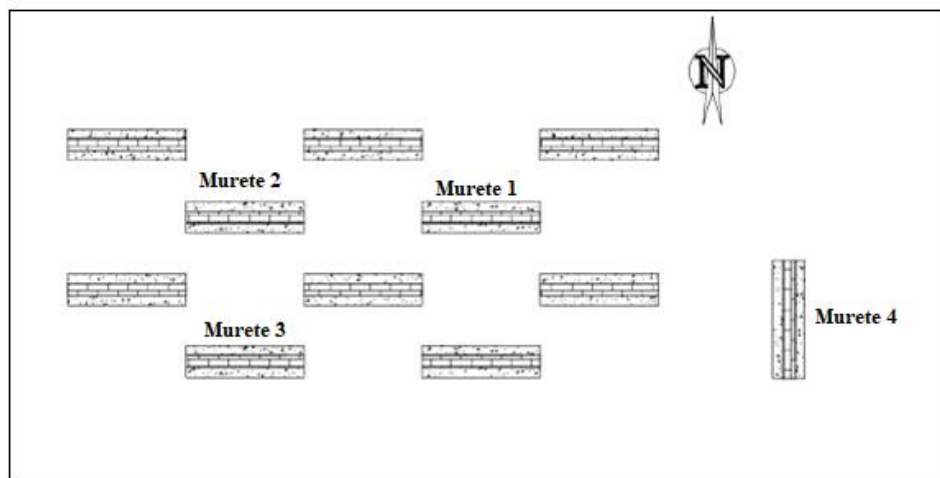


Figura 3.1- Planta com a localização e exposição dos muretes na Estação de Exposição Natural de Alvenarias e Rebocos da FCT NOVA

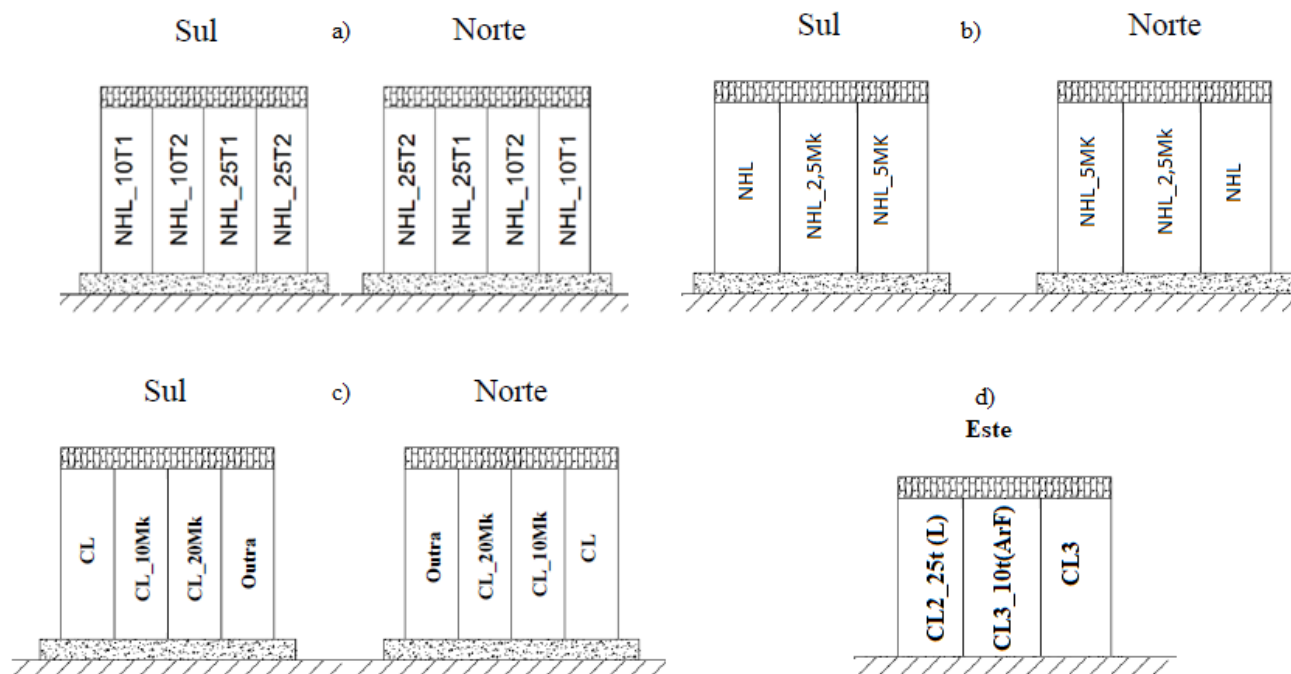


Figura 3.2– Organização das argamassas nos muretes: (a) 1 (Madeira, 2013); b) 2 (Valério, 2013); c) 3 (Vargas, 2013); d) 4 (Jamú, 2013)

Os muretes 1 a 3 são de alvenaria de tijolo furado e o murete 4 é de taipa.

O murete de taipa foi construído em junho de 2012, num workshop promovido pela Associação Centro da Terra na FCT NOVA, e está fundado diretamente no solo, sem nenhuma fundação nem corte de capilaridade e encontra-se orientado à direção este-oeste.

A fim de caracterizar o suporte de taipa, Faria et al. (2014) realizaram ensaios de condutibilidade térmica, absorção de água a baixa pressão por tubos de Karsten e resistência superficial por esclerómetro pendular.

Os muretes de alvenaria de tijolo cerâmico furado de 15 cm foram executados em alvenaria assente em sapatas de betão fracamente armado, possuem altura de 2 m e largura de 2,5 m. e foram realizados em 2013 e possuem orientação norte-sul.

As Tabelas 3.1, 3.2 e 3.3 apresentam a caracterização efetuada, respetivamente: nos suportes (taipa e tijolo furado); nos rebocos de cal aérea e terra no murete de taipa e em provetes de reboco em tijolo; em provetes de reboco em tijolo com argamassas de cal aérea e metacaulin; em provetes de reboco em tijolo com argamassas de NHL com resíduos de cerâmica.

Faria et al. (2014), realizou o ensaio de condutibilidade térmica utilizando o aparelho ISOMET 2104 (Heat Transfer Analyser), com uma sonda de superfície API 210412, e o procedimento de ensaio foi baseado no manual do equipamento afim de garantir que o suporte estivesse dentro dos valores Tabelados no ITE 50 (Pina dos Santos & Matias, 2006).

O valor apresentado da média apresenta-se maior que o de referência do ITE 50 (Pina dos Santos & Matias, 2006) para adobe, taipa e blocos de terra, porém pode ser justificado pelo alto grau de humidade que o murete apresentava (Jamú, 2013).

Foi realizado por Jamú (2013) o ensaio de absorção de água à baixa pressão utilizando tubos de Karsten nos suportes de taipa. O ensaio foi baseado na ficha de ensaio Fe Pa 39 do LNEC (2002) e o Test nº II 4 da RILEM (1980b) de forma a determinar o coeficiente de absorção total do suporte.

A absorção de água à baixa pressão na taipa não foi realizada na parte mais baixa do murete, pois a zona encontrava-se muito húmida (Jamú, 2013). O coeficiente de absorção apresentou valores bastante divergentes, podendo ser explicada pelo alto grau de degradação de determinadas zonas da taipa

Tabela 3.1 – Caracterização nos suportes de tijolo furado e taipa

| | Condutibilidade Térmica λ [W/(m.K)] | | Absorção de Água à Baixa Pressão [kg/(m ² .min ^{1/2})] | | Resistência Superficial por Esclerómetro Pendular [Graus Vickers] | |
|---------------|--|---------------|---|---------------|---|---------------|
| | Média | Desvio Padrão | Média | Desvio Padrão | Média | Desvio Padrão |
| Tijolo Furado | 0,596 | 0,083 | 0,70 | 0,07 | - | - |
| Taipa | 1,24 | 0,35 | 8,25 | 3,95 | 86,83 | 5,76 |

Tabela 3.2 – Caracterização dos rebocos de cal aérea e terra no murete de taipa e suporte de tijolo

| | Dureza Superficial por Durómetro Shore A | | Condutibilidade Térmica λ [W/(m.K)] | | Velocidade de Propagação de Ultrassons aos 90 dias [m/s] | | Resistência Superficial por Esclerómetro Pendular [Graus Vickers] | |
|---------------|--|---------------|--|---------------|--|---------------|---|---------------|
| | Média | Desvio Padrão | Média | Desvio Padrão | Média | Desvio Padrão | Média | Desvio Padrão |
| Tijolo Furado | 60,9 | ±10,2 | 0,49 | ±10,2 | 988 | ±156 | - | - |
| Taipa | 63 | ±8 | 63 | ±8 | 551 | ±94 | 79 | ±4 |

Tabela 3.3 - Caracterização dos rebocos de cal aérea e metacaulin em suporte de tijolo

| | Dureza Superficial por Durómetro Shore A | | Condutibilidade Térmica λ [W/m.K] | | Velocidade de Propagação de Ultrassons aos 90 dias [m/s] | | Resistência Superficial por Esclerómetro Pendular [Graus Vickers] | |
|---------------|---|---------------|---|---------------|---|---------------|--|---------------|
| | Média | Desvio Padrão | Média | Desvio Padrão | Média | Desvio Padrão | Média | Desvio Padrão |
| Tijolo Furado | 60,9 | ±10,2 | 0,49 | ±10,2 | 988 | ±156 | - | - |

3.2 Argamassas e rebocos em estudo

A fim de facilitar o entendimento das argamassas aplicadas nos muretes na Estação de Exposição Natural de Alvenarias e Revestimentos do DEC e sua devida localização geográfica, as Tabelas 3.4 e 3.5 apresentam o resumo das argamassas de reboco que se encontram em cada murete exposto e as suas principais características.

Todos os rebocos foram aplicados em alvenaria de tijolo furado expostos a norte e a sul, com exceção dos rebocos aplicados no murete 4, que é de taipa e exposto apenas a este.

Devida à alta exposição à chuva e intempéries, a zona exposta a Sul do murete de taipa colapsou. Como essa zona do murete de taipa estava revestida pela argamassa CL2, descrita por Faria et al. (2014), este painel de reboco também colapsou, impossibilitando, assim, a execução dos ensaios e sua devida comparação. Desta forma, os resultados obtidos por Faria et al. (2014) para esta argamassa foram desconsiderados no decorrer deste trabalho.

Tabela 3.4 - Localização e principais características das argamassas de NHL em estudo

| Murete | Argamassas | Aditivo | Traço (vol.) | Substituição de ligante em volume | Autor |
|---------------|-------------------|------------------------------|---------------------|--|---------------|
| 1 (S e N) | NHL_25T2 | Resíduo de ladrilho cerâmico | 1:4 | 25% | Madeira, 2013 |
| | NHL_25T1 | Resíduo de tijolo cerâmico | 1:4 | 25% | Madeira, 2013 |
| | NHL_10T2 | Resíduo de ladrilho cerâmico | 1:4 | 10% | Madeira, 2013 |
| | NHL_10T1 | Resíduo de tijolo cerâmico | 1:4 | 10% | Madeira, 2013 |
| 2 (S e N) | NHL | - | 1:3 | - | Valério, 2013 |
| | NHL_2,5Mk | Metacaulin | 1:3 | 2,5% | Valério, 2013 |
| | NHL_5Mk | Metacaulin | 1:3 | 5% | Valério, 2013 |

Tabela 3.5 - Localização e principais características das argamassas de CL em estudo

| Murete | Nomenclatura | Aditivo | Traço (vol.) | Substituição de ligante em volume | Autor |
|---------------|---------------------|-----------------|---------------------|--|--------------------|
| 3 (S e N) | CL | - | 1:2 | - | Vargas,2013 |
| | CL_10Mk | Metacaulin | 1:2 | 10% | Vargas,2013 |
| | CL_20Mk | Metacaulin | 1:2 | 20% | Vargas,2013 |
| 4 (E) | CL2 * | - | 1:2 | - | Faria et al., 2014 |
| | CL2_15t | Terra Caulínica | 1:2 | 15% | Faria et al., 2014 |
| | CL3_10t | Terra Caulínica | 1:3 | 10% | Faria et al., 2014 |
| | CL3 | - | 1:3 | - | Faria et al., 2014 |

*Painel de argamassa colapsado

4 Procedimentos de ensaios *in situ*

Para analisar como as argamassas aplicadas em rebocos de muretes na Estação de Exposição Natural de Alvenarias e Revestimentos do DEC se comportaram após a exposição em ambiente natural após 7 anos, foi realizada uma caracterização *in situ*. Realizou-se uma análise visual durante toda a campanha experimental e realizaram-se ensaios de dureza superficial por durômetro e esclerômetro pendular, resistência ao impacto de esfera, velocidade de pulso ultrassônico e absorção de água à baixa pressão por tubos de Karsten. Os ensaios foram realizados nesta ordem, como mostrado na Figura 4.1, de forma que a realização do ensaio anterior não influenciasse nos resultados dos ensaios a seguir.

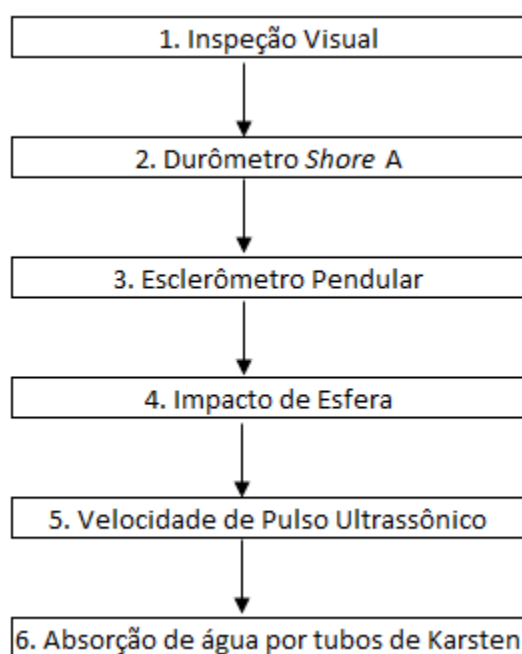


Figura 4.1 - Ordem de realização dos ensaios *in situ*

Estes ensaios foram realizados entre julho e agosto de 2020, em clima seco, após vários dias sem incidência de chuva, com a humidade relativa do ar em 70% e temperatura de 12 °C, como mostrado na Figura 4.2. Os ensaios de esclerômetro pendular, durômetro e resistência ao impacto de esfera também foram realizados com clima húmido, após vários dias de chuva, no mês de novembro de 2020 com humidade de relativa do ar em 83% e temperatura de 17°C.

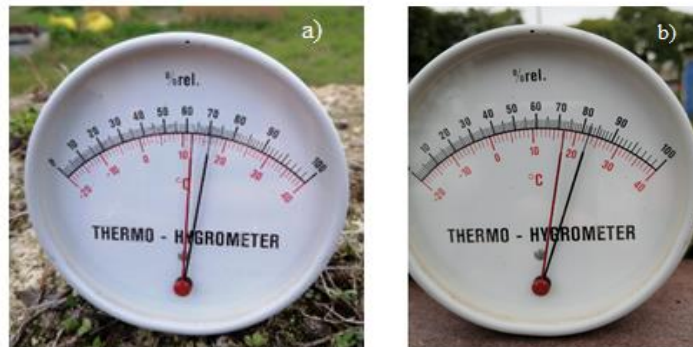


Figura 4.2 – Termohigrometro: (a) em clima seco; b) em clima húmido

4.1 Inspeção visual

Antes de realizar qualquer ensaio nos muretes, procedeu-se uma inspeção visual nos mesmos afim de registrar quaisquer anomalias ou degradações visuais que pudessem ter ocorrido nos rebocos após anos de exposição natural.

Os itens que foram registrados foram Cor, Ocorrência de fissuras e Destacamento do material; a inspeção visual foi realizada previamente ao início de todos os ensaios realizados.

4.2 Dureza superficial por durómetro *Shore A*

O ensaio de dureza superficial foi baseado na norma ASTM D2240 (2000). O ensaio utilizando o durómetro *Shore A* consiste na medição da resistência à penetração de um pino pressionado contra a superfície das argamassas em estudo, apresentando, assim a dureza superficial do material. Como as argamassas são um produto heterogéneo (com pasta de ligante e grãos de agregado), para o presente estudo foram realizadas 36 medições em cada murete, em diferentes alturas, como apresentado na Figura 4.3.

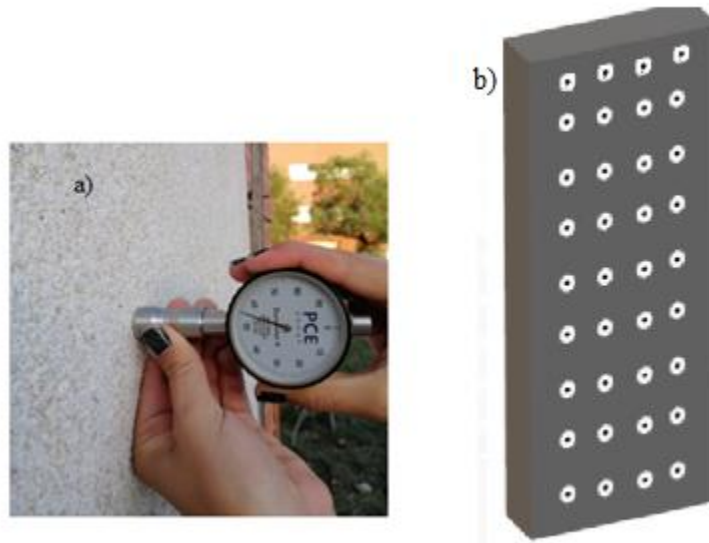


Figura 4.3 – a) Durómetro Shore A e b) Pontos de medição no murete

4.3 Dureza superficial por esclerómetro pendular

O ensaio de resistência superficial utilizando o esclerómetro pendular foi realizado nos rebocos de argamassa baseado na norma ASTM C805 (2008). Foi utilizado um esclerómetro Schmidt PM, conforme mostrado na Figura 4.4. Este aparelho possui uma extremidade, de massa conhecida, que, após ser pressionado um botão de disparo, impacta contra a superfície da argamassa

Após o impacto, o choque faz com que a extremidade móvel torne a subir, estagnando em um valor que equivale à quantidade de energia recuperada pelo choque, obtendo-se, assim, o índice de dureza superficial.

O resultado corresponde à quantidade de energia recuperada no ressalto da extremidade móvel, que pode ser lido na escala graduada incluída no aparelho e corresponde ao índice esclerométrico.

No presente estudo foram ensaiados 24 pontos em cada murete, em diferentes alturas.

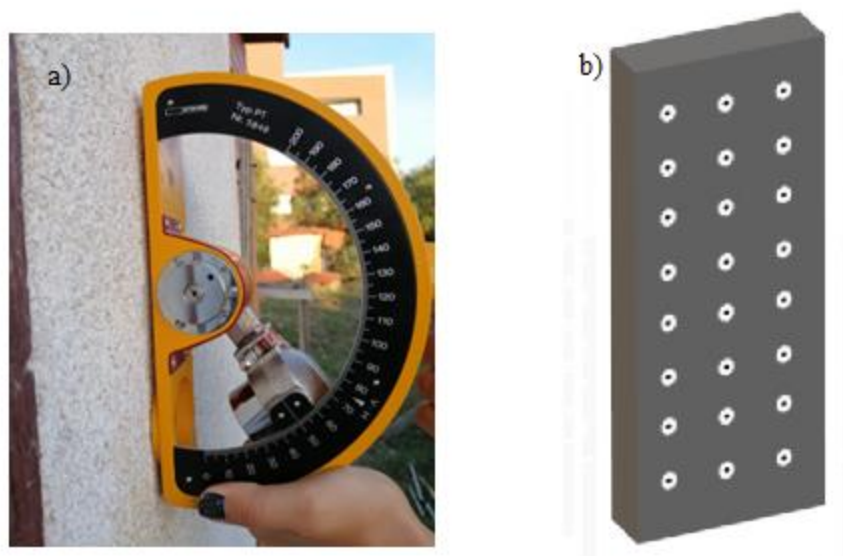


Figura 4.4 – a) Esclerómetro Pendular; b) Pontos de medição nos muretes

4.4 Impacto de esfera

A resistência ao impacto da esfera foi realizada utilizando o equipamento de Martinet-Baronnie e, através do impacto de uma esfera que possui massa conhecida, deixada cair de uma distância também conhecida (em quarto de arco), é possível avaliar a capacidade de deformabilidade e resistência das argamassas (Veiga et al., 2009). O ensaio iniciou-se ao apoiar o equipamento no murete, com a esfera na posição horizontal. Procedeu-se então à liberação da esfera, permitindo que, ao impactar no murete, produzisse um choque de 3J de energia sobre o reboco. A seguir, utilizando um paquímetro, mediu-se a concavidade produzida pelo choque e observando a ocorrência de eventual fendilhação, quantificando, assim, a degradação na superfície do reboco aplicado. No presente trabalho foram realizadas 9 medições em cada murete, em diferentes alturas, como mostrado na Figura 4.5.

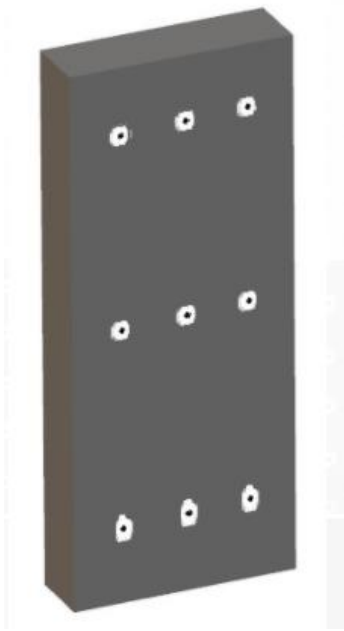


Figura 4.5 - Pontos de medição do impacto de esfera nos muretes

4.5 Velocidade de pulso ultrassónico

O ensaio de velocidade de pulso ultrassónico tem como objetivo avaliar a porosidade e integridade do reboco e, conseqüentemente, a sua compacidade. A velocidade de pulso ultrassónico é calculada utilizando dois transdutores, sendo um emissor e um receptor, e um aparelho central, que emite os pulsos e realiza a aferição do tempo entre transdutores, em μs , a partir do qual se determina a velocidade, com base na distância entre eles. Ao aumentar a distância entre o receptor e o emissor, é possível mensurar a integridade do reboco, pois quanto maior for a velocidade de propagação, maior será a compacidade do reboco e, em consonância, menor a sua porosidade, fendas ou vazios existentes.

No presente estudo, o método utilizado para estas medições é chamado indirecto, ou seja, o emissor foi colocado em um ponto fixo, chamado 0 cm e o receptor foi colocado à 7 diferentes distâncias (6 cm, 8 cm, 10 cm, 12 cm, 15 cm, 18 cm, 20 cm) ao longo de uma reta horizontal. Sabendo a distância e o tempo, foi possível então determinar a velocidade de pulso ultrassónico de cada ponto.

$$V \left(\frac{km}{s} \right) = \frac{\Delta s (km)}{\Delta t (s)}$$

Como a distância se encontra em centímetros e o tempo em μs , foi necessário então converter as unidades para o Sistema Internacional, em metros/segundos.

$$V = \frac{(\Delta s * 10^{-5})}{(\Delta t * 10^{-6})} \text{ [km/s]}$$

Em cada painel dos muretes o ensaio foi realizado em 3 alturas diferentes, sendo o resultado do ensaio a média aritmética dos valores obtidos nas três diferentes alturas, como mostrado na Figura 4.6.

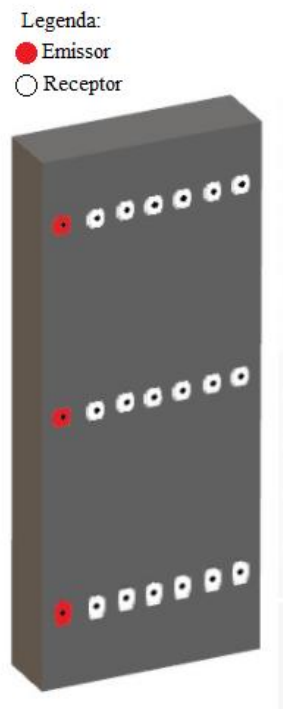


Figura 4.6 - Pontos de medição da velocidade de pulso ultrassônico nos muretes

4.6 Absorção de água sob baixa pressão por tubos de Karsten

O ensaio de absorção de água sob baixa pressão por tubos de Karsten foi realizado de acordo com a EN 16302 (2013). Este ensaio permite avaliar a permeabilidade de um material à água sob pressão, e a sua possível microfissuração, através da quantidade de água absorvida ao longo do tempo.

Para realizar este ensaio, fixaram-se os tubos graduados de 0 a 4 ml com plasticina estanque no murete, conforme a Figura 4.7, vedando e garantindo que a área de contato com o murete se mantivesse constante e não estivesse obstruída. Após esta ação, encheram-se os tubos até a marca de 0 ml e iniciou-se a cronometragem do tempo.

Quando o nível da água atingiu os 4 ml, parou-se o cronometro e anotou-se o tempo decorrido para atingir esta marca. Ao longo do ensaio, anotou-se a quantidade de água absorvida ao fim de 2, 5, 10, 15, 20 e 30 min.

Em cada painel de reboco foram realizadas 3 medições em diferentes alturas.

A fim de unificar a apresentação dos valores de resultados com os de outros autores, utilizou-se a determinação de um coeficiente de absorção aos 5 minutos, utilizando a fórmula abaixo:

$$ca = \frac{w * 10^{-3}}{\phi_m^2 * \frac{\pi}{4} * 10^{-6} * \sqrt{t}}$$

Onde,

Ca – Coeficiente de absorção ($kg/m^2\sqrt{min}$);

W – Quantidade de água absorvida (ml);

ϕ - Diâmetro médio do tubo em contacto com a argamassa (mm).

t – Duração da leitura (min)



Figura 4.7 – a) Tubo de Karsten; b) Pontos de medição dos tubos de Karsten em cada murete

5 Resultados e discussão

5.1 Inspeção visual

Ao realizar a inspeção visual dos muretes com as argamassas expostas foram observados o estado de conservação, a cor, se houve a ocorrência de fissuras e algum destacamento do material.

As Figuras 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4 foram obtidas após a realização dos ensaios e as Tabelas 5.1 e 5.2 resumem os principais pontos encontrados na inspeção visual para argamassas de NHL e CL, respectivamente.



Figura 5.1 - Inspeção visual no Murete 1 com reboco de NHL, resíduos cerâmicos e resíduos de tijolo



Figura 5.2 - Inspeção visual no Murete 2 com rebocos de NHL e metacaulin



Figura 5.3 - Inspeção visual no Murete 3 com rebocos de cal aérea e metacaulin



Figura 5.4 - Inspeção visual no Murete 4 com rebocos de cal aérea e terra

Tabela 5.1 – Inspeção visual das argamassas com substituição por NHL

| Murete | Orientação | Argamassa | Cor | Fendilhação | Destacamento | Observação |
|--------|------------|-----------|-------|-------------|--------------|------------|
| 1 | Sul | NHL_10T1 | Cinza | Não | Não | VEA |
| | | NHL_10T2 | | | | - |
| | | NHL_25T1 | | | | - |
| | | NHL_25T2 | | | | VEA |
| | Norte | NHL_10T1 | | | | - |
| | | NHL_10T2 | | | | - |
| | | NHL_25T1 | | | | - |
| | | NHL_25T2 | | | | VEA |
| 2 | Sul | NHL | Cinza | Não | Não | - |
| | | NHL_2,5Mk | | | | - |
| | | NHL_5Mk | | | | - |
| | Norte | NHL | | | | - |
| | | NHL_2,5Mk | | | | - |
| | | NHL_5Mk | | | | - |

VEA - Vestígios de Ensaios Anteriores

Tabela 5.2 - Inspeção visual das argamassas com substituição por CL

| Murete | Orientação | Argamassa | Cor | Fendilhação | Destacamento | Observação |
|--------|------------|--------------|--------|-------------|--------------|---|
| 3 | Sul | CL | Cinza | Não | Não | VEA |
| | | CL_10Mk | | | | - |
| | | CL_20Mk | | | | - |
| | Norte | CL | | | | - |
| | | CL_10Mk | | | | - |
| | | CL_20Mk | | | | - |
| 4 | Este | CL2 | - | - | - | Colapsou devido à alta incidência de chuvas |
| | | CL2_25t(L) | Marrom | Sim | Sim | ED, VEA |
| | | CL3_10t(ArF) | Marrom | Sim | Sim | ED, VEA |
| | | CL3 | Branco | Sim | Sim | ED, VEA |

VEA - Vestígios de Ensaio Anteriores; ED – Elevado Destacamento

5.2 Durómetro Shore A

O ensaio de durómetro *Shore A* foi realizado em cada painel do murete em clima seco e em clima húmido e apresenta-se a média aritmética de 4 pontos na horizontal e 9 pontos na vertical, totalizando em cada painel de argamassa 36 pontos de medição, como referido anteriormente.

Obtiveram-se grandes desvios-padrão nas diversas leituras, quer com clima seco ou húmido, para cada uma das argamassas. Porém a norma ASTM D2240 (2000) não apresenta nenhum comentário sobre desvios padrões; apenas recomenda não considerar valores acima dos 90 e abaixo dos 20 graus *Shore*. Por esta razão e sabendo que o durómetro é mais adequado para materiais mais deformáveis, os resultados não podem ser interpretados com uma grande certeza. No entanto, ainda assim, é possível encontrar uma tendência nos resultados apresentados.

O murete 2 possui os rebocos de argamassas NHL, NHL_2,5Mk e NHL_5Mk expostos a norte e sul analisados por Valério (2013).

É possível notar, na Figura 5.5, que as argamassas, aplicadas tanto em ambiente seco quanto em ambiente predominantemente húmido, apresentaram valores aproximados. Ao realizar a média destes valores foi possível constatar que o resultado obtido nas argamassas expostas a ambiente seco apresentou valores 5,7% mais altos que os resultados em ambiente húmido, sendo este valor muito

baixo para garantir uma diferença de comportamento das argamassas. Nota-se também o alto grau de desvio padrão encontrado, algo já esperado para este ensaio.

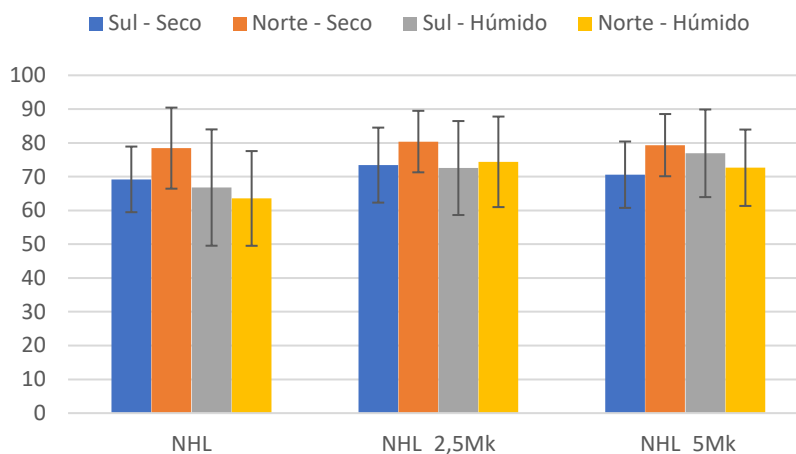


Figura 5.5 - Dureza superficial por durómetro das argamassas aplicadas no Murete 2, com 0%, 2,5% e 5% de substituição da NHL por Mk, expostas a norte e a sul, avaliada em clima seco e húmido

O coeficiente de dureza superficial, apresentado na Figura 5.6, foi medido em três níveis diferentes no murete (base, meio e topo). Desta forma é possível constatar que os três níveis possuem valores aproximados, não havendo grande variação dos valores entre si. Porém, ainda é possível observar que as argamassas voltadas a norte possuem valores mais elevados em comparação com as argamassas voltadas a sul. O maior valor médio encontrado na argamassa voltada a norte na zona do meio do painel de reboco é 19% maior que o menor valor médio encontrado na base das argamassas voltadas a sul.

Este comportamento pode ser explicado pela elevada porosidade da argamassa. Embora alguns autores refiram que o metacaulin possui características pozolânicas que supostamente auxiliam na redução desta porosidade (Veiga et al., 2009), como as regiões do topo e da base são as áreas mais sujeitas à incidência de chuva e ascensão capilar da água, respectivamente, nestas zonas a secagem pode ser prejudicada, o que, deveria aumentar a dureza superficial, uma vez que a reação pozolânica necessita de água para acontecer (Moisés & Cabrera, 2002).

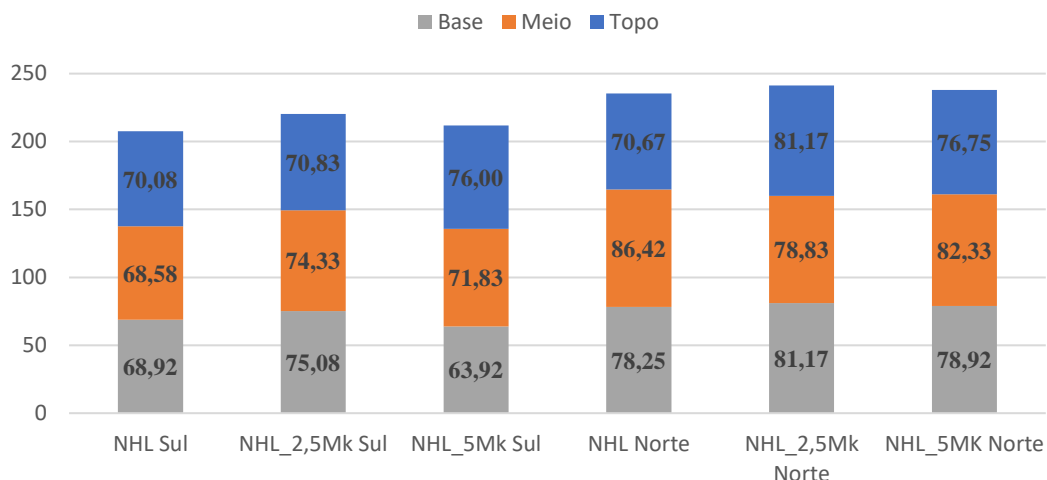


Figura 5.6 - Valores da dureza superficial por durómetro na base, no meio e no topo dos painéis de reboco de argamassas com 0%, 2,5% e 5% de Mk, aplicadas a norte e sul no murete 2

No murete 1 estão expostas a norte e sul os rebocos de argamassas NHL_10T1, NHL_10T2, NHL_25T2, NHL_25T1 analisados por Madeira (2013).

É possível notar que, nos rebocos de argamassa, apresentados na Figura 5.7, os valores tanto a norte quanto a sul apresentam resultados de durómetro semelhantes. Ao realizar a média dos resultados, é possível notar que as argamassas expostas a sul apresentam valores 13,5% maiores que as argamassas voltadas a norte. A orientação sul possui incidência solar dominante, o que facilita a secagem da água absorvida pelo reboco em períodos com incidência de chuva. As argamassas apresentam resultados mais elevados no clima predominante seco face ao húmido; porém, os resultados obtidos são aproximados, sendo a variação média em clima seco superior apenas em 2,5% ao ambiente húmido, valor este que pode ser resultado do fator humano na realização do ensaio.

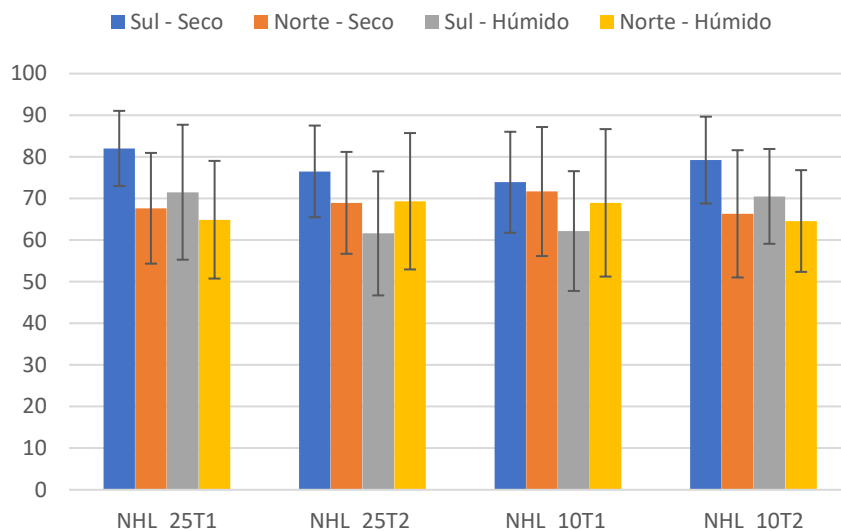


Figura 5.7 - Dureza superficial por durómetro dos rebocos de argamassa com 25% e 10% de resíduos de cerâmica T1 e T2, aplicados no Murete 1 em clima seco e húmido, expostos a norte e a sul

O coeficiente de dureza superficial, mostrado na Figura 5.8, foi medido em três níveis diferentes no murete (base, meio e topo). Desta forma é possível constatar que os três níveis possuem valores aproximados, não havendo grande variação dos valores entre si. Porém, ao realizar a média dos resultados de todos os painéis nas diferentes alturas, foi constatado que as bases dos painéis apresentam o maior valor em média que as demais, sendo ainda a base das argamassas voltadas a sul as que obtêm os maiores valores: aproximadamente 27% maiores que o topo das argamassas voltadas a norte, que possuem o valor mais baixo de entre as médias obtidas.

Este fenómeno pode ser explicado pelas bases de betão sobre as quais os muretes foram construídos que, pela sua forma, proporciona respingos da água da chuva que embatem na base dos rebocos. Para além disso, a baixa incidência de sol na parte inferior do painel, pode também garantir uma melhor reação hidráulica da NHL, conferindo, então, uma maior dureza superficial.

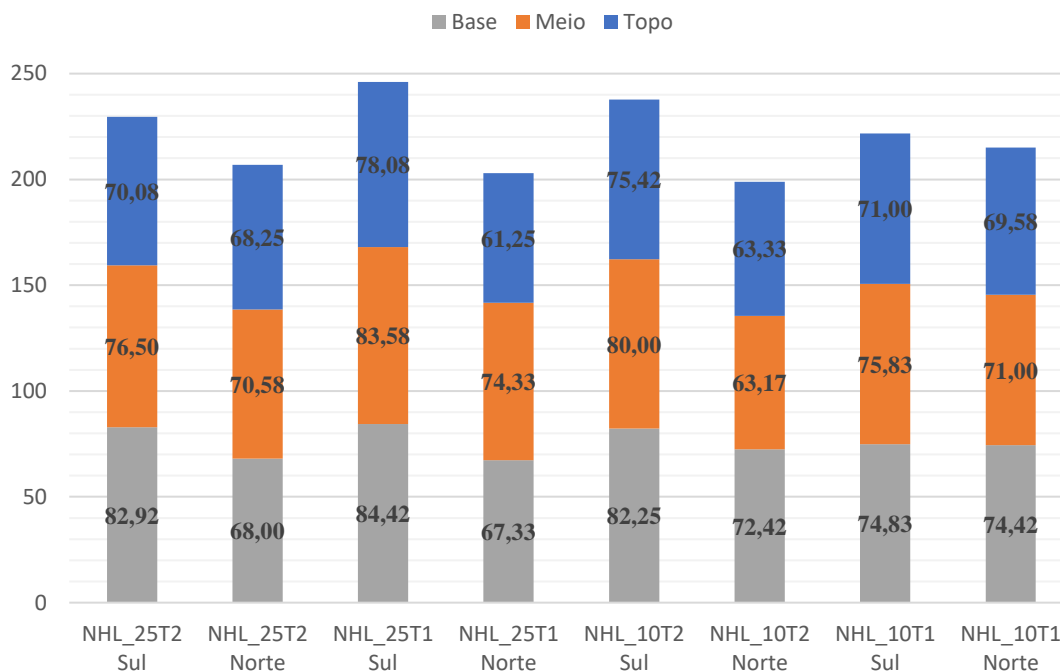


Figura 5.8 - Valores da dureza superficial por durómetro na base, no meio e no topo dos rebocos de argamassas com 25% e 10% de resíduos cerâmicos T1 e T2, aplicados no murete 1 a norte e sul

No murete 3 as argamassas CL, CL_10Mk e CL_20Mk fabricadas por Vargas (2013) encontram-se expostas a norte e sul. Vargas (2013) realizou este ensaio nas argamassas aplicadas em provetes de tijolo com diferentes curas aos 28, 90 e 180 dias. Para efeitos de comparação com os resultados obtidos nos muretes, utilizaram-se os resultados obtidos por Vargas em argamassas após 180 dias de cura e em cura standart.

É possível notar na Figura 5.9 que os valores das argamassas aplicadas em ambiente seco e húmido apresentam valores de ordem de grandeza aproximados. Os valores obtidos em ambiente seco são em média 4% maiores que os obtidos em ambiente húmido, sendo o fator humano um dos motivos possíveis para essa diferença.

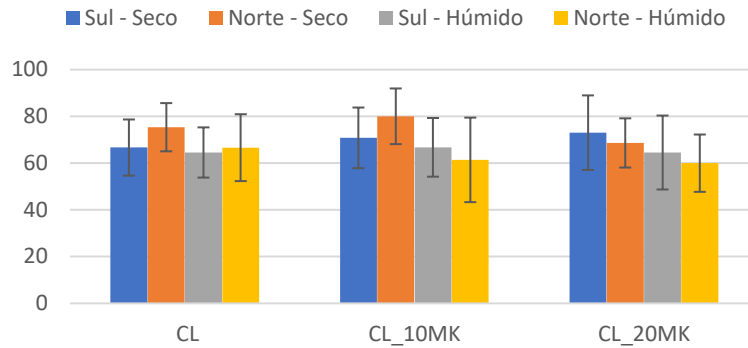


Figura 5.9 - Dureza superficial por durómetro dos rebocos de argamassas de cal aérea com 0%, 10% e 20% de Mk aplicadas no Murete 3 a norte e sul, avaliada em clima seco e húmido

O coeficiente de dureza superficial foi medido em três níveis diferentes no murete (base, meio e topo). Desta forma é possível constatar na Figura 5.10, que os três níveis possuem valores aproximados, não havendo grande variação dos valores entre si. Porém, ao realizar a média dos valores obtidos, foi constatado que a região da base dos rebocos voltados a norte apresentou valor aproximadamente 25% maior que o menor valor médio obtido na região do topo das argamassas voltadas a sul. Este resultado pode ser explicado pela alta permeabilidade da CL (Veiga, 2017) e, mesmo que a presença do metacaulin reduza esta permeabilidade, ainda há a presença de água tanto por ascensão capilar ou por incidência de chuva.

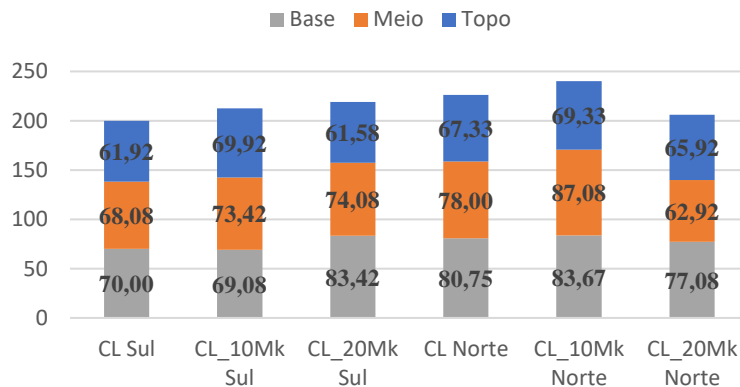


Figura 5.10 - Valores da dureza superficial por durómetro na base, no meio e no topo de rebocos de argamassas de cal aérea com 0%, 5% e 10% de Mk, expostas a norte e sul, aplicadas no murete 3

O murete de taipa (4) possui os rebocos de argamassas CL2_25t, CL3_10t e CL3, feitas por Jamú (2013) e Dias (2013), respectivamente, e expostas apenas na direção este.

É possível notar na Figura 5.11, que os valores das argamassas aplicadas apresentam valores aproximados tanto em ambiente seco quanto húmido. Ao realizar a média dos valores encontrados foi

constatado que os resultados em clima húmido apresentam valor de 1% maior que aos resultados secos, diferença esta, insignificante. Ainda é preciso relembrar o resultado da inspeção visual, onde é possível observar o elevado grau de degradação das argamassas, principalmente a CL3, o que pode influenciar nos valores encontrados.

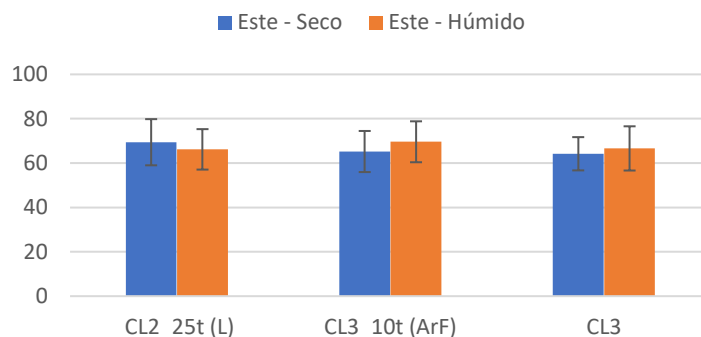


Figura 5.11 - Dureza superficial por durómetro dos rebocos de argamassas de cal aérea e terra com traço 1:2 e 1:3, com 10% de cal aérea, expostos a este, no Murete de taipa avaliada em clima seco e húmido

O coeficiente de dureza superficial foi medido em três níveis diferentes no murete (base, meio e topo), com exceção da argamassa CL3, que na região da base teve uma lacuna do reboco, impossibilitando a sua medição nesta área, como demonstrado na Figura 5.12. Nas demais comparações, é possível notar que os valores são aproximados, sendo a argamassa CL2 a que possui o valor mais elevado na região do meio do murete, o que pode ser explicado por ser a área de maior proteção da incidência de chuva e ascensão capilar, uma vez que o murete de taipa foi construído em contato com o solo, diminuindo a sua degradação em comparação com as demais áreas.

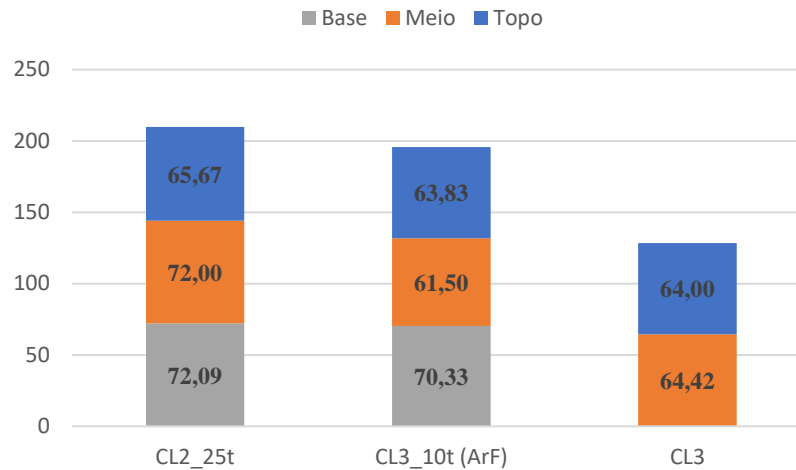


Figura 5.12 - Valores da dureza superficial por durômetro na base, no meio e no topo de rebocos de argamassas de traço 1:2 e 1:3, com 0%, 10% e 25% de cal aérea expostos a estes, aplicadas no murete 4

As Tabelas 5.3 e 5.4 apresentam, respectivamente, os resultados obtidos no ensaio para argamassas de NHL e CL, e compara estes resultados com os obtidos por outros autores, sendo os resultados obtidos neste trabalho tratados como de referência. A comparação respeita o traço das argamassas, tentando, sempre que possível, comparar argamassas que possuam pozolanas ou resíduos similares, a fim de garantir uma comparação fiável.

Ao analisar o resultado das argamassas comparadas com Fontes (2013), é possível notar que a argamassa NHL_10T1 obteve resultado superior à argamassa NHL_10T estudada por Fontes (2013), porém, como já foi referido, o traço utilizado por Madeira (2013) foi de 1:4, e o de Fontes (2013) de 1:3, de forma que a argamassa de Madeira possui, em volume, maior quantidade substituída por resíduo cerâmico, o que pode ter contribuído nesta diferença apresentada. Já ao comparar as argamassas elaboradas por Valério (2013), nota-se um valor inferior à argamassa de referência, NHL, o que pode ser explicado pelas cais e areias utilizadas serem de lotes diferentes, além da diferente exposição em que se encontram os respetivos muretes.

Quanto à comparação das argamassas estudadas por Lino (2013) aos 180 dias com as argamassas de referência fabricadas por Valério (2013), as elaboradas por Lino obtiveram valores superiores em ambas as argamassas estudadas. Ao analisar as argamassas NHL3,5_1:3_N, NHL3,5_1:3_S, NHL3,5_1:3_5MK_N e NHL3,5_1:3_5MK_S de Lino (2013), é possível observar que as orientadas a norte apresentam valores aproximados entre si e inferiores às orientadas a sul. Uma vez que a orientação voltada a norte não sofre com incidência solar direta, e, desta forma, os ciclos de secagem

e molhagem são mais longos que à orientação sul, a reação do hidróxido de cálcio com o dióxido de carbono presente na atmosfera, que garante o endurecimento da NHL (Coelho et al., 2009), não aconteceu de forma completa. A diferença de valores entre Lino (2013) e as argamassa de referência NHL com adição de metacaulin, pode ser explicada pela diferente exposição dos muretes, além dos diferentes lotes de cal, a areia e metacaulin utilizados nos trabalhos, uma vez que as argamassas possuem o mesmo traço.

Já nas argamassas com substituição de 5% de metacaulin, as argamassas orientadas a sul apresentam valores inferiores às orientadas a norte, uma vez que o metacaulin reduz a permeabilidade das argamassas de cal (Moisés & Cabrera, 2002), permitindo, assim, a cura com características também aérea da NHL e aumentando, assim, a sua dureza superficial.

Tabela 5.3 – Comparação dos resultados do ensaio de durómetro, em Graus *Shore A*, em argamassas com substituição por NHL com resultados de outros autores

| Argamassa | Orientação | Resultado | | Fontes, 2013 | | Lino, 2013 | |
|-----------|------------|-----------|-------|--------------|------|------------|------|
| | | Média | D.P. | Média | D.P. | Média | D.P. |
| NHL_25T2 | Sul | 76,5 | 11,01 | - | - | - | - |
| | Norte | 68,94 | 12,24 | - | - | - | - |
| NHL_25T1 | Sul | 82,03 | 9,02 | - | - | - | - |
| | Norte | 67,64 | 13,30 | - | - | - | - |
| NHL_10T2 | Sul | 79,22 | 10,43 | 73,1 | 7,3 | - | - |
| | Norte | 66,31 | 15,29 | | | - | - |
| NHL_10T1 | Sul | 73,89 | 12,13 | - | - | - | - |
| | Norte | 71,67 | 15,50 | - | - | - | - |
| NHL | Sul | 69,19 | 9,71 | 74,7 | 8,5 | 80,0 | 2,1 |
| | Norte | 78,44 | 12,00 | | | 79,9 | 2,6 |
| NHL_2,5Mk | Sul | 73,42 | 11,10 | - | - | - | - |
| | Norte | 80,39 | 9,11 | - | - | - | - |
| NHL_5Mk | Sul | 70,58 | 9,83 | - | - | 80,3 | 1,7 |
| | Norte | 79,33 | 9,21 | - | - | 80,4 | 2,1 |

Como a cal aérea possui grande tempo para que haja a carbonatação completa e possui pouca hidraulicidade (IPQ, 2015), a exposição à água presente na orientação sul ocasionou valores inferiores de dureza superficial em comparação com a orientação norte. Esta explicação justifica os valores inferiores das argamassas orientadas a sul às apresentadas por Vargas (2013), pois este autor apenas

realizou este ensaio em argamassas aplicadas em suporte de tijolo que, por sua vez, não sofreram com a exposição natural à água dos muretes. Nas argamassas com substituição de metacaulin é possível perceber que a redução de dureza superficial com o aumento da substituição também ocorre com a argamassa estudada por Vargas (2013), chegando a valores aproximados na argamassa CL_20Mk norte.

Ao comparar os resultados das argamassas de referência com os de Pascoal (2014), nota-se que todas as argamassas estudadas apresentaram resultados inferiores.

Lino (2013) apesar de também ter realizado argamassas de mesmo traço 1:2, apresenta resultados superiores em todas as argamassas de referência para este ensaio. Ao comparar as argamassas com substituição de 20% de Mk com as de 30% de Mk de Lino (2013), nota-se que a adição de Mk ocasionou um aumento de dureza superficial, uma vez que o metacaulin ocasiona reação pozolânica e aumenta a resistência mecânica das argamassas (Moisés & Cabrera, 2002).

As argamassas de terra argilosa e cal aérea, por sua vez, apresentaram resultados superiores às de Faria et al. (2014) nas argamassas CL2_25t (L) e CL3_10t, e na argamassa CL3 pode-se considerar que ocorreu o mesmo resultado. Este resultado superior pode ser justificado pela adição de cal aérea, que, por sua vez, possui uma lenta carbonatação, de acordo com a NP EN 459-1 (IPQ, 2015), e como os resultados apresentados de Faria et al. (2014) foram obtidos aos 90 dias, é possível que a carbonatação ainda não tivesse ocorrido de forma completa, ocasionando uma redução nos valores de dureza superficial.

Tabela 5.4 – Comparação dos resultados do ensaio de durómetro, em Graus *Shore A*, em argamassas com substituição por CL com resultados de outros autores

| Argamassa | Orientação | Resultado | | Vargas, 2013 | | Faria et al., 2014 | | Pascoal et al., 2014 | Lino, 2013 | |
|---------------|------------|-----------|-------|--------------|------|--------------------|------|----------------------|------------|------|
| | | Média | D.P. | Média | D.P. | Média | D.P. | Média | Média | D.P. |
| CL | Sul | 66,67 | 12,00 | 62 | 7 | - | - | 74,2 | 78,3 | 2,6 |
| | Norte | 75,36 | 10,31 | | | - | - | | | |
| CL_10Mk | Sul | 70,81 | 12,97 | 75 | 10 | - | - | - | - | - |
| | Norte | 80,03 | 11,91 | | | - | - | | | |
| CL_20Mk | Sul | 73,03 | 15,94 | 68 | 12 | - | - | 82,0 | 79,3 | 2,8 |
| | Norte | 68,64 | 10,52 | | | - | - | | 78,5 | 3,1 |
| CL2_25t (L) | Este | 69,41 | 10,41 | - | - | 63 | 8,0 | - | | |
| CL3_10t (ArF) | Este | 65,22 | 9,28 | - | - | 63,8 | 7,0 | - | - | |
| CL3 | Este | 64,21 | 7,49 | | | 64,8 | 9,9 | - | - | |

5.3 Esclerómetro pendular

O ensaio de dureza superficial por esclerómetro pendular foi realizado em cada painel do murete em clima seco e em clima húmido sendo o resultado apresentado através da média aritmética de 4 pontos na horizontal e 8 pontos na vertical, totalizando em cada painel de argamassa 32 pontos de medição, tal como referido anteriormente.

É possível notar que os resultados obtidos possuem grande desvio padrão. Porém, ainda assim é possível encontrar uma tendência nos resultados.

O murete 2 possui as argamassas NHL, NHL_2,5Mk e NHL_5Mk expostas a norte e sul fabricadas por Valério (2013).

É possível notar na Figura 5.13 que as argamassas aplicadas na face norte do murete apresentam valores mais elevados do que as argamassas voltadas a sul. E ainda que as argamassas apresentam resultados semelhantes, quer no clima seco ou no húmido, sendo a argamassa NHL_2,5Mk Norte a que apresenta maior valor em média. O valor encontrado é 20% maior que a argamassa NHL_2,5Mk Sul e 7,3% maior que a argamassa NHL_5Mk Norte, não seguindo a tendência do aumento do metacaulin com o aumento da resistência superficial média esperado.

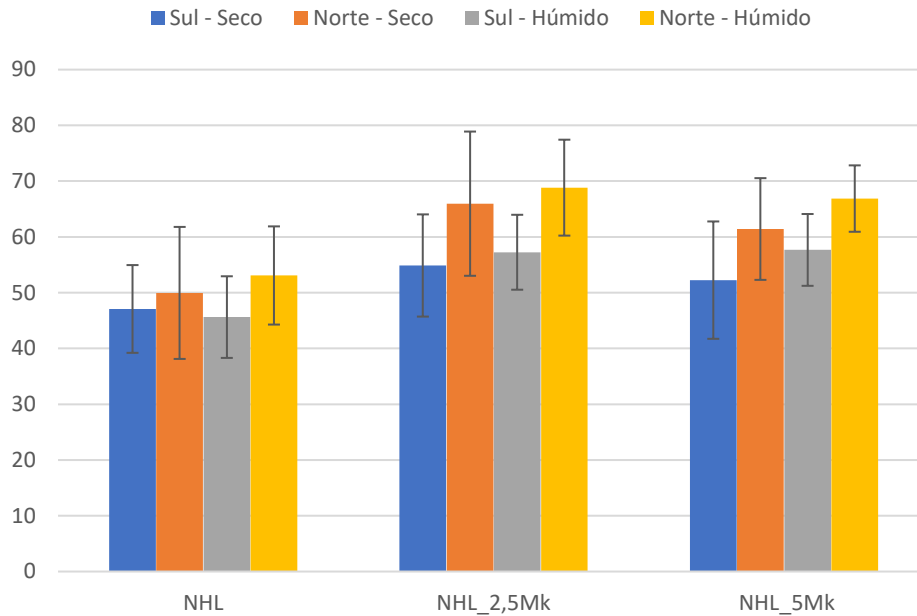


Figura 5.13 Dureza superficial por esclerómetro pendular dos rebocos de argamassas de cal hidráulica com 0%, 2,5% e 5% de Mk aplicadas no Murete 2 a norte e sul, avaliada em clima seco e húmido

Na Figura 5.14 é apresentada a dureza superficial nos três níveis do murete (base, meio e topo), não havendo grandes variações dos valores, podendo ser explicado pela boa aplicação da argamassa e pelo fato do murete ser apoiado em uma base de betão, o que reduz a absorção de água por capilaridade proveniente do solo. A região do topo das argamassas voltadas a norte apresentou o maior valor em média e, em comparação com as argamassas localizadas na região da base e voltadas a sul, que apresentam o menor valor em média. Houve uma diferença de aproximadamente 30%, o que pode ser o resultado da proteção das telhas cerâmicas na região do topo e a menor incidência solar na orientação norte, o que dificulta a perda de água adquirida pela incidência de chuva e, em contato com o metacaulín, aumenta a reação pozolânica, consequentemente, combate a carbonatação da cal nestas argamassas.

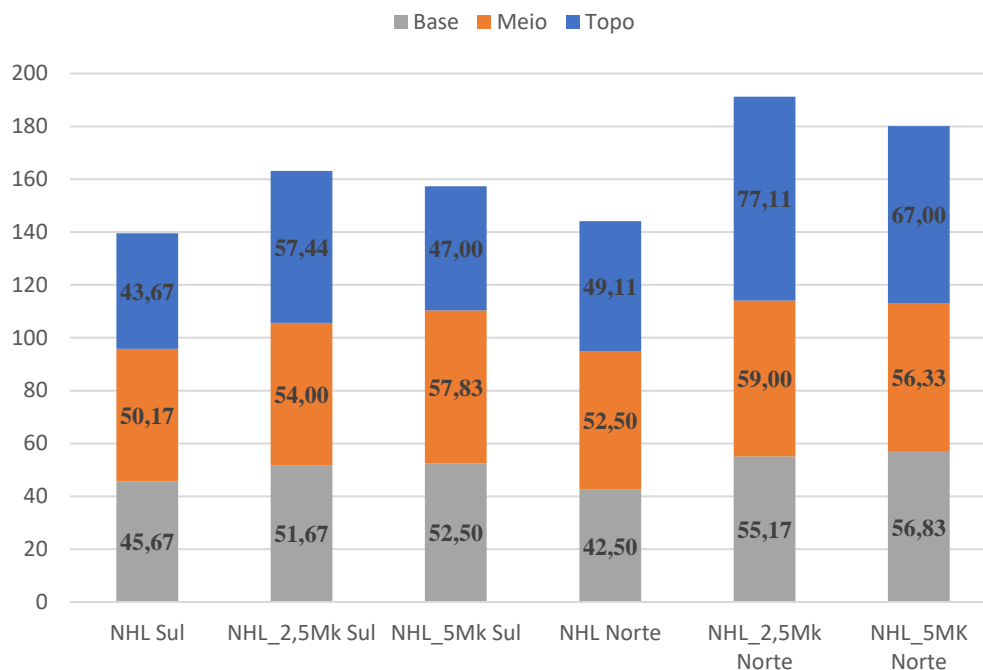


Figura 5.14 - Dureza superficial por esclerómetro dos rebocos de argamassas de cal hidráulica com 0%, 2,5% e 5% de Mk aplicadas, a norte e sul, na base, no meio e no topo de argamassas aplicadas no murete 2

No murete 1 estão expostas a norte e sul as argamassas NHL_10T1, NHL_10T2, NHL_25T2, NHL_25T1 fabricadas por Madeira (2013).

É possível notar na Figura 5.15 que, mesmo as argamassas apresentando valores aproximados, as argamassas aplicadas na face norte do murete apresentam valores mais elevados do que as argamassas voltadas a sul. Ao realizar a média dos valores obtidos, as argamassas voltadas a norte ensaiadas em clima húmido foram as que apresentaram o maior valor em média e, em comparação com as argamassas que obtiveram o menor valor em média, orientadas a sul em ambiente seco, apresentaram valor 10% maior.

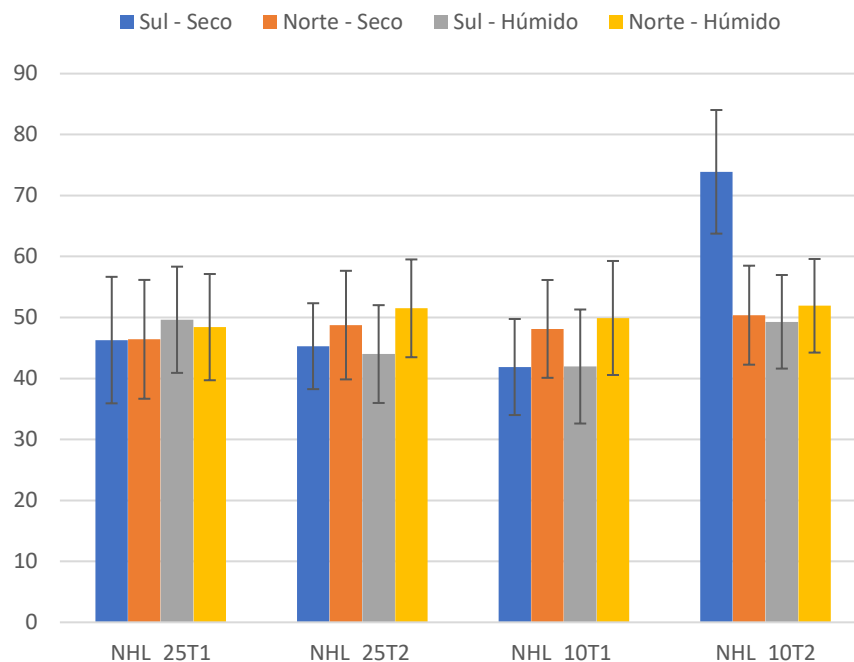


Figura 5.15 - Dureza superficial por esclerómetro dos rebocos de argamassa com 25% e 10% de resíduos de cerâmica T1 e T2, aplicados no Murete 1 em clima seco e húmido, expostos a norte e a sul

A Figura 5.16 apresenta a dureza superficial nos três níveis do murete (base, meio e topo), sendo a região da base a que apresenta o menor valor encontrado em média. É 18,5% menor que a região do topo e da base, que apresentam valores bastante aproximados em média, variando 0,5% entre si, o que pode ser desprezado e ser considerado que a região do topo e do meio apresentaram o mesmo valor.

Esta pequena variação pode ser explicada por erros humanos na hora da realização dos ensaios, visto que foram efetuadas 32 medições em cada murete, o que diminui o seu desvio padrão. É ainda importante frisar a boa aplicação da argamassa no suporte e ausência de sons ocos durante a realização do ensaio.

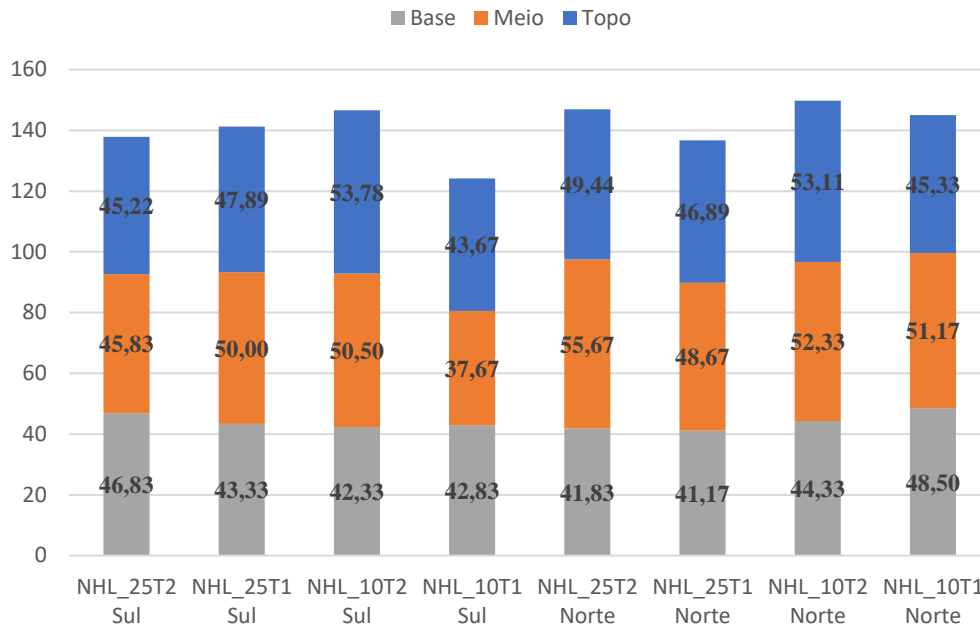


Figura 5.16 - Dureza superficial por esclerômetro dos rebocos de argamassa com 25% e 10% de resíduos de cerâmica T1 e T2, aplicados no Murete 1 em clima seco e úmido, expostos a norte e a sul, na base, no meio e no topo de argamassas aplicadas no murete 1

No murete 3 as argamassas CL, CL_10Mk e CL_20Mk fabricadas por Vargas (2013) encontram-se expostas a norte e sul.

Na Figura 5.17 são apresentados os valores médios das resistências superficiais das argamassas, onde é possível observar que as argamassas aplicadas na face norte do murete apresentam valores mais elevados do que as argamassas voltadas a sul. Em média o valor das argamassas voltadas a norte em ambiente úmido foi 55% maior que as argamassas voltadas a sul em ambiente seco. E ainda que as mesmas argamassas apresentaram resultados semelhantes, quer no clima seco ou no úmido, seguindo a tendência do aumento da resistência superficial ao aumentar a quantidade de metacaulin.

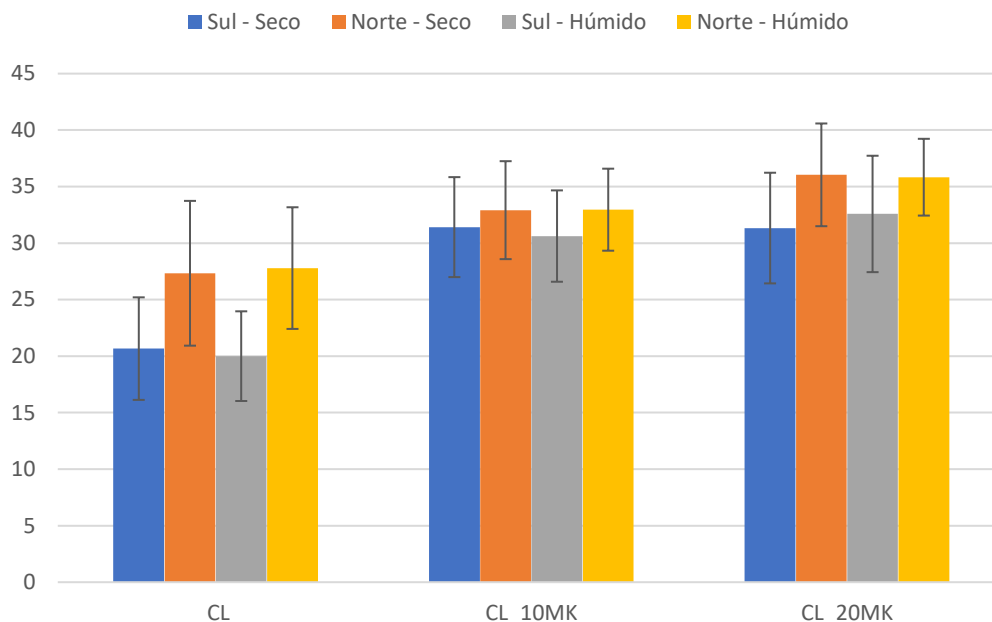


Figura 5.17 - Dureza superficial por esclerómetro dos rebocos de argamassas de CL com 0%, 10% e 20% de Mk aplicadas no Murete 3 a norte e sul, avaliada em clima seco e húmido

A dureza superficial, nos três níveis do murete (base, meio e topo), apresentada na Figura 5.18, apresentou valores aproximados em média nas três regiões dos muretes. No entanto não foi constatada a tendência de aumento do valor da dureza superficial conforme o aumento de metacaulin, sendo a argamassa CL_10Mk Sul a que apresentou valores superiores no meio e topo em comparação com a argamassa CL_20Mk Sul.

A região do meio das argamassas orientadas a norte apresentou o maior valor em média, sendo este valor 21% maior que o menor valor encontrado no topo das argamassas orientadas a sul. As argamassas orientadas a sul apresentaram diferença de 0,5% entre as regiões dos painéis, valor este que pode ser desprezado, visto que ainda há o erro humano na realização dos ensaios. Podendo, então, ser possível considerar que os painéis orientados a sul não apresentaram variação significativa em média nos resultados.

Ao realizar o ensaio na argamassa CL Sul notou-se um som oco, principalmente na região próxima da base, o que significa uma separação da argamassa com o suporte, reduzindo, assim, o valor da sua resistência superficial.

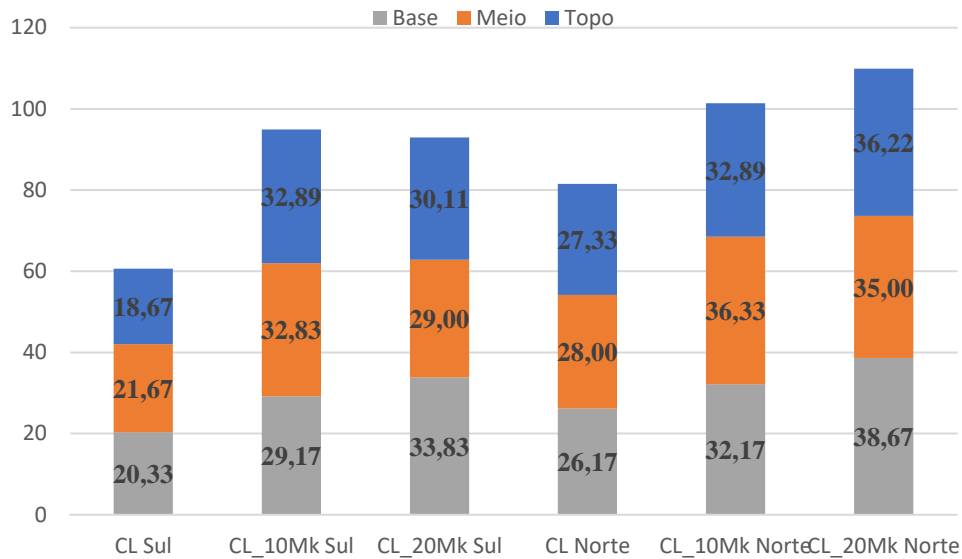


Figura 5.18 - Dureza superficial por durómetro dos rebocos de argamassas de cal aérea com 0%, 10% e 20% de Mk aplicadas no Murete 3 a norte e sul, na base, no meio e no topo de argamassas aplicadas no murete 3

O murete 4 possui as argamassas CL2_25t (L), CL3_10t(ArF) e CL3, feitas por Jamú (2013) e expostas apenas na direção leste.

As argamassas expostas neste murete estavam em avançado estado de degradação, como referido em 3.3.1, de forma que o som oco e destacamento do material aconteceram nos 3 rebocos de argamassa expostos, que caracterizam uma separação das argamassas com o suporte.

Na Figura 5.19 é apresentado o resultado em clima seco e húmido das argamassas expostas neste murete. Não houve diferenças significativas em relação a humidade do ar na realização do ensaio, o que pode ser explicado pois o suporte de taipa encontra-se em contacto direto com o solo, facilitando a ascensão capilar da água e dificultando a sua secagem.

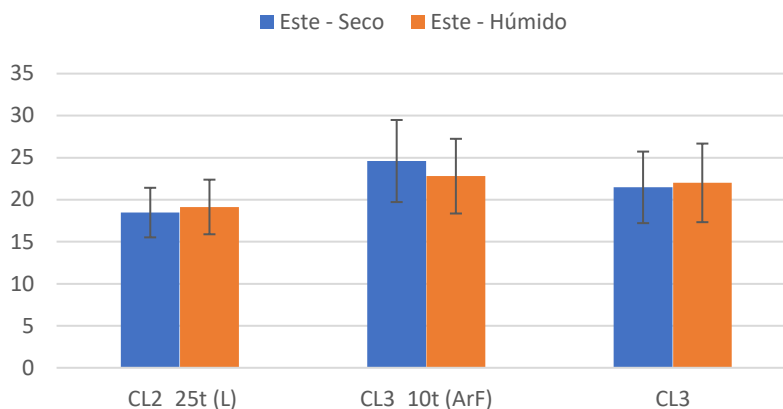


Figura 5.19 - Dureza superficial por esclerómetro dos rebocos de argamassas de terra de traço 1:2 e 1:3 com 0%, 25% e 10% de cal aérea aplicadas no Murete 3 a este, avaliada em clima seco e húmido

Ao realizar o ensaio, em vários pontos, após o impacto, houve um destacamento do material, impossibilitando, desta forma, a sua execução na base do murete, sendo apresentado na Figura 5.20 apenas o resultado na zona do meio e topo, zonas estas que se encontram mais protegidas da acção da chuva e encontram-se em melhor estado de conservação.

A argamassa CL3_10t apresentou valores mais elevados, porém este resultado pode dar-se apenas por a argamassa estar entre dois outros painéis e, desta forma, mais protegido da acção da chuva.

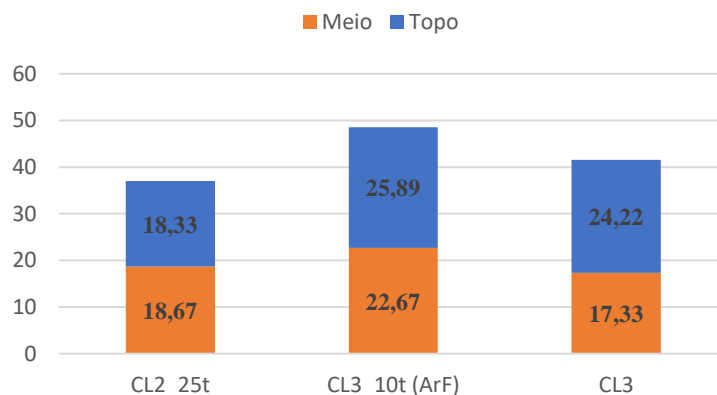


Figura 5.20 - Dureza superficial por esclerómetro dos rebocos de argamassas de terra de traço 1:2 e 1:3 com 0%, 25% e 10% de cal aérea aplicadas no Murete 3, no meio e no topo de argamassas aplicadas no murete 4

A Tabela 5.5 apresenta a comparação dos resultados obtidos deste ensaio nas argamassas de referência de NHL com os resultados de outros autores. Apesar de não terem sido expostas às mesmas intempéries, ou em alguns casos, ao mesmo traço, ainda assim esta comparação mostra-se necessária

a fim de delimitar alguma tendência dos resultados. Lino (2013) realizou este ensaio em argamassas de traço 1:3 com substituição de 0% e 5% de metacaulin aos 180 dias. Ao comparar com as argamassas de referência elaboradas por Valério (2013), as elaboradas por Lino (2013) apresentaram valores inferiores em ambas as argamassas estudadas. Ao comparar os resultados das argamassas de referência neste ensaio com os elaborados por Fontes (2013), nota-se que estes foram superiores em ambas as orientações. Isto pode ser explicado pois o traço da argamassa de referência foi de 1:4 e o de Fontes de 1:3, o que garante uma maior percentagem de resíduo cerâmico substituído, o que pode garantir uma maior resistência mecânica à argamassa. No entanto, as argamassas de Fontes (2013) têm um traço mais forte em ligante comparativamente às do presente estudo.

Tabela 5.5 - Comparação dos resultados do ensaio de esclerómetro pendular, em Graus Vickers, em argamassas com substituição por CL com resultados de outros autores

| Argamassa | Orientação | Resultado | | Lino, 2013 | | Fontes, 2013 | |
|-----------|------------|-----------|------|------------|------|--------------|------|
| | | Média | D.P. | Média | D.P. | Média | D.P. |
| NHL_25T2 | Sul | 45,3 | 7,0 | - | - | - | - |
| | Norte | 48,8 | 8,9 | - | - | - | - |
| NHL_25T1 | Sul | 46,3 | 10,4 | - | - | - | - |
| | Norte | 46,4 | 9,7 | - | - | - | - |
| NHL_10T2 | Sul | 49,5 | 10,1 | - | - | 46,7 | 2,9 |
| | Norte | 50,4 | 8,1 | - | - | | |
| NHL_10T1 | Sul | 41,9 | 7,9s | - | - | - | - |
| | Norte | 48,1 | 8,0 | - | - | - | - |
| NHL | Sul | 43,7 | 7,9 | 40,9 | 2,6 | 54,9 | 12,8 |
| | Norte | 50,0 | 11,8 | 38,9 | 1,2 | | |
| NHL_2,5Mk | Sul | 54,9 | 9,2 | - | - | - | - |
| | Norte | 66,0 | 12,9 | - | - | - | - |
| NHL_5Mk | Sul | 52,3 | 10,5 | 34,3 | 2,3 | - | - |
| | Norte | 61,4 | 9,1 | 37,8 | 1,5 | - | - |

Ao realizar a mesma comparação, mas desta vez com as argamassas de CL, apresentado na Tabela 5.6, nota-se que há variações nos resultados.

Os resultados da comparação das argamassas de referência com as de Lino (2013), que também realizou argamassas com traço 1:2, mostrou-se superior em todas as argamassas estudadas, com exceção à argamassa CL com orientação sul, uma vez que a argamassa CL_20Mk norte apresentou

resultado similar, apesar de ter sido feita a comparação das argamassas de referência com substituição de 20% às 30% de Mk elaboradas por Lino (2013).

Os resultados obtidos das argamassas de terra argilosa com adição de CL, por sua vez, apresentam grande disparidade entre si. Isto pode ser explicado pelo alto grau de degradação que se encontravam nestas argamassas, não garantindo a fidedignidade dos resultados obtidos nas argamassas de referência, uma vez que Faria et al. (2014) realizou estes ensaios quando as argamassas ainda estavam em bom estado.

A comparação com a argamassa E_WS+CL de Santos et al. (2017) com a argamassa de referência, apesar de ter apenas adicionado de 5 a 8% de cal aérea ao traço de 1:2, apresenta resultados superiores. Como a argamassa de referência possuía alto grau de degradação, é difícil definir a causa para esta diferença dos resultados.

Tabela 5.6 – Comparação dos resultados do ensaio de esclerómetro pendular, em Graus Vickers, em argamassas com substituição por NHL com resultados de outros autores

| Argamassa | Orientação | Resultado | | Lino, 2013 | | Faria et al., 2014 | Santos et al., 2017 |
|---------------|------------|-----------|------|------------|------|--------------------|---------------------|
| | | Média | D.P. | Média | D.P. | Média | Média |
| CL | Sul | 20,7 | 4,5 | 22,1 | 2,3 | - | - |
| | Norte | 27,3 | 6,4 | | | - | - |
| CL_10Mk | Sul | 31,4 | 4,4 | - | - | - | - |
| | Norte | 32,9 | 4,3 | - | - | - | - |
| CL_20Mk | Sul | 31,3 | 4,9 | 31,5 | 1,5 | - | - |
| | Norte | 36,0 | 4,5 | 33,7 | 2,5 | - | - |
| CL2_25t (L) | Este | 18,5 | 2,9 | - | - | 17,9 | |
| CL3_10t (ArF) | Este | 24,6 | 4,9 | - | - | 5,1 | 38 |
| CL3 | Este | 21,5 | 4,3 | - | - | 8,2 | - |

5.4 Impacto de esfera

O ensaio de dureza superficial por impacto de esfera foi realizado em cada painel do murete em clima seco e em clima húmido, sendo o resultado apresentado a média aritmética de 3 pontos na horizontal e 3 pontos na vertical, totalizando em cada painel de argamassa 9 pontos de medição, como referido no item 3.3.4 deste trabalho.

No murete 1 estão expostas a norte e sul as argamassas NHL_10T1, NHL_10T2, NHL_25T2, NHL_25T1 fabricadas por Madeira (2013).

Ao realizar o ensaio neste murete notou-se que os valores se mostravam aproximados quer no clima seco, quer no húmido. Porém, no clima húmido, o diâmetro das mossas mostrou-se 16,5% em média maior que no ambiente seco, como apresentado na Figura 5.21. Apesar do alto valor de desvio padrão, as argamassas voltadas tanto a norte quanto a sul apresentaram tamanhos de mossa em média equivalentes. As voltadas a sul possuem mossas 1,5% maiores que as voltadas a norte, sendo este valor desprezível e pode ser justificado pelo fator humano na hora de realizar o ensaio.

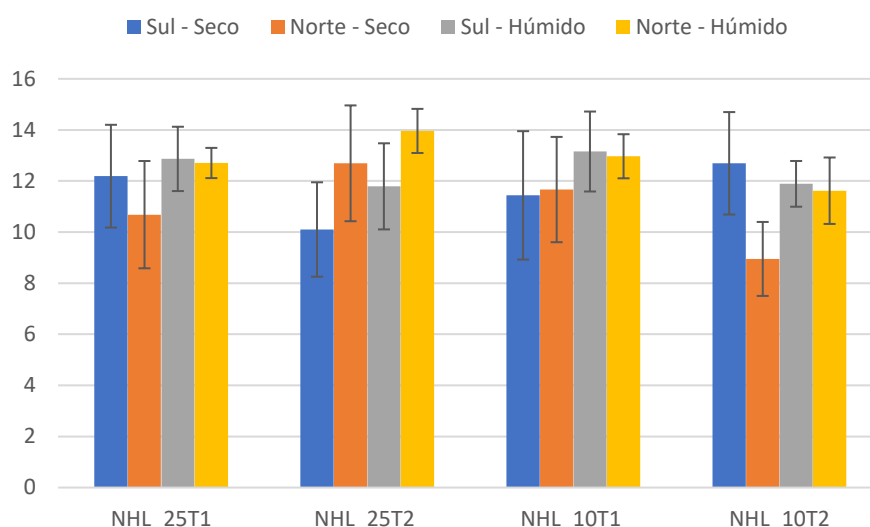


Figura 5.21 - Diâmetro da mossa provocada pelo ensaio de impacto de esfera nos painéis das argamassas no Murete 1, com 10% e 25% de substituição da NHL por resíduos cerâmicos, expostas a norte e a sul, avaliada em clima seco e húmido

Ao comparar o diâmetro da mossa provocada pelo ensaio nas regiões topo, meio e base dos painéis, notou-se, como apresentado na Figura 5.22, que a região do meio dos painéis voltados a sul apresentou, em média, valores menores comparadas com as demais regiões das argamassas voltadas tanto a norte quanto a sul. Tal pode ser justificado pela proteção a chuva que esta região possui comparada as outras e a alta incidência solar presente nesta orientação. Nota-se, ainda, a grande consistência dos resultados, onde os resultados encontrados apresentam valores muito aproximados, diferenciando, em média no máximo 4,5% entre si, o que pode ser considerado desprezível.

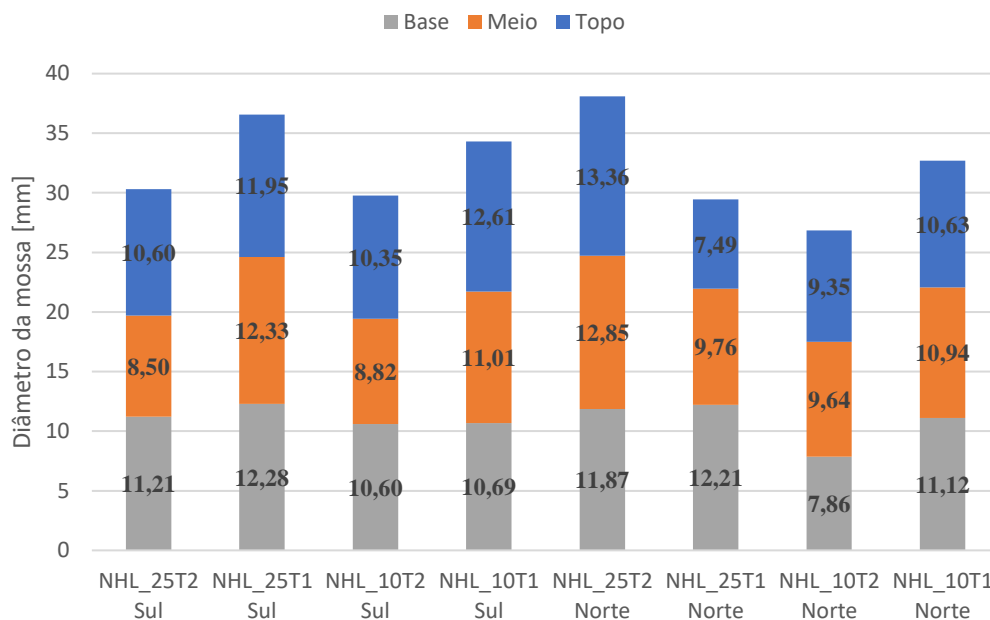


Figura 5.22 – Diâmetro da mocha provocada pelo ensaio de impacto de esfera no topo, meio e base dos painéis de argamassas aplicadas no Murete 2, com 10% e 25% de substituição da NHL por resíduos cerâmicos, expostas a norte e a sul, avaliada em clima seco e húmido

O murete 2 possui as argamassas NHL, NHL_2,5Mk e NHL_5Mk expostas a norte e sul fabricadas por Valério (2013).

O ensaio foi realizado em clima seco e húmido nos painéis das argamassas expostas. A média dos valores das mochas causadas encontra-se na Figura 5.23, onde constatou-se que, em clima húmido, a argamassa mostrou-se mais deformável em 8,85% comparada as argamassas em ambiente seco, e que a substituição do ligante por metacaulin ocasionou uma redução no diâmetro das mochas; porém esta redução não ocorreu de forma contínua.

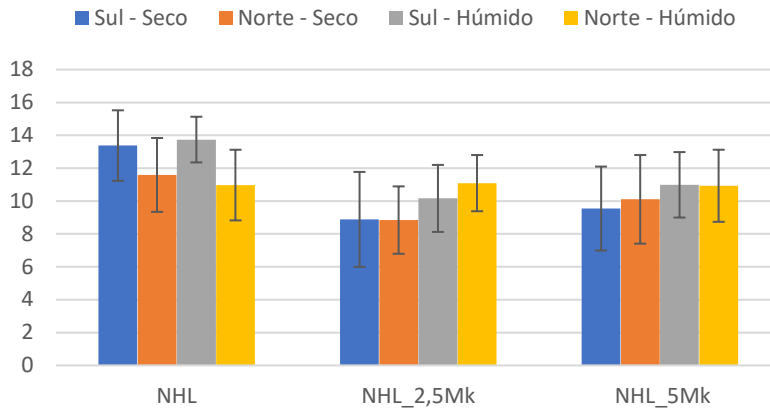


Figura 5.23 - Diâmetro da massa provocada pelo ensaio de impacto de esfera nos painéis de argamassas aplicadas no Murete 2, com 0%, 2,5% e 5% de substituição da NHL por Mk, expostas a norte e a sul, avaliada em clima seco e húmido

O resultado da média de acordo com a zona do painel de reboco (topo, meio e base), na Figura 5.24, apresentou valores menores na região do topo dos muretes, sendo a região da base que apresentou maiores valores de diâmetro de massa, apresentando diferença de 21,6% que a região do topo, o que pode ser resultado da maior incidência de ascensão capilar na região da base.

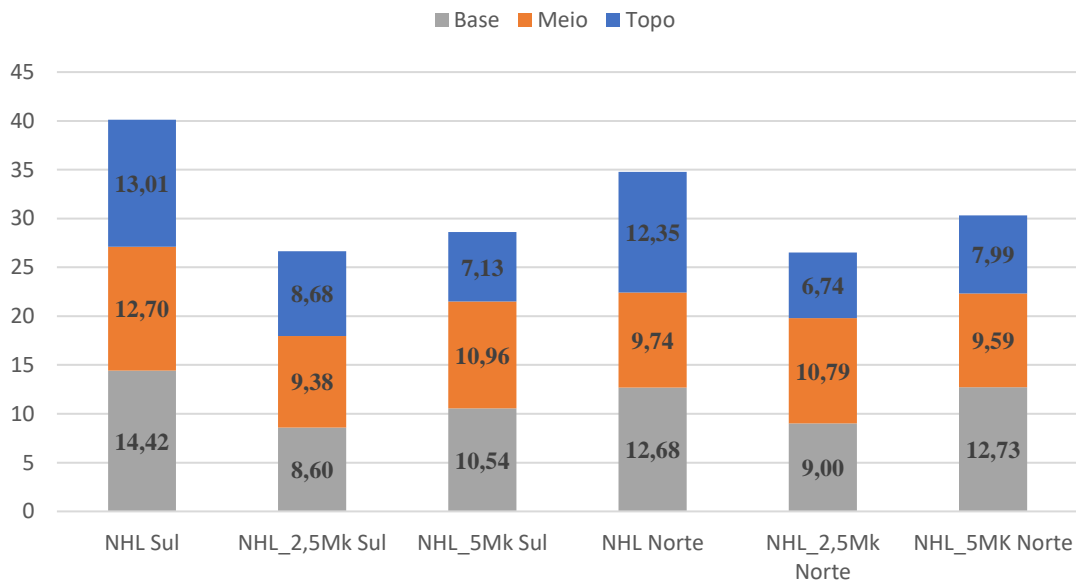


Figura 5.24 - Diâmetro da massa provocada pelo ensaio de impacto de esfera nos painéis de argamassas aplicadas no Murete 2, com 0%, 2,5% e 5% de substituição da NHL por Mk, expostas a norte e a sul, no topo, meio e base dos painéis.

No murete 3 as argamassas CL, CL_10Mk e CL_20Mk fabricadas por Vargas (2013) encontram-se expostas a norte e sul.

O ensaio foi realizado em clima seco e húmido nos painéis das argamassas expostas. A média das mossa causadas encontra-se na Figura 5.25, onde é possível notar que, em clima húmido, a argamassa mostrou-se mais deformável do que em clima seco. Apresenta resultados, em média, 8,8% maiores que em ambiente seco, sendo esta diferença muito aproximada e, portanto, desprezível, podendo ser causada pelo fator humano no momento de realização do ensaio.

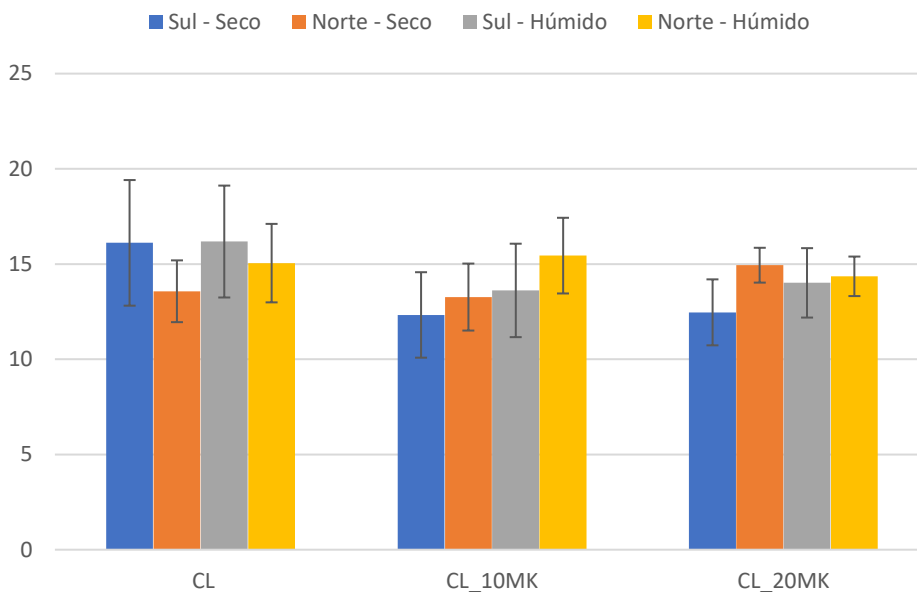


Figura 5.25 - Diâmetro da mossa provocada pelo ensaio de impacto de esfera nos painéis de argamassas aplicadas no Murete 3, com 0%, 10% e 20% de substituição da CL por Mk, expostas a norte e a sul, avaliada em clima seco e húmido

O resultado da média de acordo com a zona do painel de reboco (topo, meio e base), na Figura 5.26 demonstra que a argamassas apresentaram valores muito consistentes, sendo constatada a maior diferença entre a zona do topo das argamassas a sul e a região do topo das argamassas orientadas a norte, de 8,2% em média. Nota-se ainda que, em média, a zona do meio com orientação a sul e a região do topo orientação norte apresentaram o mesmo valor, demonstrando a pequena diferença que as zonas de aplicação destas argamassas apresentaram na obtenção dos resultados encontrados.

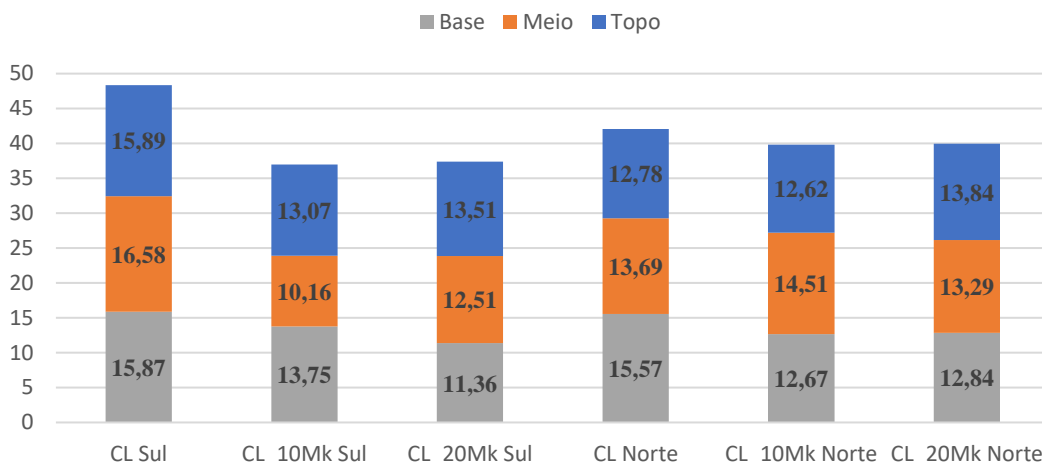


Figura 5.26 - Diâmetro da massa provocada pelo ensaio de impacto de esfera nos painéis de argamassas aplicadas no Murete 3, com 0%, 10% e 20% de substituição da CL por Mk, expostas a norte e a sul, no topo, meio e base dos painéis de argamassa

O murete 4 possui as argamassas CL2_25t (L), CL3_10t(ArF) e CL3, feitas por Jamú (2013), Santos (2013) e Dias (2013), respectivamente, e expostas apenas na direção este.

O ensaio não foi realizado neste murete, visto que, ao realizar o ensaio com o esclerómetro pendular já houve uma perda de aderência significativa do material após o impacto, e o risco de realizar o ensaio de impacto com a esfera e desagregar totalmente o reboco era muito alto.

Ao tentar comparar os resultados das argamassas de NHL com os de outros autores foi encontrada uma dificuldade em encontrar estudos que haviam realizado este ensaio, principalmente argamassas que possuíssem substituição de resíduos cerâmicos.

Na Tabela 5.7 é realizada a comparação das argamassas de referência de NHL com substituição de metacaulin. As argamassas sem substituição por metacaulin mostram-se com resultados de diâmetro de massa superiores às de Lino (2013); já as com substituição por metacaulin apresentam resultados inferiores às estudadas por Lino (2013), tanto à orientação norte quanto a sul.

Tabela 5.7 - Comparação dos resultados do ensaio de impacto de esfera em argamassas com substituição por NHL com resultados de outros autores

| Argamassa | Orientação | Resultado | | Lino, 2013 | |
|-----------|------------|-----------|------|------------|------|
| | | Média | D.P. | Média | D.P. |
| NHL | SUL | 13,4 | 2,1 | 8,4 | 1,1 |
| | NORTE | 11,6 | 2,2 | 8,2 | 0,4 |
| NHL_2,5Mk | SUL | 8,9 | 2,9 | - | - |
| | NORTE | 8,8 | 2,0 | - | - |
| NHL_5Mk | SUL | 9,5 | 2,6 | 10,6 | 1,3 |
| | NORTE | 10,1 | 2,7 | 10,4 | 0,5 |

A Tabela 5.8 apresenta a comparação de resultados das argamassas com substituição de CL com os de outros autores.

As argamassas de referência apresentam resultados inferiores de diâmetro de moça em todos as situações aos encontrados por Lino (2013), apesar destas argamassas possuírem o mesmo traço das argamassas de referência.

Tabela 5.8 - Comparação dos resultados do ensaio de impacto de esfera em argamassas com substituição por CL com resultados de outros autores

| Argamassa | Orientação | Resultado | | Lino, 2013 | |
|-----------|------------|-----------|------|------------|------|
| | | Média | D.P. | Média | D.P. |
| CL | Sul | 16,1 | 3,3 | 19,0 | 1,6 |
| | Norte | 14,0 | 1,6 | | |
| CL_10Mk | Sul | 12,3 | 2,2 | - | - |
| | Norte | 13,3 | 1,8 | - | - |
| CL_20Mk | Sul | 12,5 | 1,7 | 15,0 | 1,6 |
| | Norte | 13,3 | 0,9 | 14,2 | 1,5 |

5.5 Velocidade de pulso ultrassônico

O ensaio velocidade de pulso ultrassônico foi realizado em cada painel do murete em 3 diferentes alturas, em clima seco, as distâncias de 6, 8, 10, 12, 15, 18 e 20 cm do emissor, sendo o resultado

apresentado através da média aritmética dos valores obtidos nas três alturas distintas, como referido em no item 3.3.5 deste trabalho.

No murete 1 estão expostas a norte e sul as argamassas NHL_10T1, NHL_10T2, NHL_25T2, NHL_25T1 fabricadas por Madeira (2013).

Ao realizar o ensaio neste murete notou-se que os valores apresentaram uma tendência de aumento da velocidade conforme o aumento da distância, tanto no murete voltado a norte ou a sul como apresentado tanto nas Figuras 5.27 e 5.28.

Este aumento caracteriza um grau de compactação constante nas argamassas, comprovando a sua boa aplicação. A argamassa NHL_10T2 Sul apresentou uma linha de tendência exponencial mais significativa que as demais argamassas voltadas a mesma orientação, conforme demonstrado na Figura 5.27, apresentando, desta forma, um resultado acima do previsto aos 6cm, 8cm, 18cm e 20 cm de distância.

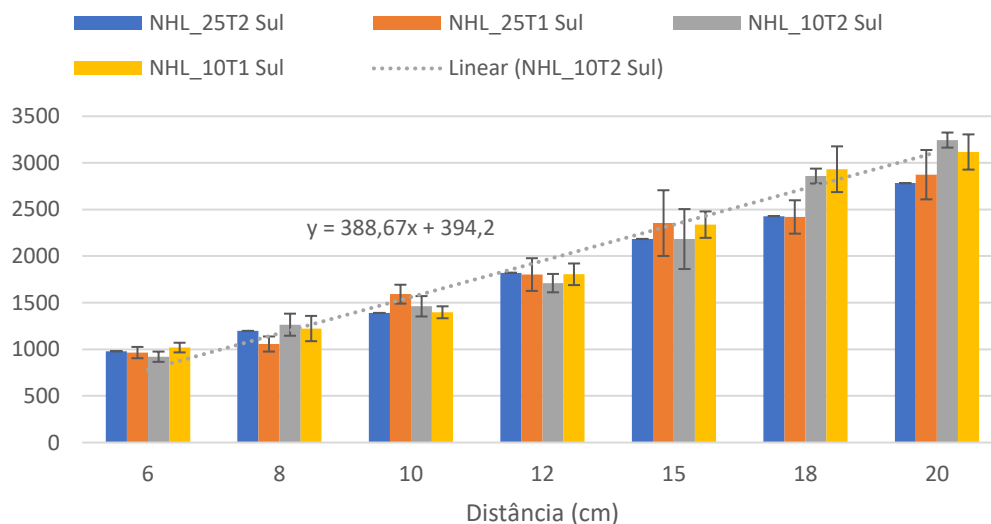


Figura 5.27 – Velocidade de pulso ultrassônico dos rebocos de argamassa com 25% e 10% de resíduos de cerâmica T1 e T2, aplicados no Murete 1, expostos a norte

Ao analisar o resultado obtido nas argamassas orientadas a norte, o resultado, apesar de similar as argamassas orientadas a sul, demonstrou diferenças quanto à tendência dos resultados.

Neste caso, a argamassa NHL_10T2 Norte mostrou uma tendência linear mais significativa que as demais argamassas. Porém, apenas aos 6 cm e 18 cm de distância o valor médio obtido mostrou-se superior ao valor médio previsto, diferente do resultado da argamassa voltada a sul, que apresentou

valor superior em mais distâncias. Este resultado, apesar de não condizer com o esperado, não mostrou-se o suficiente para invalidar a boa tendência dos resultados.

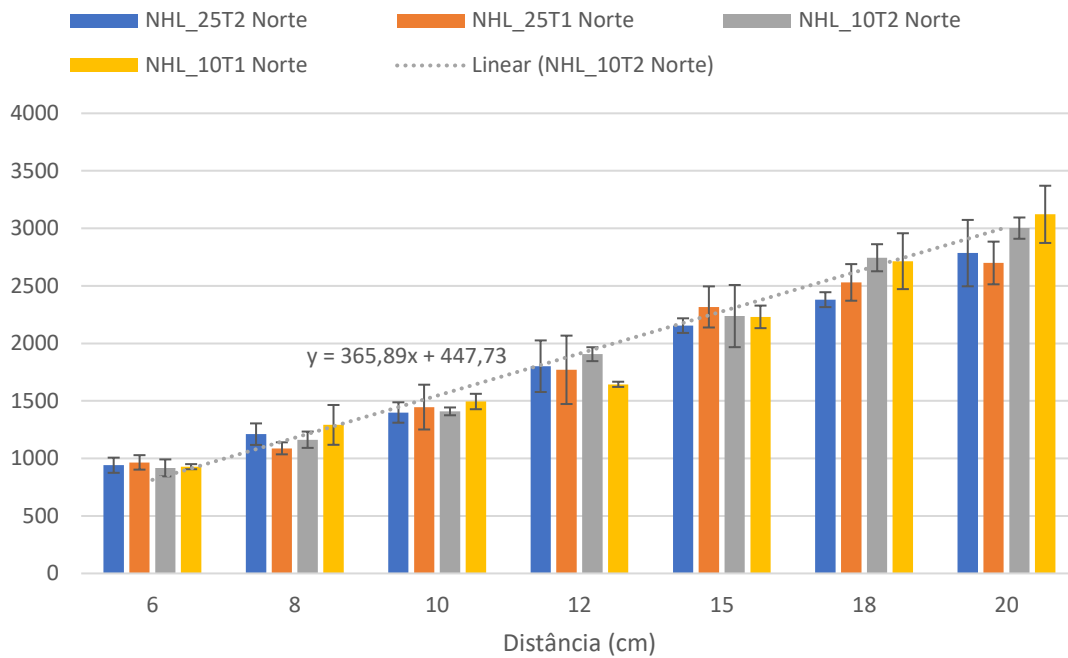


Figura 5.28 - Dureza superficial por esclerômetro dos rebocos de argamassa com 25% e 10% de resíduos de cerâmica T1 e T2, aplicados no Murete 1 em clima seco e húmido, expostos a sul

O murete 2 possui as argamassas NHL, NHL_2,5Mk e NHL_5Mk expostas a norte e sul fabricadas por Valério (2013).

As argamassas aplicadas no murete 2 apresentaram uma tendência de aumento de velocidade de pulso ultrassônico conforme o aumento da distância, de forma que comprova uma boa aplicação da argamassa e é comprovativo de um alto grau de compacidade.

Na Figura 5.29 é possível perceber que a tendência de crescimento da velocidade de pulso ultrassônico com o aumento da distância esperada ocorreu nas argamassas voltadas a sul, sendo a argamassa NHL_5Mk a que apresentou uma tendência linear dos resultados mais expressiva que as demais. Porém, em nenhuma das distâncias o valor da média da velocidade mostrou-se superior ao da previsão linear. Este resultado, apesar de ser não ser o indicado, não caracteriza um mau comportamento da argamassa.

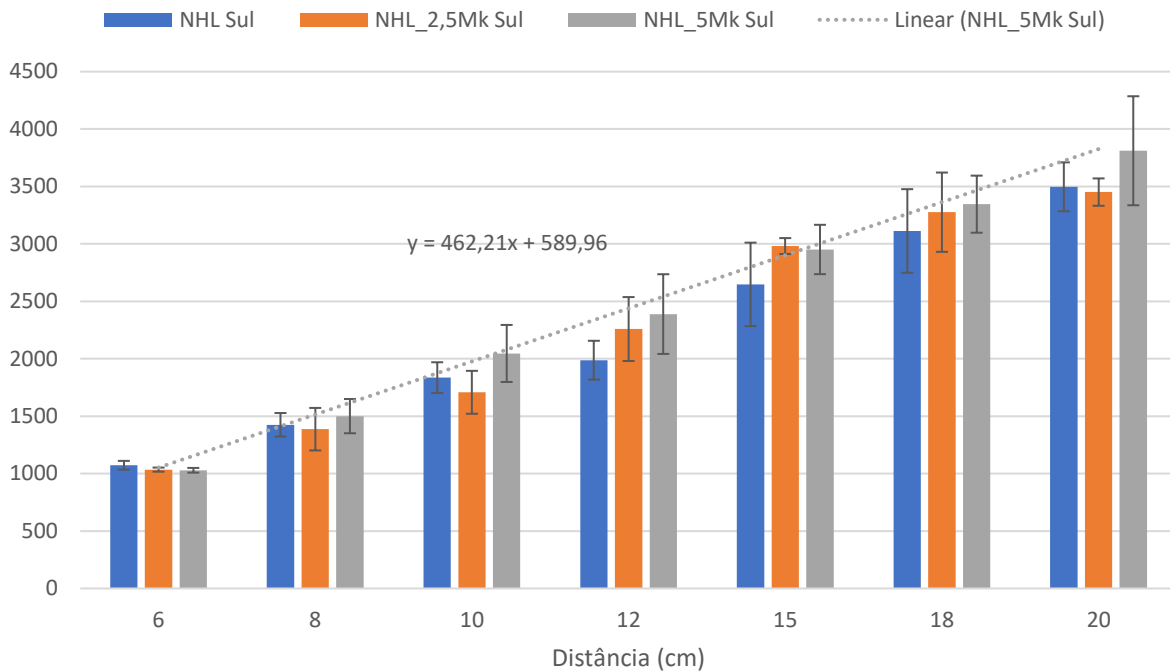


Figura 5.29 - Resultado da velocidade de pulso ultrassônico das argamassas aplicadas no Murete 2, com 0%, 2,5% e 5% de substituição da NHL por Mk, expostas a sul

As argamassas voltadas a norte, mostrado na Figura 5.30, apresentaram a mesma tendência de aumento da velocidade de pulso ultrassônico conforme o aumento da distância, sendo também possível explicar este resultado à boa aplicação da argamassa e seu bom grau de compacidade.

Tal qual o murete orientado a sul, a argamassa NHL_5Mk apresentou a melhor tendência linear de crescimento de velocidade, apesar de apresentar um resultado inferior aos 20 cm, sendo o resultado obtido superior à linha de tendência à distância de 18 cm, o que indica uma boa compacidade a esta distância.

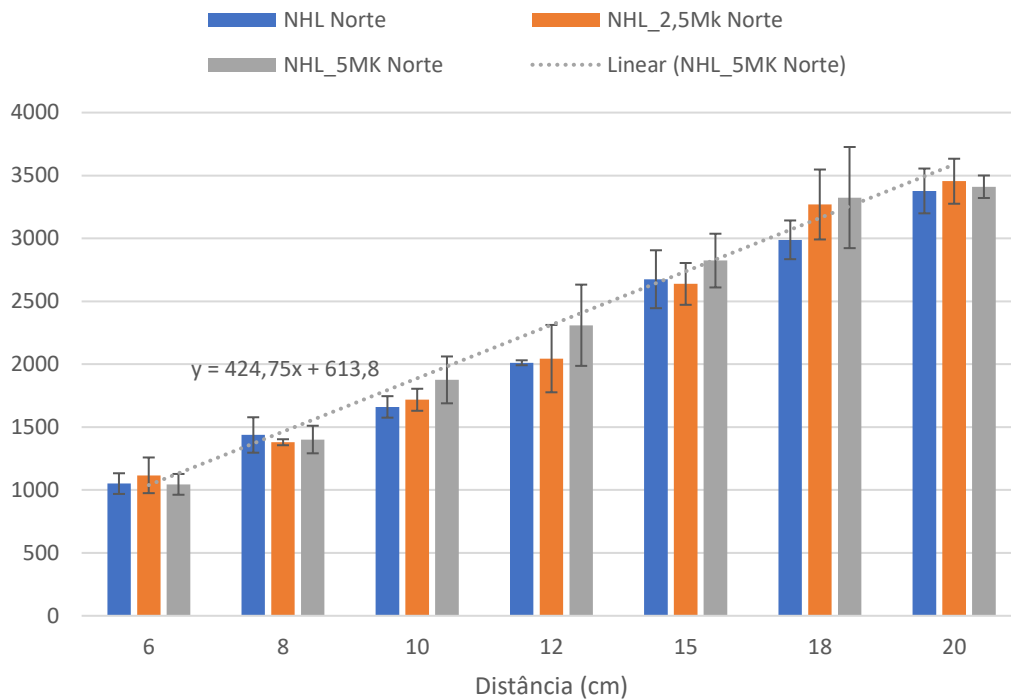


Figura 5.30 - Resultado da velocidade de pulso ultrassônico das argamassas aplicadas no Murete 2, com 0%, 2,5% e 5% de substituição da NHL por Mk, expostas a norte

No murete 3 as argamassas CL, CL_10Mk e CL_20Mk fabricadas por Vargas (2013) encontram-se expostas a norte e sul.

Na 5.31 é possível notar que não ocorreu a tendência esperada do aumento da velocidade de pulso ultrassônico com o aumento da distância. Este fenômeno pode ser explicado por regiões de má aplicação da argamassa, sendo possível que existam vazios no interior do painel de reboco ou até mesmo um baixo grau de compacidade.

Apesar desta anomalia nos resultados, a argamassa CL_10Mk apresentou a melhor linha de tendência em comparação com as argamassas aplicadas a orientação sul, de forma que, como já elucidado com a comparação anterior, foi a argamassa que obteve o melhor resultado nesta orientação.

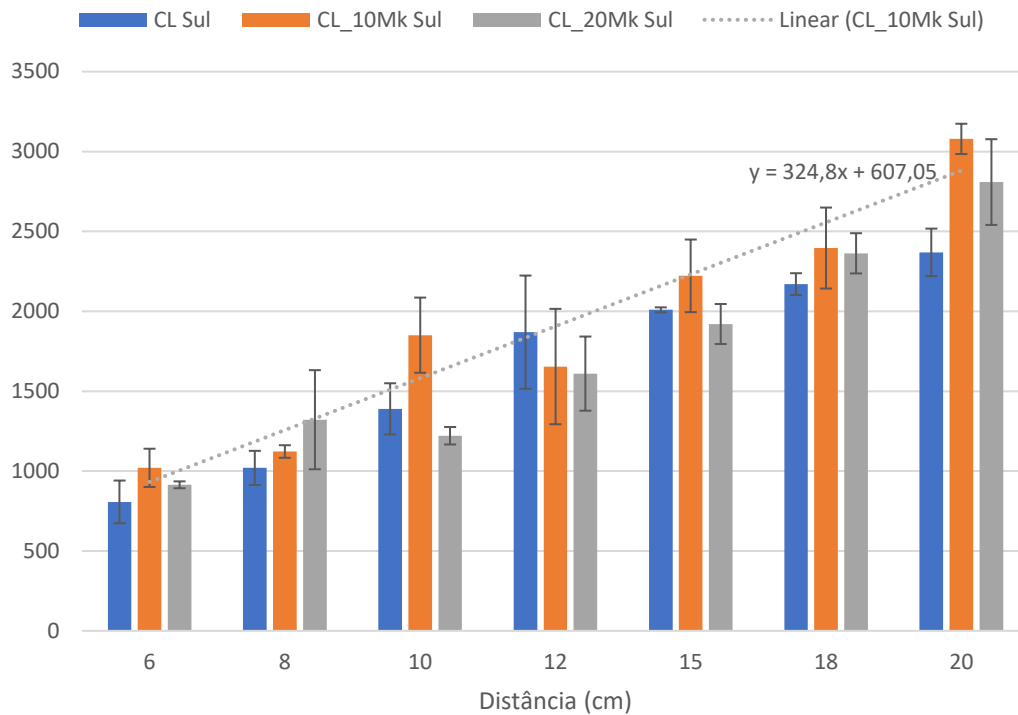


Figura 5.31 - Resultado da velocidade de pulso ultrassônico dos painéis de argamassas de cal aérea com 0%, 10% e 20% de Mk aplicadas no Murete 3 a sul

A Figura 5.32 apresenta o resultado obtido nas argamassas voltadas a norte. A tendência de aumento da velocidade de pulso ultrassônico com o aumento da distância mostra-se mais aparente nestas argamassas, de forma que a sua aplicação e, conseqüentemente, grau de compacidade mostram-se superiores que as argamassas voltadas a sul.

Neste painel, a argamassa CL Sul apresentou a melhor linha de tendência linear em comparação com as demais argamassas aplicadas, sendo a distância de 10 cm a que apresenta resultado mais elevado, podendo ser, esta zona, a que apresenta maior grau de compacidade.

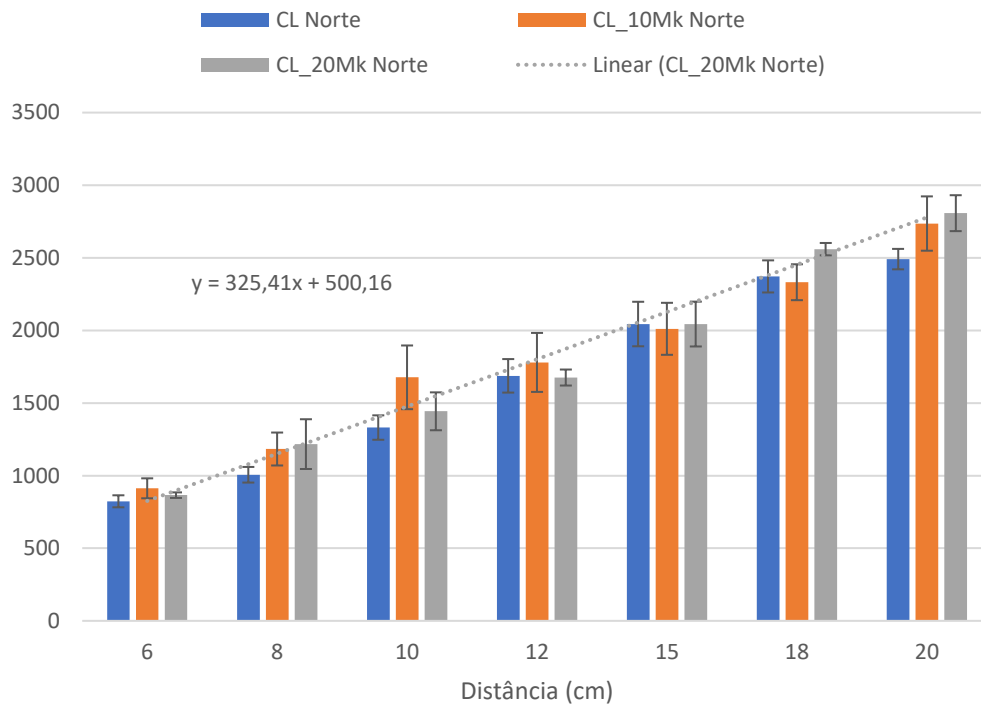


Figura 5.32 - Resultado da velocidade de pulso ultrassônico dos painéis de argamassas de cal aérea com 0%, 10% e 20% de Mk aplicadas no Murete 3 a norte

O murete 4 possui as argamassas CL2_25t (L), CL3_10t(ArF) e CL3, feitas por Jamú (2013) e expostas apenas na direção leste.

Apesar do alto grau de degradação deste painel, ainda foi possível obter a tendência do aumento da velocidade de pulso ultrassônico com o aumento da distância, conforme apresentado na Figura 5.33.

A argamassa CL_25t apresentou uma linha de tendência linear superior as demais argamassas aplicadas, obtendo ainda valores superiores às distâncias 15cm, 18cm e 20cm, sendo este resultado possível pelo grau de deterioração superior às demais argamassas aplicadas, de forma que há um maior destacamento do material e, conseqüentemente, menor compactidade, o que apresenta maiores resultados no ensaio.

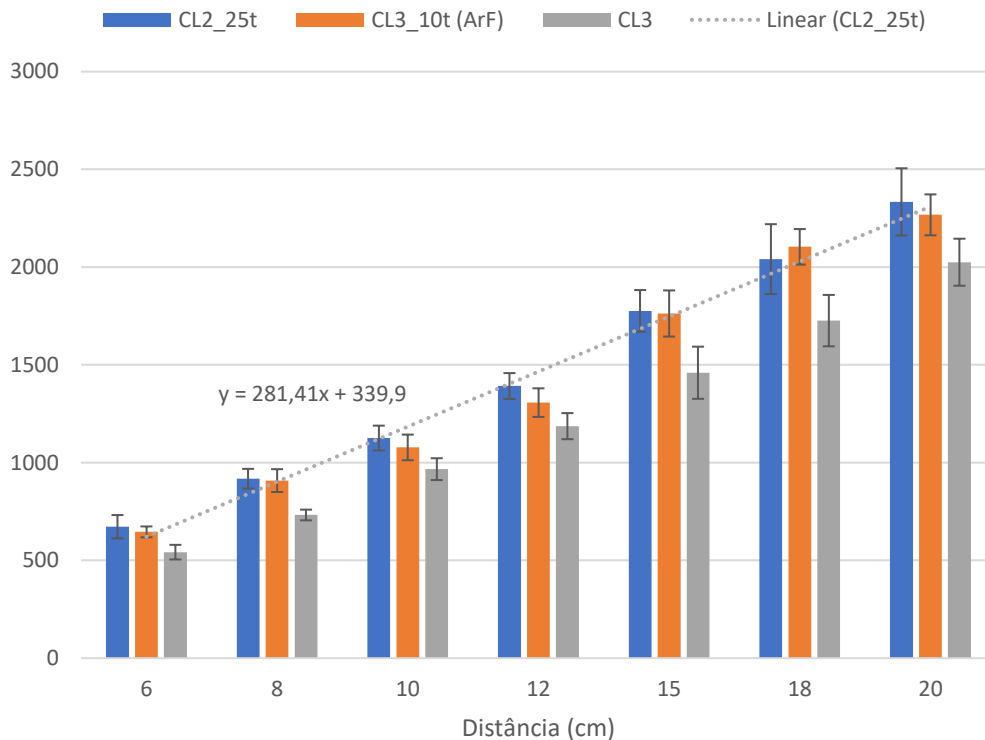


Figura 5.33 - Valor da velocidade de pulso ultrassônico dos painéis de argamassas de traço 1:2 e 1:3, com 0%, 10% e 25% de cal aérea expostos a estes, aplicadas no murete 4

As Tabelas 5.9 e 5.10 representam, respectivamente, a comparação dos resultados obtidos neste ensaio das argamassas de referência com os resultados obtidos por outros autores, para argamassas de NHL e CL.

Ao analisar os resultados das argamassas com os obtidos em argamassas sobre suporte de tijolo aos 180 dias realizado por Madeira (2013), é possível notar que, mesmo se tratando das mesmas argamassas, os resultados são bastante diferentes. Em todas as argamassas de referência os valores mostraram-se superiores, o que pode ter sido ocasionado pela diferença de distâncias, uma vez que Madeira (2013) apenas realizou o ensaio a distâncias distintas desta campanha experimental. Além disto, pode-se também justificar pela exposição natural em que se encontram os muretes, que pode ter influenciado no alto grau de compacidade dos rebocos.

O mesmo ocorre ao comparar os resultados das argamassas com os de Fontes (2013) e Lino (2013): apesar de não serem as mesmas argamassas, os resultados obtidos sempre são superiores.

Tabela 5.9 - Comparação dos resultados do ensaio de velocidade de pulso ultrassónico em argamassas de NHL com resultados de outros autores

| Argamassa | Orientação | Resultado | | Lino, 2013 | | Fontes, 2013 | | Madeira, 2013 | |
|-----------|------------|-----------|-------|------------|-------|--------------|------|---------------|------|
| | | Média | D.P. | Média | D.P. | Média | D.P. | Média | D.P. |
| NHL_25T2 | Sul | 1826,0 | 650,7 | - | - | - | - | 693 | 57 |
| | Norte | 1810,2 | 646,5 | - | - | - | - | | |
| NHL_25T1 | Sul | 1866,1 | 702,6 | - | - | - | - | 667 | 52 |
| | Norte | 1830,7 | 679,9 | - | - | - | - | | |
| NHL_10T2 | Sul | 1948,9 | 820,3 | - | - | 1628 | 615 | 656 | 66 |
| | Norte | 1911,3 | 761,3 | - | - | | | | |
| NHL_10T1 | Sul | 1975,7 | 802,8 | - | - | - | - | 727 | 66 |
| | Norte | 1917,9 | 766,7 | - | - | - | - | | |
| NHL | Sul | 2225,3 | 866,5 | 1464,1 | 217,4 | 1262 | 119 | - | - |
| | Norte | 2171,6 | 826,3 | 1774,4 | 316,3 | | | - | - |
| NHL_2,5Mk | Sul | 2299,4 | 926,2 | - | - | - | - | - | - |
| | Norte | 22231,4 | 880,2 | - | - | - | - | - | - |
| NHL_5Mk | Sul | 2438,8 | 976,1 | 1553,6 | 289,2 | - | - | - | - |
| | Norte | 2312,8 | 897,4 | 1554,9 | 283,5 | - | - | - | - |

Ao comparar as argamassas de CL com outros autores, na Tabela 5.10, nota-se o mesmo que nas de NHL, ou seja, as argamassas de referência sempre mostram resultados superiores, mesmo em argamassas iguais, como no caso de Faria et al. (2014). Tal era expectável pois trata-se de substituição parcial de ligante por material que não o é.

Tabela 5.10 - Comparação dos resultados do ensaio de velocidade de pulso ultrassônico em argamassas de CL com resultados de outros autores

| Argamassa | Orientação | Resultado | | Lino, 2013 | | Faria et al., 2014 | |
|-----------|------------|-----------|-------|------------|-------|--------------------|------|
| | | Média | D.P. | Média | D.P. | Média | D.P. |
| CL | Sul | 1661,9 | 584,4 | 870,5 | 96,3 | - | - |
| | Norte | 1679,3 | 627,2 | | | - | - |
| CL_10Mk | Sul | 1906,2 | 713,9 | - | - | - | - |
| | Norte | 1804,5 | 613,9 | - | - | - | - |
| CL_20Mk | Sul | 1736,9 | 657,0 | 1015,6 | 110,3 | - | - |
| | Norte | 1801,8 | 678,3 | 1086,9 | 136,9 | - | - |
| CL2_25e | Este | 1465,6 | 585,9 | - | - | 775 | 98 |
| CL3_10e | Este | 1439,1 | 590,3 | - | - | 725 | 104 |
| CL3 | Este | 1234,2 | 514,2 | - | - | 740 | 172 |

5.6 Absorção de água a baixa pressão por tubos de Karsten

Tal como referido, o ensaio de absorção de água à baixa pressão por tubos de Karsten foi realizado em cada painel dos muretes apenas em clima seco. O resultado apresentado surge da média aritmética obtida dos volumes obtidos em 3 pontos, registrados em diferentes alturas, em tempos fixos, como referido em 3.3.6. São apresentados os valores médios da absorção de água das argamassas, onde se obteve curvas de absorção, num período t , nas diversas leituras, para cada uma das argamassas.

No murete 1 estão expostas a norte e sul as argamassas NHL_10T1, NHL_10T2, NHL_25T2, NHL_25T1 fabricadas por Madeira (2013).

Nas argamassas voltadas a sul, apresentada na Figura 5.34, é possível notar que a argamassa NHL_10T1 Sul apresentou um aumento de absorção de água mais suave do que as demais argamassas aplicadas; porém, a argamassa NHL_25T2 atingiu a marca limite de 4 cm³ após a argamassa NHL_10T1 Sul, tendo a sua absorção ocorrido de forma mais abrupta nos primeiros minutos e depois estabilizado. Este resultado pode ser explicado pela forma de obtenção dos resultados, que são a média dos valores de volume obtidos em um tempo fixo.

O desempenho da NHL_25T2, que apresenta 25% de substituição de ligante com ladrilho cerâmico, pode ser explicado pela permeabilidade reduzida do ladrilho face ao tijolo, que, desta forma, garantiu

uma impermeabilidade maior a esta argamassa às demais aplicadas. É ainda possível notar que a argamassa NHL_10T2 apresentou maior absorção à argamassa NHL_25T1 que, por sua vez, possui 25% de substituição de ligante por tijolo cerâmico.

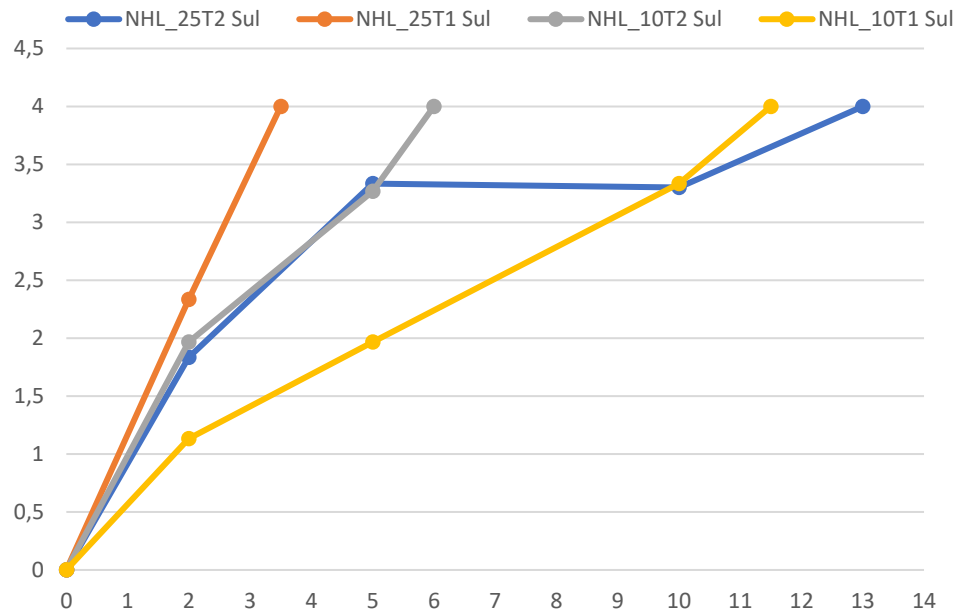


Figura 5.34 – Absorção de água por tubos de Karsten no painel de argamassa NHL com 25% e 10% de resíduos de cerâmica T1 e T2, aplicação à argamassa NHL, aplicado no Murete 1, exposto a sul

Nas argamassas voltadas à orientação norte, como representado na Figura 5.35, é possível perceber que a argamassa NHL_10T1 apresentou um grau de absorção inferior às demais argamassas, e que a argamassa NHL_25T2 não apresentou constância no seu desempenho voltado a sul, o que pode ser explicado pelos resultados apresentados serem as médias dos valores encontrados em tempos fixos.

É possível também explicar este fenômeno pela orientação das argamassas, uma vez que a orientação norte recebe menor incidência solar e de chuva e, desta forma, não garantiu uma impermeabilidade esperada como a obtida na orientação sul.

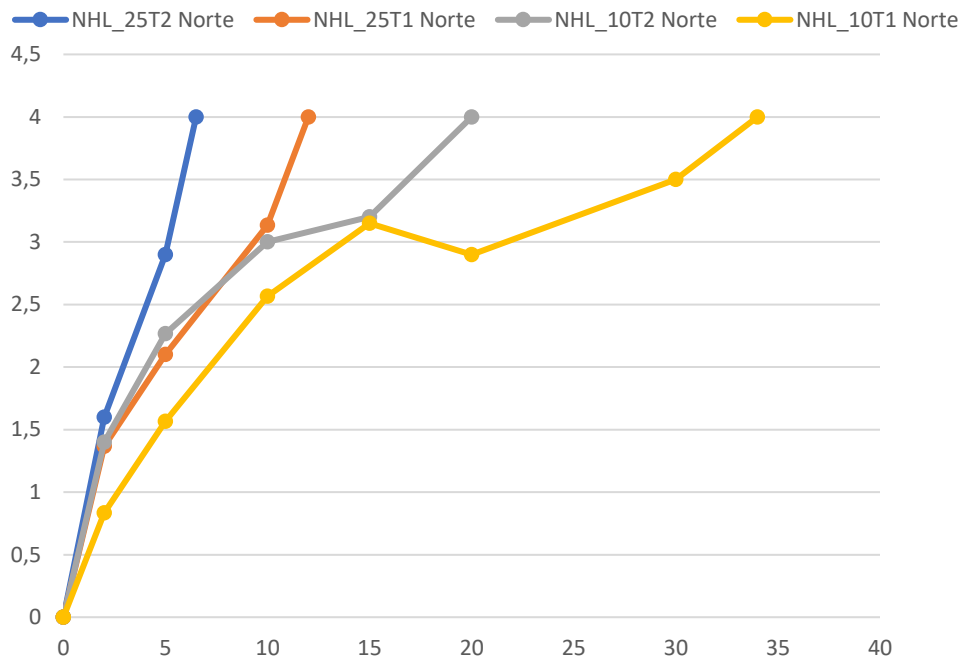


Figura 5.35 - Absorção de água por tubos de Karsten dos rebocos de argamassa com 25% e 10% de resíduos de cerâmica T1 e T2, aplicados no Murete 1, expostos a norte

O murete 2 possui as argamassas NHL, NHL_2,5Mk e NHL_5Mk expostas a norte e sul fabricadas por Valério (2013).

Na Figura 5.36, onde são apresentados os valores das argamassas voltadas a sul, é possível notar que a argamassa NHL_5Mk apresentou a menor taxa de absorção em função do tempo comparada às demais, o que comprova que o aumento do metacaulin influencia na diminuição da porosidade da argamassa (Moisés & Cabrera, 2002) e, conseqüentemente, a diminuição da sua taxa de absorção. Ainda corroborando esta teoria, a argamassa de controle NHL apresentou o pior desempenho de absorção, pois a NHL é bastante porosa e, desta forma, com grande grau de absorção de água.

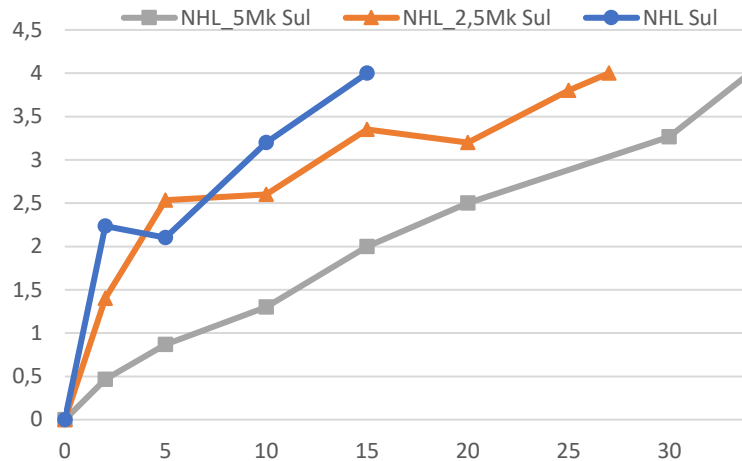


Figura 5.36 - Absorção de água a baixa pressão por tubos de Karsten no painel de aplicadas no Murete 2, com 0%, 2,5% e 5% de substituição da NHL por Mk, expostas a sul

Os resultados obtidos das argamassas voltadas a norte, apresentados na Figura 5.37, está como o esperado após a apresentação dos resultados da orientação sul, onde o aumento do metacaulin foi responsável pela diminuição da absorção de água e, conseqüentemente, o aumento da impermeabilização da argamassa, onde a argamassa NHL_5Mk apresenta a melhor performance.

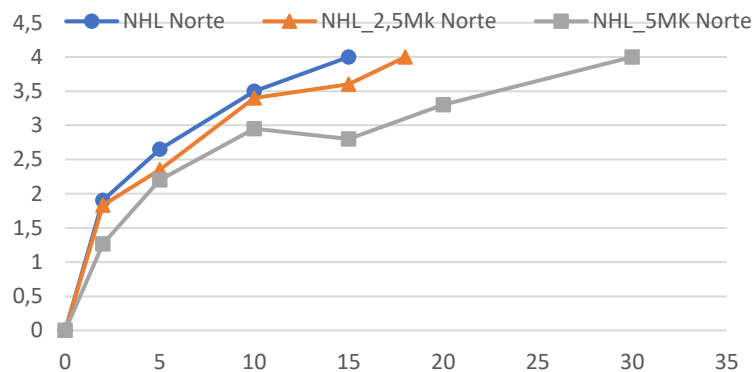


Figura 5.37 - Absorção de água a baixa pressão por tubos de Karsten no painel de aplicadas no Murete 2, com 0%, 2,5% e 5% de substituição da NHL por Mk, expostas a norte

No murete 3 as argamassas CL, CL_10Mk e CL_20Mk fabricadas por Vargas (2013) encontram-se expostas a norte e sul.

A Figura 5.38 apresenta os resultados obtidos das argamassas voltadas a sul neste murete. Porém, o resultado obtido nesta orientação não foram os esperados seguindo a tendência do aumento da porcentagem de metacaulin com a diminuição da absorção de água. Isto pode ser explicado pois a CL

não reage bem face à água (Veiga, Velosa, & Magalhães, 2009) e esta orientação, por sofrer maior incidência de chuva, pode ter prejudicado a carbonatação da cal, tornando a argamassa mais porosa e, conseqüentemente, com uma capacidade de absorção maior.

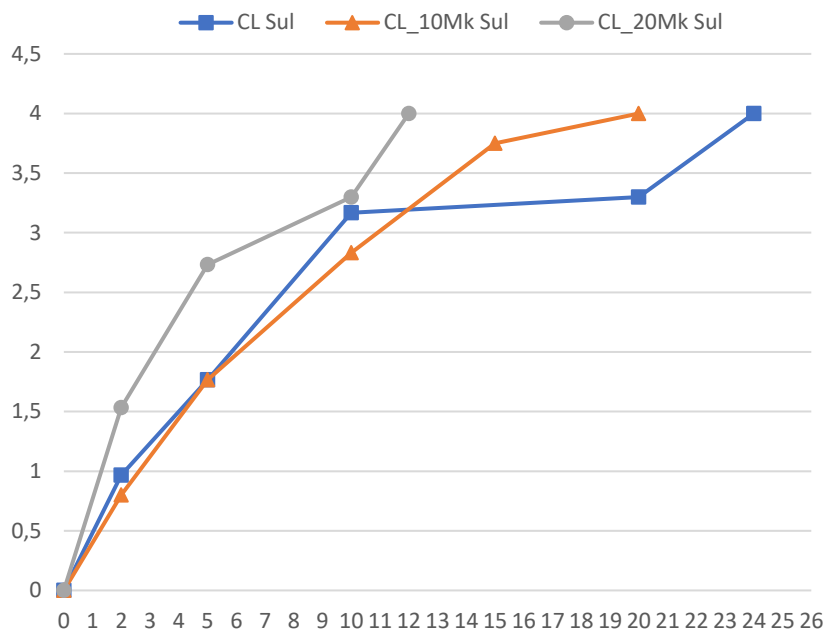


Figura 5.38 - Absorção de água a baixa pressão por tubos de Karsten no painel de argamassas de cal aérea com 0%, 10% e 20% de Mk aplicadas no Murete 3, exposto a sul

Ao analisar os dados obtidos na orientação norte, na Figura 5.39, é possível notar que a orientação com menor incidência de chuva acarretou uma melhor carbonatação da argamassa de cal, permitindo, então, que o aumento de metacaulin promovesse um melhor desempenho face à água que as argamassas orientadas a sul. Desta forma, a argamassa CL_20Mk apresenta uma diminuição na absorção de água; porém, este resultado ainda não é o suficiente para garantir que o aumento da percentagem de metacaulin por si só seja o fator resultante do desempenho desta argamassa, face à proximidade dos valores com a argamassa de referência CL.

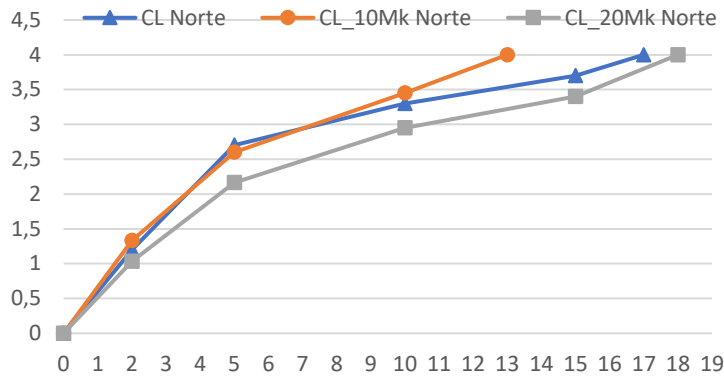


Figura 5.39 - Absorção de água a baixa pressão por tubos de Karsten no painel de argamassas de cal aérea com 0%, 10% e 20% de Mk aplicadas no Murete 3 a norte

O murete 4 possui as argamassas CL2_25t (L), CL3_10t(ArF) e CL3, feitas por Jamú (2013) e expostas apenas na direção leste.

O resultado das argamassas voltadas a este, apresentado na Figura 5.40, mostra uma inconstância nos valores. Isto pode ser explicado não só pelo alto grau de deterioração do painel, onde a presença de fendilhação deve ter influenciado o aumento da porosidade e, conseqüentemente, da absorção de água, mas também pelo mau desempenho da terra face à água, o que impossibilita um resultado fidedigno ao ensaio realizado.

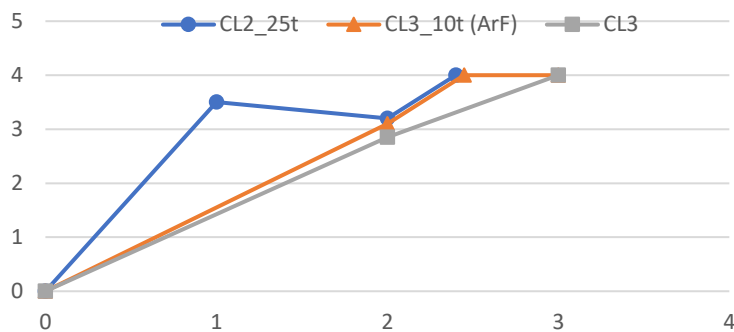


Figura 5.40 - Absorção de água a baixa pressão por tubos de Karsten no painel de argamassas de traço 1:2 e 1:3, com 0%, 10% e 25% de cal aérea expostos a este, aplicadas no murete 4

A forma que cada autor utilizou para calcular os valores diferiu bastante, de forma que, para uniformizar os resultados, foi utilizado o coeficiente de absorção aos 5 min,

Madeira (2013), Fontes et al. (2013) e Madeira (2013), calcularam o coeficiente de capilaridade aos 5 minutos. Uma vez que Faria et al. (2014) calculou a quantidade de água absorvida aos 5min e, as argamassas CL2, CL3_10t e CL3 absorveram os 4 ml de água antes dos 5min, não foi possível efetuar uma comparação com os resultados deste trabalho.

As Tabelas 5.11 e 5.12 apresentam, respectivamente, o resultado do coeficiente de absorção das argamassas de NHL e CL e comparação com o resultado obtido por outros autores.

É possível notar, na Tabela 5.11, que as argamassas de NHL apresentam resultados inferiores aos apresentados por Fontes (2013). Uma vez que esta autora apenas realizou provetes em suporte de tijolo, é possível que a exposição natural em muretes e, conseqüentemente, maiores níveis de secagem e molhagem, tenham influenciado numa maior compacidade das argamassas. O mesmo ocorreu para as argamassas elaboradas por Madeira (2013). Apesar de serem as mesmas argamassas, a exposição natural das argamassas de referência ocasionou uma maior compacidade das argamassas, reduzindo o valor do coeficiente de absorção.

Tabela 5.11 - Comparação dos resultados do coeficiente de absorção aos 5 min de água à baixa pressão de argamassas de NHL com resultados de outros autores

| Argamassa | Orientação | Resultado | Lino, 2013 | Fontes et al., 2013 | Madeira, 2013 |
|------------------|-------------------|------------------|-------------------|----------------------------|----------------------|
| NHL | Sul | 1,95 | 1,28 | 2,77 | - |
| | Norte | 2,46 | 1,23 | | - |
| NHL_2,5Mk | Sul | 2,35 | 1,33 | - | - |
| | Norte | 2,18 | 1,79 | - | - |
| NHL_5Mk | Sul | 0,8 | 1,68 | 3,2 | - |
| | Norte | 2,04 | 1,72 | | - |
| NHL_10T1 | Sul | 3,1 | - | - | 13,5 |
| | Norte | 2,7 | | | |
| NHL_10T2 | Sul | 3,39 | - | - | 21,9 |
| | Norte | 1,95 | | | |
| NHL_25T1 | Sul | 3,03 | - | - | 27,1 |
| | Norte | 2,1 | | | |
| NHL_25T2 | Sul | 1,83 | - | - | 28,2 |
| | Norte | 1,45 | | | |

Na Tabela 5.12 apenas foi possível comparar o resultado do coeficiente de absorção de água aos 5min das argamassas de referência com os apresentados por Lino (2013), pelos motivos apresentados acima. A argamassa de referência CL foi a única que apresentou resultados inferiores; porém, vale salientar que as argamassas de referência CL_20Mk de referência foram elaboradas com substituição de 20% de Mk, enquanto as argamassas comparadas de Lino (2013) foram elaboradas com substituição de 30% de Mk. Sabe-se que o metacaulin melhora a compacidade da argamassa, conferindo uma menor absorção de água (Moisés & Cabrera, 2002).

Tabela 5.12 - Comparação dos resultados do coeficiente de absorção aos 5 min de água à baixa pressão de argamassas de CL com resultados de outros autores

| Argamassa | Orientação | Resultado | Lino, 2013 |
|-----------|------------|-----------|------------|
| | | Média | Média |
| CL | Sul | 1,63 | 2,59 |
| | Norte | 2,51 | |
| CL_10Mk | Sul | 1,63 | - |
| | Norte | 2,42 | - |
| CL_20Mk | Sul | 2,54 | 1,77 |
| | Norte | 2,01 | 1,74 |

6 Conclusões

6.1 Conclusões finais

A presente dissertação iniciou-se com uma revisão do estado dos conhecimentos, abrangendo o contexto histórico da utilização das argamassas de cal, além de abordar o quesito de sustentabilidade em que se insere o tema. Seguiu-se uma caracterização dos constituintes utilizados na formulação das argamassas e estudos existentes na área.

A etapa experimental avaliou as características de rebocos de argamassas aplicados em painéis de muretes de alvenaria de tijolo cerâmico e de taipa, expostos há aproximadamente 7 anos. Dessa forma é possível avaliar a influência da substituição de CL e NHL por diferentes percentagens de metacaulin e de terra, em argamassas de traço 1:2 e 1:3.

Finalizada esta etapa, considera-se que os objetivos a que este trabalho se apresenta foram cumpridos, uma vez que a análise do desempenho *in situ* de rebocos de argamassas de cal expostas a ambiente natural foi analisado através de ensaios *in situ*.

Ao comparar os resultados das argamassas, é difícil optar por qual seria a mais eficiente, uma vez que os resultados apresentados diferem muito entre si. Na análise visual é possível notar que as argamassas de terra com substituição de cal aérea por terra estão em avançado estado de degradação, o que faz com que estas argamassas não tenham apresentado bons resultados em comparação com as demais. No entanto, tal pode dever-se à degradação por ensaios já antes efetuados nos painéis e do próprio murete de taipa. No ensaio de dureza superficial por durómetro, os resultados mantiveram-se aproximados. Nas argamassas de CL, as argamassas com substituição por metacaulin apresentam resultados significativamente mais elevados que as argamassas com substituição por terra.

Já para as argamassas de NHL, a substituição por resíduos cerâmicos ou metacaulin mostrou-se com resultados semelhantes, mostrando bom desempenho para as duas pozolanas. Ainda na dureza superficial, porém utilizando o equipamento esclerómetro pendular, o resultado permanece similar ao durómetro para as argamassas de NHL, mas nas argamassas com substituição por resíduos cerâmicos apresentaram melhor desempenho sobre as com substituição por metacaulin.

Ao analisar a deformabilidade das argamassas no ensaio de resistência ao impacto de esfera, no grupo das argamassas de NHL, as argamassas que em seu traço sofreram substituição por metacaulin apresentam diâmetro de moça inferiores às argamassas de terra, resultado este esperado. No grupo

das argamassas de CL, apenas foi realizado este ensaio nas argamassas com substituição por metacaulin, de forma que as argamassas CL_10Mk e CL_20Mk apresentam resultados aproximados, sendo a CL_10Mk a que apresenta resultado ligeiramente menor.

No ensaio de absorção de água à baixa pressão, o coeficiente de absorção aos 5 minutos nas argamassas de NHL apresenta-se similar entre as argamassas, porém, a argamassa NHL_5Mk sul apresenta o menor valor dentre as argamassas de NHL, tanto com substituição por resíduo cerâmico quanto metacaulin. Nas argamassas de CL não foi possível calcular o resultado para as argamassas com substituição por terra, uma vez que estas absorveram toda a água em tempo inferior ao estipulado; porém, nas argamassas com substituição por metacaulin, as argamassas CL Sul e CL_10Mk Sul apresentaram o mesmo resultado.

Os resultados do ensaio de velocidade de pulso ultrassônico mostraram-se bastante variados em todas as argamassas. Dentre as argamassas de NHL, a argamassa que apresenta valores superiores foi a argamassa com substituição por metacaulin NHL_2,5Mk Norte e, dentre as argamassas com substituição de CL, a argamassa CL_10Mk Norte; porém salienta-se o grande desvio padrão que este ensaio possui.

Desta forma, a argamassa CL_10Mk foi a que apresentou melhores resultados nos ensaios *in situ* realizados, sendo, aparentemente, adequada para aplicação como reboco de substituição em conservação de edifícios antigos mas também de alvenaria de tijolo furado. Apenas as argamassas de CL com substituição por terra não parecem ter se mostrado adequadas para este fim, uma vez que estas mostram-se bastante degradadas e apresentaram os piores resultados entre as argamassas estudadas.

A comparação dos resultados obtidos com argamassas analisadas por outros autores, ainda que não em quantidade suficiente, propicia a conclusão de que a cura em ambiente natural proporciona valores mais satisfatórios aos ensaios realizados, e que muitos dos rebocos analisados apresentam durabilidade ao fim de 7 anos ao envelhecimento natural, mesmo não estando protegidos por sistema de pintura.

6.2 Desenvolvimentos futuros

Após a conclusão da campanha experimental *in situ* deste trabalho, vê-se a necessidade de ser realizado um aprofundamento dos conhecimentos relativos às argamassas de cal hidráulica natural e cal aérea com substituições de resíduos cerâmicos, metacaulin e terra. De forma que, vê-se a necessidade de serem realizados estudos que permitam:

- Retirada de amostras dos rebocos de argamassas presentes neste estudo e realização de campanha experimental em laboratório, a fim de comparar com os resultados físico-mecânicos encontrados *in situ* deste trabalho;
- Avaliação química, mineralógica e microestrutural das argamassas aplicadas neste trabalho para encontrar justificações para alguns dos resultados encontrados;
- Caracterizar as argamassas com a mesma formulação deste trabalho, porém em outros tipos de suporte, nomeadamente alvenaria de pedra argamassada, simulando paredes antigas, e alvenaria de blocos de betão, simulando outro tipo de paredes recentes.

Referências bibliográficas

- 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*, 135-143. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.12.069
- ASTM Standarts. (2000). *Standard test method for rubber property – durometer hardness*. United States of America: American Society for Testing Materials - ASTM D2240-00.
- ASTM Standarts. (2008). *Standard test method for rebound hammer of hardened concrete*. United States of America: American Society for Testing Materials - ASTM C805-08.
- Bentur, A. (2002). Cementitious materials – nine millennia and a new century: past, present and future. *J. Mater. Civ. Eng.* 14, 2-22. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2002)14:1(2)
- Braga, A., & Rocheta, V. (2007). *A construção em terra e a sustentabilidade*. Aveiro (CD): 5º Seminário de Arquitetura em Terra em Portugal.
- CEN. (2017). *NP EN 998-1 - Specification for mortar for masonry - Part 1: Rendering and plastering mortar*. Brussels.
- Coelho, A. Z., Torgal, F. P., & Jalali, S. (2009). *A cal na construção*. (TecMinho, Ed.)
- Faria, P. (2004). *Argamassas de Revestimento para Alvenarias Antigas*. Caparica: FCT - UNL.
- Faria, P. (2018). Argamassas de cal e terra: características e possibilidades de aplicação. *Ambiente Construído*, v 18, 49-62.
- Faria, P., Henriques, F., & Rato, V. (2008). Comparative evaluation of lime mortars for architectural con-servation. *Journal of Cultural Heritage*, 9, 338-346. doi:10.1016/j.culher.2008.03.003
- Faria, P., Santos, T., & Aubert, J. E. (2016). Experimental characterization of an earth eco-efficient plastering mortar. *Journal of Materials in Civil Engineering* 28 (1). doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001363.
- Faria, P., Silva, P., Grilo, J., Carneiro, J., Branco, T., Mergulhão, D., & Antunes, R. (2012). Argamassas compatíveis com alvenarias históricas com base em cal hidráulica natural. *CIRea - Conferência Internacional sobre Reabilitação de Estruturas Antigas de Alvenaria*, (pp. 31-40). Lisboa.

- Faria, P., Silva, V., Jamú, N., Dias, I., & Gomes, M. I. (2014). Evaluation of air lime and clayish earth mortars for earthen wall renders. *in: M. Correia, G. Carlos, S. Rocha (Eds.), Vernacular Heritage and Earthen Architecture: Contributions for Sustainable Developmet*, 407- 413. Fonte: hdl.handle.net/10362/11252
- Faria-Rodrigues, M. P. (2004). *Argamassas de revestimento para alvenarias antigas - contributo para o estudo da influência dos ligantes*. Lisboa, FCT-UNL: Tese de Doutoramento em Engenharia Civil.
- Gomes, I. (2013). *Conservação de construções de taipa: argamassas de reparação*. Lisboa: Tese de Doutoramento em Engenharia Civil , FCT - UNL.
- Gomes, M. I., Faria, P., & Gonçalves, T. D. (2018). Earth-based mortars for repair and protection of rammed earth walls. Stabilization with mineral binders and fibers. *Journal of Cleaner Production* 172, 2401 - 2414. doi:10.1016/j.jclepro.2017.11.170
- Grilo, J. (2013). Caracterização de argamassas de cal hidráulica natural nh13.5 de fabrico nacional. *Dissertação em Mestrado em Engenharia Civil*.
- Grilo, J., & Faria, P. (2012). da percentagem de metacaulino em argamassas de cal NHL3.5 a idade jovem. *2ª Conferência Construção e Reabilitação Sustentável de Edifícios no Espaço LusófonoEspaço Lusófono - CRSSEL*.
- Grilo, J., Faria, P., Veiga, R., Santos Silva, A., Silva, V., & Velosa, A. (2014). New natural hydraulic lime mortars - Physical and microstructural properties in different curing conditions. *Construction and Building Materials* 54, 378 - 384. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.12.078
- Grilo, J., Faria, P., Veiga, R., Santos-Silva, A., Silva, V., & Velosa, A. (2014a). New natural hydraulic lime mortars. Physical and microstructural properties in different curing conditions. *Construction and Building Materials* 54, 378 - 384. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.12.078
- Grilo, J., Santos-Silva, A., Faria, P., Gameiro, A., Veiga, R., & Velosa, A. (2014b). Mechanical and mineralogical properties of natural hydraulic lime-metakaolin mortars in different curing conditions. *Construction and Building Materials* 51, 287 - 294. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.10.045

- Hall, M., & Djerbit, Y. (2004). Rammed Earth sample production: Context Recommendations consistency. *Construction and Building Materials*, 18, 281-286. doi:10.1016/j.conbuildmat.2003.11.001
- Henriques, F., & Faria, P. (2006). Argamassas de substituição na conservação do património. *Construção Magazine*.
- IPQ. (2015). *NP EN 459-1 - Cal de construção; Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade*. Caparica.
- Jamú, N. (2013). *Desenvolvimento e caracterização de argamassas de cal aérea e terra - A influência da terra como ligante*. FCT - UNL: Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil.
- Lima, J., Faria, P., & Santos Silva, A. (2016). Earthen plasters based on illitic soils from Barrocal region of Algarve: contributions for building performance and sustainability. *Key Engineering Materials* 678, 64-77. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.678.64.
- Lino, G. (2013). *Caracterização in situ de rebocos com base em cal e metacaulino*. Dissertação em Mestrado em Engenharia Civil: FCT - UNL.
- LNEC. (2002). *Ficha de ensaio para revestimentos de paredes – Ensaio de absorção de água sob baixa pressão*. Lisboa: FE Pa 43.
- Madeira, T. (2013). *Argamassas de cal hidráulica natural NHL3.5 com resíduos cerâmicos*. FCT - UNL: Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil.
- Maravelaki-Kalaitzaki, P., Bakolas, A., Karatasios, I., & Kilikoglou, V. (2005). Hydraulic lime mortars for the restoration of historic masonry in Crete. *Cement and Concrete Research* 35, 1577-1586. doi:doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.09.001
- Marques, S. F., Ribeiro, R. A., Silva, L. M., Ferreira, V. M., & Labrincha, J. A. (2006). Study of rehabilitation mortars: Construction of a knowledge correlation matrix. *Cement and Concrete Research*, vol. 36, 1894 - 1902. doi:10.1016/j.cemconres.2006.06.005
- Matias, G. F. (2013). Viability of ceramic residues in lime-based mortars. *3rd Historic Mortars Conference*. Glasgow.

- Matias, G., Faria, P., & Torres, I. (2014). Lime mortars with ceramic wastes: Characterization of components and their influence on the mechanical behaviour. *Construction and Building Materials*, vol. 73, 523-534. Fonte: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.108>
- Minke, G. (2006). *Building with Earth. Design and Technology of a Sustainable Architecture*. WIT Press.
- Moisés, F., & Cabrera, J. (2002). The effect of temperature on the hydration rate and stability of the hydration phases of Metakaolin–lime–water systems., *Vol. 32*, pp. 133-138. doi:10.1016/S0008-8846(01)00642-1
- Monteiro, A. , e Faria, P. (2006). Troia Roman Baths (Portugal) - Assessment of history of interventions. *In International Seminar in Conservation*, 273-282.
- Moropoulou, A., Bakolas, A., & Aggelakopoulou, E. (2004). Evaluation of pozzolanic activity of natural and artificial pozzolans by thermal analysis. *Thermochim Acta*, 420, 135 - 140. doi:10.1016/j.tca.2003.11.059
- Pachamama, R., Penido de Rezende, M. A., & Faria, P. (2020). Eco-efficient earth plasters: effect of cow dung and air lime on a kaolinitic clayish earth. *International Journal of Development Research10 (08)*, 39323 - 39328. doi:10.37118/ijdr.19774.08.2020
- Pascoal, P., Borsoi, G., Veiga, R., Faria, P., & Silva, A. S. (2014). Consolidation and chromatic reintegration of historical renders with lime-based pzzolanic products. *Studies in Conservation*, 60:5, 321-332. doi:10.1179/2047058414Y.00000000151
- Pimenta, P. C. (2014). Argamassas de cal aérea e terra caulinítica: Caracterização física e química. *Dissertação para obtenção de grau de mestre em engenharia civil*.
- Pina dos Santos, C. A., & Matias, L. (2006). *Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios. ITE 50*. Lisboa: LNEC.
- Rato, V. (2006). Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas. *Tese de Doutoramento em Engenharia Civil*.
- RILEM. (1980b). Water absorption under low pressure. Pipe method. Test n.ºII.4. Recommendations provisoires. Paris.

- Röhlen, U., & Ziegert, C. (2011). *Earth Building Practice - Planning, Design, Building*. Berlin: Bauwerk Beuth.
- Santos, et. al. (2011). *Adição de metacaulino em betão - efeitos sobre a durabilidade*. Aveiro: Atas do Seminário: Metacaulino em Portugal - Produção, Aplicação e Sustentabilidade. Fonte: <http://repositorio.lnec.pt:8080/jspui/handle/123456789/1002196>
- Santos, T., Faria, P., & Silva Santos, A. (2017). Avaliação in situ do comportamento de rebocos exteriores de argamassas de terra com baixas adições de cais. *Conservar Património* 26, 11-21. doi:10.14568/cp2016022
- Santos, T., Faria, P., & Silva, V. (2019). Can an earth plaster be efficient when applied on different masonries? *Journal of Building Engineering* 23, 314-323.
- Santos, T., Gomes, R., & Faria, P. (2020). Avaliação do envelhecimento natural e de tratamentos superficiais ecológicos em rebocos de terra. *Conservar Património*. Fonte: <https://doi.org/10.14568/cp2019005>
- Santos, T., Nunes, L., & Faria, P. (2017). Production of eco-efficient earth-based plasters: Influence of composition on physical performance and bio-susceptibility. *Journal of Cleaner Production* 167, 55-67. doi:10.1016/j.jclepro.2017.08.131.
- Torraca, G. (2009). -Part 2- Mortars, Bricks and Concretes: Earth Gypsum, Lime and Cements. *Lectures on Materials Science for Architectural Conservation*, 38 - 58.
- Torres, I., Matias, G., & Faria, P. (2020). Natural hydraulic lime mortars - The effect of ceramic residues on physical and mechanical behaviour. *Journal of Building Engineering*, 32. doi:10.1016/j.job.2020.101747
- Valério, J. (2013). *Argamassas de cal hidráulica natural NHL 3.5 - Influência do traço, do metacaulino e da cura*. FCT - UNL: Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil.
- Vargas, D. (2013). *Argamassas de cal aérea e metacaulino - A influência do traço e da cura*. FCT - UNL: Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil.
- Veiga, M. R., Velosa, A., & Magalhaes, A. (2009). Experimental applications of mortars with pozzolanic additions: Characterization and performance evaluation. *Construction and Building Materials*, 318-327. doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.12.003.

- Veiga, M., & Tavares, M. (2002). Características de paredes antigas. Requisitos dos revestimentos por pintura. *Actas do Encontro A indústria das tintas no início do século XXI*. Lisboa: APTETI.
- Veiga, M., Fragata, A., Velosa, A., Magalhães, A., & Margalha, G. (2010). Lime-based mortars: viability for use as substitution renders in historical buildings. *International Journal of Architectural Heritage*, 4, 177-195.
- Veiga, R. (2017). Air lime mortars: What else do we need to know to apply them in conservations and rehabilitation interventions? A review. *Construction and Building materials*, 132-140. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.09.080
- Veiga, R., Velosa, A., & Magalhães, A. (2009). Experimental applications of mortars with pozzolanic additions: Characterization and performance evaluation. *Construction and Building Materials* 23, 318-327. doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.12.003
- Vejmelková, E., Keppert, M., Kersner, Z., & Rovnanikova, P. C. (2012). Mechanical, fracture-mechanical, hydric, thermal, and durability properties of lime-metakaolin plasters for renovation of historical buildings. *Construction and Building Materials* 31, 22-28. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.12.084
- Venkatarama, R. J. (2003). Embodied energy of common and alternative building materials and technologies. *Energy and buildings* 35, 129-137. doi:10.1016/S0378-7788(01)00141-4