

Estudo de tratamentos de consolidação de materiais cerâmicos – Avaliação da potencial nocividade

Joana de Almeida Correia Beringuilho

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Orientadores:

Prof^a Doutora Ana Paula Patrício Teixeira Ferreira Pinto França de Santana

Prof. Doutor Augusto Martins Gomes

Júri

Presidente: Prof. Doutor Albano Luís Rebelo da Silva das Neves e Sousa

Orientador: Prof^a Doutora Ana Paula Patrício Teixeira Ferreira Pinto França de
Santana

Vogal: Eng.^o João Manuel Bessa Pinto

Maio 2017

Agradecimentos

À Prof.^a Doutora Ana Paula Ferreira Pinto, minha orientadora, por toda a orientação, conhecimentos transmitidos e ajuda na análise de resultados ao longo desta dissertação.

Ao Prof. Doutor Augusto Gomes, meu orientador, pelos conhecimentos transmitidos e disponibilidade na revisão do texto, e por toda a paciência demonstrada nos momentos necessários.

Ao Sr. Leonel Silva, ao Sr. Pedro Costa e ao Eng. Pedro Sanches, técnicos do laboratório, pela disponibilidade e apoio durante o trabalho experimental.

À Eng. Bruna Silva, pelo apoio prestado na realização de alguns ensaios, assim como pela ajuda na obtenção de alguns materiais.

À Luísa, pelo apoio e disponibilidade na execução do trabalho experimental realizado em conjunto.

Aos “ARA” (Carina, Dias, Johnny, Marcelo, Marta e Rodrigo) pela amizade, pelo apoio e por me terem acompanhado ao longo do meu percurso no IST, tanto a nível académico como pessoal.

À Filipa, pela paciência e constante apoio que me dedicou durante a execução deste trabalho e em muitas outras etapas académicas, e acima de tudo pela longa amizade e cumplicidade partilhadas.

Ao Tomás, meu companheiro de todos os momentos, pelo incentivo e ânimo conferido tanto no decorrer deste trabalho como longo do meu percurso no IST, mas acima de tudo pelo amor e carinho demonstrado ao longo de todos estes anos.

À minha mãe, ao meu pai e à minha irmã, pelo apoio emocional e encorajamento dado ao longo de todo o meu percurso académico, por me ajudarem a crescer e a ser a pessoa que sou hoje, muito obrigada.

Resumo

O tijolo cerâmico é um material de construção utilizado desde as mais antigas civilizações, encontrando-se presente, até aos dias de hoje, em numerosos edifícios de elevado valor cultural e arquitetónico. No entanto, a prolongada exposição a agentes ambientais agressivos pode originar várias formas de degradação, pelo que numa tentativa de restituir as propriedades originais do material, tornou-se prática comum o uso de técnicas de conservação com recurso a produtos consolidantes.

A investigação desenvolvida no âmbito da consolidação de materiais cerâmicos é escassa, pelo que se justifica o desenvolvimento da presente dissertação.

A campanha experimental realizada foi composta por uma primeira fase de caracterização da amostra de tijolos cerâmicos existente, seguida da avaliação da potencial nocividade do tratamento consolidante, com recurso a um silicato de etilo. A caracterização dos tijolos cerâmicos demonstrou elevada heterogeneidade e existência de comportamento anisotrópico na amostra analisada. Na avaliação da potencial nocividade do tratamento consolidante foi feita uma análise comparativa entre os resultados obtidos em provetes tratados e não tratados.

As alterações desencadeadas pela aplicação do produto foram responsáveis por variações de cor ($\Delta E^* > 3$) e modificações nas propriedades de transporte de água associadas a alterações no espaço poroso. Em termos de apreciação global da potencial nocividade, verifica-se que o tratamento revelou um grau de incompatibilidade moderado.

Palavras – Chave:

Tijolo cerâmico – Consolidação – Silicato de Etilo – Avaliação da potencial nocividade.

Abstract

Ceramic bricks have been used as a construction material since the most ancient civilizations and are still found, nowadays, in numerous buildings of great cultural and architectural value. However, the prolonged exposure to weathering phenomena leads to various forms of degradation, so that, in an attempt to restore the original properties of the material, the use of conservation technics resorting to consolidant products, became common practice.

The lack of information about consolidation treatments applied on ceramic bricks, justifies the development of the present dissertation.

The experimental work consisted on a previous characterization of the existent ceramic material and, afterwards, the potential harmfulness of the consolidation treatment was assessed resorting to an ethyl silicate. The characterization of the ceramic material revealed the existence of heterogeneity and anisotropic behaviour in the analysed sample. The potential harmfulness assessment of the consolidation treatment was made through a comparative analysis of non-treated and treated specimens.

The treatment promoted colour changes ($\Delta E^* > 3$) and modifications related to water transport properties related to alterations of the porous space. In terms of global potential harmfulness assessment, the treatment revealed a moderate incompatibility degree.

Key – Words:

Ceramic Brick – Consolidation Treatment – Ethyl Silicate – Potential harmfulness assessment.

Índice

Agradecimentos.....	iii
Resumo	v
Abstract.....	vii
Índice	ix
Índice de figuras	xi
Índice de tabelas	xiii
1 - Introdução.....	1
1.1 Enquadramento e justificação do tema	1
1.2 Âmbitos e objetivos	2
1.3 Organização do texto	2
2 - Consolidação de materiais cerâmicos.....	5
2.1 Considerações gerais	5
2.2 Tijolo cerâmico como material de construção poroso	5
2.2.1 Tijolo cerâmico	5
2.2.2 Porosidade e higroscopicidade	6
2.2.3 Transporte de água em materiais porosos.....	8
2.3 Tratamentos consolidantes	13
2.3.1 Introdução.....	13
2.3.2 Produtos consolidantes	13
2.3.3 Ação consolidante	14
2.3.4 Nocividade/Compatibilidade	16
3 - Apresentação e descrição do plano de trabalhos	21
3.1 Considerações iniciais.....	21
3.2 Materiais estudados	21
3.2.1 Tijolo cerâmico	21
3.2.2 Produto consolidante.....	21
3.3 Plano de trabalhos.....	22
3.4 Métodos de ensaio	25
3.4.1 Caracterização física	25
3.4.2 Velocidade de propagação de ultra-sons.....	33
3.4.3 Caracterização colorimétrica	34
4 - Análise e caracterização dos tijolos	37
4.1 Considerações iniciais.....	37
4.2 Caracterização física	37
4.3 Velocidade de propagação de ultra-sons.....	43
5 - Ação do tratamento consolidante.....	45

5.1 Considerações iniciais.....	45
5.2 Tratamento consolidante.....	45
5.3 Avaliação da potencial nocividade.....	53
5.3.1 Resultados obtidos no âmbito do estudo de avaliação da eficácia inicial.....	53
5.3.2 Alterações colorimétricas.....	56
5.3.3 Porosidade acessível à água e teor máximo em água.....	58
5.3.4 Absorção de água por capilaridade.....	59
5.3.5 Características de secagem.....	62
5.3.6 Permeabilidade ao vapor de água.....	64
5.4 Análise de resultados.....	66
6 - Conclusões e propostas para desenvolvimentos futuros.....	73
6.1 Conclusões gerais.....	73
6.2 Proposta para desenvolvimentos futuros.....	75
Referências bibliográficas.....	76
Sites consultados.....	78
Anexos.....	I.1
Anexo I – Análise e caracterização dos tijolos cerâmicos.....	I.1
Porosidade, massas volúmicas, teor em água máximo e após 48h de imersão, e coeficiente de saturação.....	I.1
Coeficiente de capilaridade e valores assintóticos.....	I.2
Velocidade de propagação de ultra-sons.....	I.2
Anexo II – Ação do tratamento consolidante.....	II.1
Registo de massa e de teor em água antes do tratamento.....	II.1
Porosidade e teor em água máximo.....	II.1
Ensaio de absorção de água por capilaridade – Medições de massa e franja líquida.....	II.2
Ensaio de absorção de água por capilaridade - Coeficiente de capilaridade e valores assintóticos.....	II.4
Cinética de secagem – Medição de massa.....	II.5
Cinética de secagem – Teores em água e índice de secagem.....	II.7
Ensaio de permeabilidade ao vapor de água – Medição da massa das células de medição individual.....	II.8
Ensaio de permeabilidade ao vapor de água - Coeficiente de permeabilidade ao vapor de água e espessura da camada de difusão equivalente.....	II.9
Anexo III – Ficha técnica do produto consolidante.....	III.1

Índice de figuras

Figura 2.1 - Porosidade aberta e porosidade fechada (Freitas et al., 2008 retirado de Brito, 2009).....	7
Figura 2.2 - Absorção de água associada ao fenómeno da higroscopicidade (Freitas, 1992).....	8
Figura 2.3 - Pressão capilar dentro de um poro capilar (Gonçalves, 2007).	8
Figura 2.4 - Curva típica de absorção de água por capilaridade.	9
Figura 2.5 - Ensaio de permeabilidade ao vapor de água – representação do método da “caixa húmida”.	11
Figura 2.6 - Fases do processo de secagem (adaptado de Gonçalves, 2007).	12
Figura 2.7 - Curva típica de secagem de materiais porosos (Gonçalves, 2007).	13
Figura 3.1 - Faces exteriores dos tijolos cerâmicos.	21
Figura 3.2 - Silres BS OH 100.	22
Figura 3.3 - Plano de corte e de ensaios para provetes não tratados e tratados.	24
Figura 3.4 - Esquema das direções estudadas no ensaio de absorção de água por capilaridade.	25
Figura 3.5 - Etapas do ensaio de absorção de água por capilaridade em tijolos inteiros.	26
Figura 3.6 - Etapas do ensaio de absorção de água por capilaridade em provetes prismáticos.	26
Figura 3.7 - Etapas do procedimento de determinação de porosidade acessível à água em tijolos inteiros.	28
Figura 3.8 - Etapas do processo de determinação de porosidade acessível à água em provetes prismáticos.	28
Figura 3.9 - Submersão de tijolos inteiros em água por 48h.	29
Figura 3.10 - Etapas do ensaio de secagem.....	30
Figura 3.11 - Etapas do ensaio de permeabilidade ao vapor de água.	32
Figura 3.12 - Ultra-sons segundo direção Longitudinal, T1 e T2.	34
Figura 3.13 - Coordenadas no sistema CIELAB, L*, a* e b* [W2].	34
Figura 3.14 - Caracterização colorimétrica de provetes antes e após tratamento consolidante.	35
Figura 4.1 - Distribuição dos valores de porosidades, determinados em tijolos inteiros.	37
Figura 4.2 - Porosidade vs coeficiente de saturação.	39
Figura 4.3 - Curvas de absorção de água por capilaridade em função da raiz do tempo.	40
Figura 4.4 - Evolução da altura da franja líquida em função da raiz quadrada do tempo.	42
Figura 4.5 a) - Velocidade de propagação de ultra-sons de 5 tijolos de menor porosidade (14,1% a 16,8%).	43
Figura 4.5 b) - Velocidade de propagação de ultra-sons de 3 tijolos de maior porosidade (20,0% a 20,9%).	43
Figura 5.1 - Controlo do teor em água antes do tratamento.	46
Figura 5.2 - Etapas do processo de absorção de humidade (interior da câmara húmida e ambiente de laboratório).	46
Figura 5.3 - Esquema do intervalo de tempo entre etapas de aplicação.....	47
Figura 5.4 - Fases do processo de aplicação do consolidante.	48
Figura 5.5 - a) Medição da franja líquida na "Face rugosa" e b) Medição da franja líquida na "Face de corte".	49

Figura 5.6 - Evolução da altura da franja líquida ao longo do processo de aplicação do consolidante e nos dois dias imediatamente a seguir ao fim do tratamento.....	49
Figura 5.7 - Evolução da franja líquida do provete 13.3, ao longo do processo de aplicação do consolidante.	50
Figura 5.8 - Consumo e quantidade absorvida de produto em cada etapa de aplicação.	51
Figura 5.9 - Variação da massa dos provetes após aplicação do consolidante.	52
Figura 5.10 - Perfis de força de perfuração, para provetes não tratados e tratados (Ribeiro, 2016). ..	55
Figura 5.11 - L^* vs C^*	57
Figura 5.12 - a^* vs b^*	57
Figura 5.13 - Curvas de absorção de água por capilaridade de provetes não tratados e tratados.	60
Figura 5.14 - Ensaio de absorção de água por capilaridade - provetes não tratados e tratados.	60
Figura 5.15 - Evolução da franja capilar dos provetes não tratados e tratados.....	61
Figura 5.16 - Manchas secas na “face de prensagem” dos provetes tratados - ensaio de absorção de água por capilaridade.	62
Figura 5.17 - Curvas de secagem de provetes não tratados.	62
Figura 5.18 - Curvas de secagem de provetes tratados.	63
Figura 5.19 - Corte e numeração das “pastilhas” P1 e P2 utilizadas no ensaio da permeabilidade ao vapor de água.....	64
Figura 5.20 - Coeficiente de permeabilidade ao vapor de água em provetes não tratados e tratados.	65
Figura 5.21 - Provetes antes e após tratamento consolidante – ensaio de caracterização colorimétrica.	70

Índice de tabelas

Tabela 2.1 - Propriedades físicas determinadas em tijolos cerâmicos antigos provenientes de monumentos portugueses contruídos entre os séculos XII e XVIII [(Fernandes et al., 2010) (Fernandes e Lourenço, 2016)].	6
Tabela 2.2 - Propriedades analisadas antes e após tratamento, provenientes de dois estudos de avaliação da ação consolidante em tijolos cerâmicos.	17
Tabela 2.3 - Propriedades analisadas antes e após tratamento, provenientes de dois estudos de avaliação da ação consolidante em azulejos cerâmicos.	18
Tabela 3.1 - Informações relativas ao SILRES BS OH 100, retiradas da ficha técnica do produto (Wacker, 2014).	22
Tabela 3.2 - Pressão de saturação em função da temperatura [W1].	33
Tabela 4.1 - Valores de porosidade, massa volúmica real e aparente e teor em água máximo, obtidos em tijolos inteiros.	37
Tabela 4.2 - Valores de porosidade, teor em água máximo e após 48 de imersão e coeficiente de saturação.	38
Tabela 4.3 - Valores do coeficiente de capilaridade.	40
Tabela 4.4 - Valores assintóticos.	41
Tabela 4.5 - Valores assintóticos em função da altura de absorção.	41
Tabela 4.6 - Coeficiente de capilaridade e valor assintótico, obtidos em tijolos de menor porosidade.	42
Tabela 4.7 - Velocidade de propagação de ultra-sons.	43
Tabela 5.1 - Teor em água dos tijolos que permaneciam em ambiente de laboratório.....	46
Tabela 5.2 - Valores de consumo e de quantidade absorvida de produto.	50
Tabela 5.3 - Valores de velocidade de propagação de ultra-sons - método direto (Ribeiro, 2016).	54
Tabela 5.4 - Valores de velocidade de propagação de ultra-sons - método indireto (Ribeiro, 2016)...	54
Tabela 5.5 - Valores de resistência à flexão e compressão, em provetes não tratados e tratados (Ribeiro, 2016).	55
Tabela 5.6 - Coordenadas colorimétricas e valores de croma – antes e após tratamento.	56
Tabela 5.7 - Diferenças entre coordenadas colorimétricas, diferença de croma e de cor.	57
Tabela 5.8 - Diferenças de coordenadas cromáticas, diferença de croma e de cor, obtidas em estudos de tratamentos à base de silicato de etilo, efetuados sobre material cerâmico.	58
Tabela 5.9 - Porosidade e teor máximo em água - provetes não tratados e tratados.....	59
Tabela 5.10 - Coeficiente de capilaridade e valores assintóticos de provetes não tratados e tratados.	61
Tabela 5.11 - Valores de teor em água inicial e final, teor de humidade crítico e índice de secagem dos provetes não tratados e tratados.....	63
Tabela 5.12 - Coeficiente de permeabilidade (Π) e espessura de camada de ar de difusão equivalente (Sd) de provetes não tratados e valores médios e desvio-padrão de provetes tratados.....	65
Tabela 5.13 - Riscos de incompatibilidade associados a um tratamento consolidante (adaptado de Delgado Rodrigues e Grossi (2007)).....	66
Tabela 5.14 - Valores dos indicadores de compatibilidade obtidos e respetivos riscos de incompatibilidade.....	68

Tabela 5.15 - Valores adicionais de indicadores de compatibilidade obtidos e respectivos riscos de incompatibilidade.....	68
Tabela 5.16 - Proposta de classificação para o indicador de compatibilidade ΔE^*	70

1 - Introdução

1.1 Enquadramento e justificação do tema

A conservação de tijolos cerâmicos antigos é uma problemática de extrema importância no âmbito da conservação do património cultural e arquitetónico de muitos países, onde este material está presente em muitos edifícios históricos.

Em Portugal, existem numerosos edifícios antigos, construídos com tijolo cerâmico, que prevalecem até aos dias de hoje. No entanto, a exposição prolongada dos tijolos cerâmicos a agentes ambientais agressivos, leva ao desenvolvimento de diferentes formas de degradação que podem desencadear progressivas alterações nas propriedades físicas e microestruturais, nomeadamente aumento da porosidade aberta e capacidade de absorção de água, as quais geralmente resultam numa diminuição das propriedades mecânicas (Franzoni *et al.*, 2016).

A degradação dos materiais de construção leva à necessidade de se recorrer a ações de conservação. A substituição dos elementos degradados, por vezes, não é uma solução viável, pelo que se tornou prática comum a aplicação de produtos consolidantes, numa tentativa de restituir as propriedades originais do material, através do incremento de coesão e adesão ao substrato.

A conservação com recurso a tratamentos consolidantes é, no entanto, uma prática interventiva que gera muita controvérsia, uma vez que continua a ser uma ação de conservação bastante arriscada, devido à sua irreversibilidade e propensão para gerar efeitos indesejáveis (Ferreira Pinto e Delgado Rodrigues, 2008).

Nesse sentido, a consolidação de materiais de construção é um problema complexo e delicado, na medida em que é necessário analisar um conjunto muito abrangente de fatores na avaliação do desempenho desta ação conservativa. Os tratamentos consolidantes devem cumprir determinados requisitos a nível de eficácia, potencial nocividade e durabilidade.

A investigação desenvolvida no âmbito da consolidação de materiais cerâmicos é notoriamente mais escassa do que a existente no domínio da pedra natural, pelo que se justifica a necessidade de estudos acrescidos neste campo.

A presente dissertação intitulada “Estudo de tratamentos de consolidação de materiais cerâmicos – Avaliação da potencial nocividade” vem no seguimento de outra dissertação desenvolvida por Ribeiro (2016), que aborda o estudo da eficácia inicial da ação consolidante, intitulada “Estudo de tratamentos de consolidação de materiais cerâmicos – Avaliação da eficácia”. Ambas procuram explorar o tema da consolidação de materiais cerâmicos, recorrendo a tratamentos com silicato de etilo.

1.2 Âmbitos e objetivos

O principal objetivo da presente dissertação é contribuir para o aprofundamento do conhecimento associado à aplicação de produtos consolidantes em materiais cerâmicos. Para tal, este trabalho procura analisar a ação consolidante, resultado da aplicação de um produto à base de silicato de etilo, sobre tijolos cerâmicos.

Antes de se iniciar a análise da ação consolidante, foi feita uma caracterização da amostra de tijolos cerâmicos existente, que incidiu na determinação das suas propriedades físicas e mecânicas. Este estudo de caracterização relativo ao material cerâmico a ser tratado, constitui um dos objetivos adicionais definidos para esta dissertação. A análise das propriedades determinadas é comparada com os resultados obtidos por Fernandes (2006), no seu estudo de caracterização de tijolos antigos provenientes de monumentos portugueses.

O objetivo fundamental desta dissertação prende-se com a avaliação da potencial nocividade associada ao tratamento consolidante aplicado, através da comparação de resultados obtidos em provetes tratados e não tratados. O estudo do potencial nocivo tem como objetivo determinar até que ponto as alterações registadas são aceitáveis, ou se, pelo contrário, se deve limitar ou mesmo impedir a aplicação do produto de consolidante, porque os riscos de induzir características nefastas são elevados (Ferreira Pinto, 2002). A quantificação da variação de propriedades entre provetes tratados e não tratados, é executada com base no sistema de avaliação proposto por Delgado Rodrigues e Grossi (2007). Importa referir que também foram incluídos neste sistema de avaliação, os resultados apresentados por Ribeiro (2016), no âmbito do seu estudo de avaliação da eficácia inicial de um tratamento consolidante em materiais cerâmicos.

1.3 Organização do texto

Este trabalho encontra-se estruturado em seis capítulos. O primeiro refere-se ao enquadramento da dissertação, à apresentação dos objetivos estabelecidos para o desenvolvimento da mesma e à organização do texto.

O segundo capítulo divide-se em dois subcapítulos bastante distintos. O primeiro subcapítulo apresenta uma breve descrição acerca do material cerâmico, referindo-se à influência da porosidade na durabilidade deste tipo de material. Seguidamente são analisados alguns fenómenos de transporte de água associados aos materiais de construção porosos. No segundo subcapítulo são explorados conceitos relevantes, no âmbito do tema da consolidação. Primeiramente é feita referência à importância dos tratamentos consolidantes como ação de conservação do património edificado e em seguida são enumerados os tipos de produtos consolidantes existentes no mercado. A ação consolidante é analisada em maior profundidade neste subcapítulo, uma vez que são expostos os principais requisitos que um consolidante deverá cumprir e também são apresentadas propriedades determinadas antes e após tratamento em estudos semelhantes. Por fim, o conceito de nocividade é explorado com maior detalhe.

No terceiro capítulo é apresentada a amostra de tijolos cerâmicos disponível, bem como o produto consolidante utilizado. Segue-se a descrição do plano de trabalhos experimental desenvolvido na presente dissertação. Por último, são descritos os métodos de ensaio utilizados, tanto para a caracterização dos tijolos cerâmicos como para a avaliação da potencial nocividade do tratamento consolidante.

No quarto capítulo é efetuada a análise e caracterização de um conjunto de tijolos cerâmicos, através dos resultados obtidos nos ensaios descritos no capítulo anterior.

O quinto capítulo é dedicado à caracterização da ação conferida pelo tratamento consolidante. É feita uma descrição detalhada do procedimento utilizado na aplicação do consolidante, com registo dos valores de consumo e quantidade absorvida de produto, e controlo da variação de massa após o tratamento. Em seguida, apresenta-se a avaliação da potencial nocividade do tratamento consolidante, na qual são expostos e discutidos os resultados obtidos em provetes tratados e não tratados, tanto no decorrer da presente dissertação, como no trabalho desenvolvido por Ribeiro (2016). Por fim todos estes resultados são analisados com base no sistema de avaliação proposto por Delgado Rodrigues e Grossi (2007).

O sexto capítulo apresenta as conclusões gerais obtidas com a realização deste trabalho, bem como as propostas para desenvolvimentos futuros.

Este trabalho possui também uma secção de anexos, onde é apresentada a ficha técnica do produto consolidante e algumas tabelas de resultados mais extensas, relativas aos ensaios realizados no âmbito da campanha experimental.

2 - Consolidação de materiais cerâmicos

2.1 Considerações gerais

No presente capítulo é elaborada uma introdução teórica, por forma a facilitar a compreensão dos ensaios desenvolvidos no decorrer da campanha experimental desta dissertação, e do tema da consolidação de materiais cerâmicos.

Primeiramente apresentam-se características gerais, tipicamente associadas a tijolos cerâmicos, e são descritas algumas propriedades determinadas num estudo de caracterização de tijolos cerâmicos antigos. Uma vez que essas propriedades têm influência na capacidade de armazenamento e circulação de água no interior deste tipo de material, são analisados alguns fenómenos de transporte de água associados aos materiais de construção porosos.

Por fim, efetua-se uma síntese de informação sobre o tema da consolidação. São enunciados os principais requisitos que um produto consolidante deverá cumprir e são apresentadas propriedades determinadas em materiais cerâmicos, antes e após tratamento, obtidas em estudos semelhantes. Por último, o conceito de nocividade é explorado em maior profundidade.

2.2 Tijolo cerâmico como material de construção poroso

2.2.1 Tijolo cerâmico

O tijolo cerâmico é um material de construção utilizado desde as mais antigas civilizações. Ao longo de milhares de anos de evolução continuou a ser utilizado, ainda que sofrendo alterações a nível de forma, de manufatura e de tipos de uso.

Em pleno século XXI, são numerosos os edifícios construídos em alvenaria de tijolo que prevalecem, o que comprova a elevada resistência e durabilidade deste material de construção.

O tijolo cerâmico maciço é constituído por argila cozida, matéria prima disponível em abundância na Terra. A sua composição química é caracterizada por uma variedade de óxidos: sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), óxido de ferro (Fe_2O_3) ou magnetite (Fe_3O_4), óxido de potássio (K_2O), dióxido de titânio (TiO_2), assim como óxidos de sódio (Na_2O), de cálcio (CaO) e de magnésio (MgO), sendo que a sílica e a alumina se encontram em proporções preponderantes (Fernandes e Lourenço, 2016).

O processo de fabrico artesanal que caracterizava a produção dos tijolos cerâmicos pré-industriais envolvia temperaturas de cozedura variáveis, o que resultava numa elevada heterogeneidade do produto final (Franzoni *et al.*, 2013). Assim sendo, a composição química de um tijolo pode fornecer informação relativa à temperatura de cozedura e identificar deficiências ocorridas durante a produção (presença de sais, matérias orgânicas e outras impurezas) (Fernandes e Lourenço, 2016).

A composição mineralógica da matéria prima, a temperatura de cozedura e a atmosfera de secagem são fatores que influenciam a porosidade dos tijolos, e que podem afetar negativamente a resistência mecânica do material (Cultrone e Madkour, 2013).

A porosidade, e particularmente, a distribuição e o tamanho dos poros são parâmetros que condicionam a durabilidade dos materiais de construção porosos, especialmente os tijolos. O volume e dimensão dos poros determina a capacidade de armazenamento de água e a facilidade com que esta circula no interior do material, sendo que a deterioração do tijolo é favorecida quando este é exposto a agentes ambientais agressivos, como por exemplo chuva ácida, cristalização de sais e fenómenos de gelo-degelo (Cultrone *et al.*, 2004).

A Tabela 2.1 apresenta um conjunto de características físicas determinadas por Fernandes (2006) no âmbito do seu estudo de caracterização de tijolos cerâmicos antigos, provenientes de seis monumentos portugueses construídos entre os séculos XII e XVIII [(Fernandes *et al.*, 2010) (Fernandes e Lourenço, 2016)].

Tabela 2.1 - Propriedades físicas determinadas em tijolos cerâmicos antigos provenientes de monumentos portugueses contruídos entre os séculos XII e XVIII [(Fernandes et al., 2010) (Fernandes e Lourenço, 2016)].

Propriedades físicas	
Porosidade (%)	12 -43
Teor em água máximo (%)	6 - 32
Massa volúmica aparente (kg/m^3)	1600 - 1800
Coefficiente de capilaridade ($kg/m^2 \cdot s^{0.5}$)	0,09 - 0,32

Os valores apresentados na Tabela 2.1 demonstram elevada variabilidade, apesar de que, no que respeita aos valores de porosidade, a maior incidência de resultados (correspondente a 80% dos valores obtidos) situa-se acima dos 25% de porosidade (Fernandes e Lourenço, 2016). Relativamente ao teor em água máximo, 90% dos resultados situam-se entre a gama dos 10-25% (Fernandes *et al.*, 2010)

2.2.2 Porosidade e higroscopicidade

Todos os materiais de construção como betão, argamassa, pedra natural ou tijolo apresentam, ainda que com diferentes preponderâncias, pequenos vazios na sua estrutura, chamados “poros”. São por isso denominados de “materiais de construção porosos”. A maioria dos poros estão interligados entre si, formando uma rede interna através da qual a água pode circular no estado líquido ou gasoso. O termo “porosidade” expressa a razão entre o volume total de poros interconectados e o volume total do material (Gonçalves, 2007). Quando os poros estão interligados entre si, formando uma rede interconectada, dá-se o nome de porosidade aberta (Figura 2.1 a)). Numa visão simplificada, este tipo de estrutura porosa pode ser descrita como um conjunto de pequenos canais e câmaras, sendo que as câmaras estão localizadas entre os canais e os canais são mais estreitos que as câmaras (Benavente,

2011). Se os poros se apresentarem dispersos e isolados, sem interconetividade entre si, designa-se por porosidade fechada (Figura 2.1 b)).

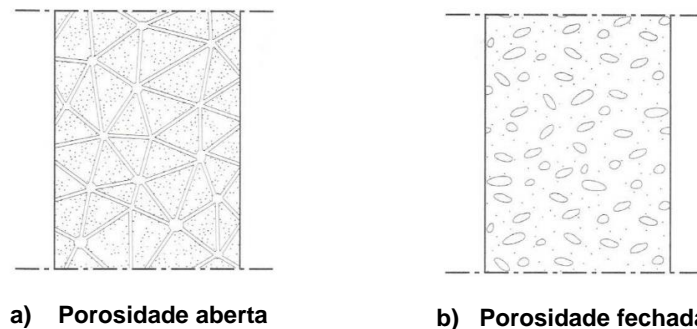


Figura 2.1 - Porosidade aberta e porosidade fechada (Freitas et al., 2008 retirado de Brito, 2009).

Os poros são normalmente classificados em três tipos, de acordo com o seu tamanho e influência no transporte de humidade, nas propriedades do material (Gonçalves, 2007):

- **Microporos** - são os poros de dimensão mais pequena. Não têm influência no transporte de humidade, pois as forças capilares existentes são tão elevadas que, em condições correntes, a água não consegue sair.
- **Mesoporos** - são os poros de tamanho intermédio. São usualmente designados de poros capilares e são responsáveis pelo transporte de água líquida sob a influência de forças capilares. Neste tipo de poros, também poderá ocorrer transporte de vapor.
- **Macroporos** - são os poros de maiores dimensões. São fundamentais para o transporte de vapor de água. Neste tipo de poros as forças de capilaridade são fracas, pelo que a circulação de água líquida não é significativa.

A generalidade dos materiais de construção porosos é higroscópica. A higroscopicidade é uma propriedade do material em absorver vapor de água presente no ar, sendo que o teor de humidade do material varia com a humidade relativa do ambiente circundante. A absorção é o processo em que as moléculas de água se ligam à superfície porosa, através da ação de forças intermoleculares fracas (Van der Waals), que atuam na interface sólido-fluído, no interior dos poros. Este fenómeno, representado na Figura 2.2, ocorre em duas fases distintas: absorção monomolecular, com fixação de apenas uma camada de moléculas de água na superfície interior do poro, seguida da absorção plurimolecular, onde ocorre deposição de várias camadas de moléculas (Freitas, 1992).

A 3ª fase representada no gráfico retrata o progressivo aumento do teor de humidade nos materiais, até que se atinge a condensação capilar. Nesta fase, o transporte de humidade passa a ocorrer por difusão de água, na sua forma líquida.

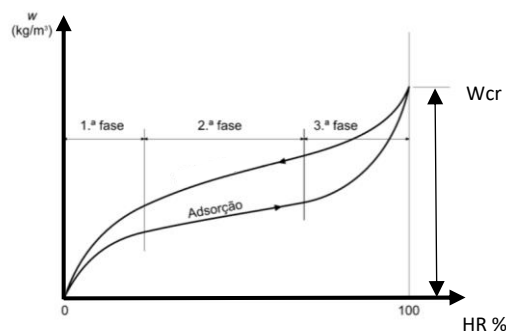


Figura 2.2 - Absorção de água associada ao fenômeno da higroscopicidade (Freitas, 1992).

2.2.3 Transporte de água em materiais porosos

Quando se trata de materiais porosos, alguns dos processos de degradação mais relevantes são em grande parte levados a cabo, não pela presença de água, mas fundamentalmente pela sua saída por evaporação, como é o caso da cristalização de sais como consequência da evaporação de soluções que percolam no seu interior (Ferreira Pinto, 2002). Assim, torna-se fundamental para o estudo do comportamento de materiais porosos, entender o funcionamento de alguns processos de transporte de água, como é o caso da absorção de água por capilaridade, da cinética de secagem e da permeabilidade ao vapor de água.

Transporte de água líquida

No caso dos materiais de construção porosos, o transporte de água líquida ocorre essencialmente por capilaridade.

A capilaridade corresponde à progressão de água líquida através dos poros capilares e ocorre quando as forças de atração entre o líquido e o material sólido são mais fortes que as forças de coesão do líquido (Gonçalves, 2007). Deste modo, a superfície de uma coluna de água no interior de um capilar, designada por menisco, assume uma forma côncava. Essa concavidade, representada na Figura 2.3, apresenta um ângulo de contacto inferior a 90° , o que resulta do facto da água ser um líquido “molhante” (Rato, 2006).

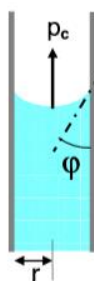


Figura 2.3 - Pressão capilar dentro de um poro capilar (Gonçalves, 2007).

No caso de um tubo capilar vertical, a ascensão da água deve-se à diferença de pressão que é gerada na interface entre as fases líquidas e gasosas, e é designada por pressão capilar, p_c . Existe, portanto, uma força de sucção que provoca a ascensão da coluna de água no interior do capilar, até ocorrer o

equilíbrio. Em cada momento, o peso da coluna de água opõe-se a esta ascensão. O sistema entra em equilíbrio, quando as forças causadoras da ascensão são equilibradas pelo peso da coluna de água (Rato, 2006). A sucção é tanto menor quanto maior for o teor de humidade, anulando-se quando se atinge o teor de humidade máximo (Freitas, 1992).

Considerando um tubo capilar de secção circular, de raio r , angulo de contacto Φ , e tensão superficial σ , a pressão capilar é dada pela expressão:

$$P_c = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \phi}{r} \quad (\text{Eq. 2.1})$$

Os materiais de construção porosos, nomeadamente os tijolos, possuem uma rede multiconectada de poros de elevada complexidade, pelo que não é possível analisar o processo de absorção de água por capilaridade através de equações que traduzam o processo ao nível de cada poro. Desta forma, o comportamento destes materiais, será avaliado a nível macroscópico através de coeficientes globais (Gonçalves, 2007).

Tanto a quantidade total de água absorvida W (Kg/m^2), como a altura de ascensão capilar H_c (m) são diretamente proporcionais à raiz quadrada do tempo decorrido t (s):

$$W(t) = A \cdot \sqrt{t} \quad (\text{Eq. 2.2})$$

$$H_c(t) = B \cdot \sqrt{t} \quad (\text{Eq. 2.3})$$

Ambos os coeficientes A ($\text{Kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2}$) e B ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1/2}$) podem ser determinados com base no ensaio de absorção de água por capilaridade e correspondem, respetivamente, ao coeficiente de capilaridade e ao coeficiente de penetração capilar. O primeiro coeficiente é usado com maior frequência, pelo facto de, por vezes, as medições diretas do coeficiente B serem difíceis e não muito precisas, dado que o limite entre a zona húmida e seca poderá ser de difícil distinção (Gonçalves, 2007).

A Figura 2.4 ilustra a curva típica de absorção de água por capilaridade de um material poroso.

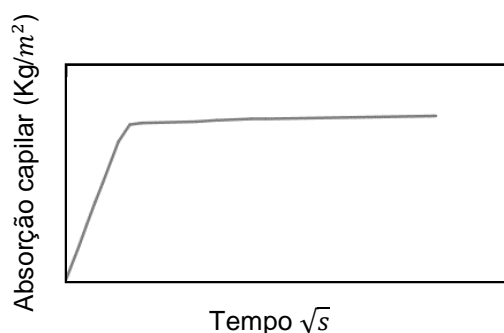


Figura 2.4 - Curva típica de absorção de água por capilaridade.

Como pode ser observado, a curva de absorção de água por capilaridade apresenta uma primeira fase de declive acentuado que resulta numa rápida absorção capilar por parte dos poros com boa interconetividade. Segue-se uma segunda fase de declive quase horizontal que corresponde a uma absorção de água bastante lenta por parte dos poros remanescentes, através de mecanismos de difusão (Gonçalves, 2007).

Transporte de vapor de água

Em condições isotérmicas, o transporte de vapor de água em materiais de construção porosos pode ser descrito como um fenómeno de difusão e traduzido pela lei de Fick (Gonçalves, 2007):

$$\vec{j} = -\overline{D}_v \cdot \overline{\Delta c} \quad (\text{Eq. 2.4})$$

em que \vec{j} representa o fluxo de difusão ($\text{Kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), \overline{D}_v o coeficiente de difusão ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) e c a concentração de vapor de água ($\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}$).

Desta lei decorre que, sempre que um material esteja exposto a uma diferença de humidade relativa entre dois ambientes, isto é, esteja sujeito a um gradiente de pressão de vapor, ocorrerá transporte de vapor de água através desse material, até que se verifique um equilíbrio de concentração de vapor nos dois ambientes. Deste modo, o fluxo gerado ocorre no sentido da maior para a menor pressão de vapor, o que se traduz na transferência de humidade da maior para a menor humidade relativa.

Ao assumirmos que o ar se comporta como um gás ideal ($p_v = \frac{c \cdot R \cdot T}{M}$), o fluxo de difusão pode ser expresso em função da pressão de vapor de água (Gonçalves, 2007):

$$\vec{j} = -\frac{D_v \cdot M}{R \cdot T} \Delta p_v \quad (\text{Eq. 2.5})$$

sendo M a massa molar de água ($\text{Kg} \cdot \text{mol}^{-1}$), R a constante de gás ideal ($\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$), T a temperatura (K) e p_v a pressão de vapor de água (Pa).

Nesta expressão, o quociente $\frac{D_v \cdot M}{R \cdot T}$ ($\text{Kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$) corresponde à permeabilidade ao vapor de água do material (Π). Esta grandeza é característica de cada material e representa a quantidade de vapor de água que atravessa uma espessura unitária de material (m), por unidade de tempo (s), de superfície (m^2) e de diferença de pressão de vapor (Pa) (Gonçalves, 2007). Assim obtém-se:

$$\vec{j} = -\Pi \cdot \overline{\Delta p_v} \quad (\text{Eq. 2.6})$$

A permeabilidade ao vapor de água dos materiais de construção é frequentemente avaliada através de um ensaio designado por “caixa seca” ou “caixa húmida”, dependendo do sentido do fluxo de difusão de vapor.

O ensaio consiste na imposição de um gradiente de pressões entre dois ambientes que dá origem a um fluxo estacionário de transporte unidirecional de vapor. Esta diferença de pressões é conseguida através do posicionamento do provete sobre uma cápsula selada que contém, no seu interior, uma substância salina que cria um ambiente com uma determinada humidade relativa. O conjunto cápsula e amostra é então armazenado dentro de uma câmara climática com humidade relativa, diferente da anterior.

O objetivo deste ensaio é determinar o ganho ou perda de massa, dependendo do sentido do fluxo. O sentido do fluxo de difusão de vapor depende da concentração salina que se utiliza, uma vez que diferentes soluções dão origem a diferentes valores de humidade relativa. Se a humidade relativa dentro da cápsula for inferior à existente no exterior, o fluxo estabelecer-se-á no sentido de fora para dentro, pelo que se designa por método da “caixa seca”. Contrariamente, se a humidade relativa dentro da cápsula for superior à existente no exterior, o fluxo será orientado de dentro para fora da cápsula, pelo que se designa por método da “caixa húmida” (Figura 2.5).

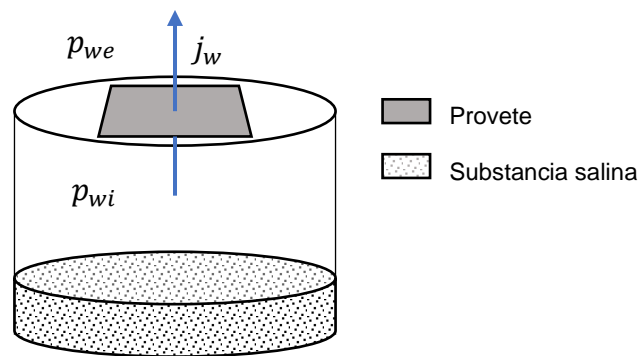


Figura 2.5 - Ensaio de permeabilidade ao vapor de água – representação do método da “caixa húmida”.

O conjunto cápsula e amostra é pesado regularmente, de modo a avaliar o ganho de massa (método da “cápsula seca”) ou perda (método da “cápsula húmida”), ao longo do tempo de ensaio. Quando se atingem condições estáveis, este ganho ou perda de massa, que corresponde à quantidade de vapor de água transportada através da amostra, é constante no tempo.

Estes métodos de ensaio baseiam-se na Eq. 2.7, que deriva da lei de Fick, e expressa a difusão de fluxo unidirecional (j) que atravessa um material poroso quando uma diferença de pressão de vapor ($p_{wi} - p_{we}$) entre dois ambientes é mantida, assumindo que varia linearmente através da amostra de espessura (e) (Gonçalves, 2007):

$$j = \Pi \cdot \frac{(p_{wi} - p_{we})}{e} \quad (\text{Eq. 2.7})$$

As grandezas resultantes do ensaio enunciado anteriormente, que foram estudadas no presente trabalho, são o coeficiente de permeabilidade ao vapor e a espessura de ar de difusão equivalente, sendo o seu cálculo explicado na secção 3.4.1 - “permeabilidade ao vapor de água”.

Secagem

Segundo Gonçalves (2007), macroscopicamente a secagem de materiais porosos pode ser descrita como um processo de três fases (Gonçalves, 2007):

Fase I - O material encontra-se saturado, existindo continuidade da fase líquida. Essa água líquida é transportada, por capilaridade, para a superfície do material, devido a um acentuado gradiente de pressão capilar nos poros. A evaporação ocorre à superfície e o teor de humidade do material decresce

a taxa constante. Considera-se que esta fase é apenas influenciada por condições externas, como a humidade relativa, a temperatura e a velocidade do ar.

Fase II - Inicia-se quando a água é incapaz de chegar à superfície, uma vez que o fluxo capilar deixa de ser capaz de transportar água a uma taxa suficientemente alta que compense a evaporação. Atinge-se assim o teor de humidade crítica (W_{cr}) e verifica-se um recuo da frente húmida para dentro do material, o que provoca uma quebra na continuidade líquida nos poros mais próximos da superfície. A frente húmida continua a recuar e verifica-se um aumento do percurso de difusão de vapor ao longo do material. A taxa de secagem do material continua a diminuir ao longo do tempo, com a baixa disponibilidade de líquido na frente húmida.

Fase III – Inicia-se no momento em que a continuidade líquida é quebrada nos capilares, atrás da frente húmida. A partir daí, a difusão de vapor de água passa a controlar totalmente o transporte de humidade por todo o material, pelo que a taxa de secagem se torna muito mais baixa. Apesar do material estar tecnicamente seco, certas partículas de água persistem nos poros mais pequenos, pelo que a taxa de secagem continuará a diminuir lentamente, enquanto o material se aproxima do equilíbrio higroscópico.

A Figura 2.6 retrata as três fases do processo de secagem, descritas anteriormente.

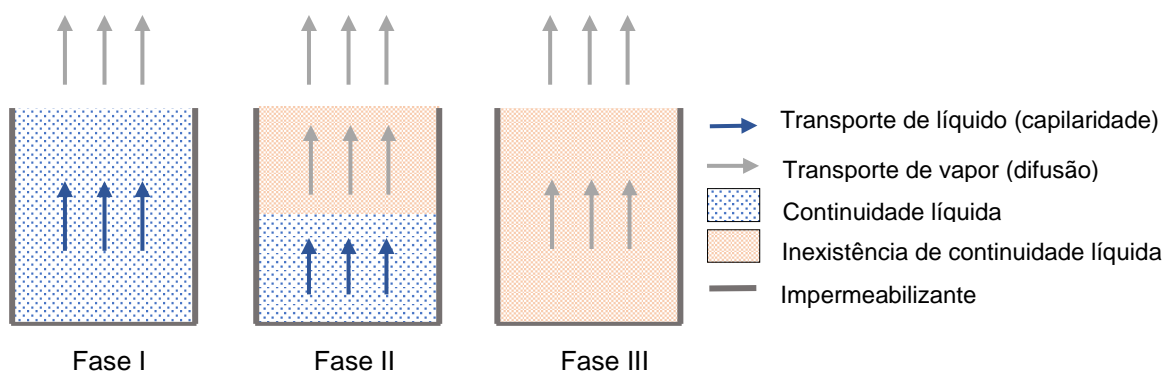


Figura 2.6 - Fases do processo de secagem (adaptado de Gonçalves, 2007).

A Figura 2.7, apresenta a curva de secagem típica de um material poroso, que expressa o teor de água do material, dado em percentagem ponderal da massa seca, em função do tempo. Na referida curva é possível identificar as três fases de secagem. A intersecção entre a Fase I e a Fase II é identificável através do ponto de inflexão, denominado ponto de teor de humidade crítica (W_{cr}), que separa o troço reto (taxa de secagem constante) dos troços “arredondados” (taxa de secagem decrescente). A taxa de secagem corresponde ao declive da curva.

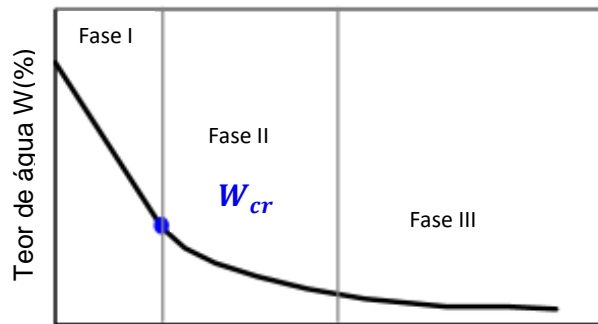


Figura 2.7 - Curva típica de secagem de materiais porosos (Gonçalves, 2007).

2.3 Tratamentos consolidantes

2.3.1 Introdução

A necessidade de retardar o progressivo envelhecimento dos materiais de construção presentes em edifícios e monumentos, retoma à antiguidade, havendo referências de tentativas de solucionar a degradação natural dos materiais, através da aplicação de substâncias animais e vegetais, como cera de abelha, azeites e resinas. A revolução industrial dos finais do século XVIII, originadora de novos agentes agressivos, levou a que se desenvolvesse uma crescente consciência da necessidade de proteger o património edificado de diversas formas de degradação. Assim, a indústria química começou a desenvolver novos produtos para ações de conservação (Luque *et al.*, 2008).

Muitas vezes, a substituição de elementos degradados não é possível ou não é permitida, pelo que recorrer a técnicas de conservação, como por exemplo a consolidação, se revela uma boa opção (Franzoni *et al.*, 2013). Em situações em que a substituição de elementos degradados é recomendada, a consolidação pode também ser justificada de forma a prevenir a total deterioração do elemento degradado, enquanto não é tomada uma decisão relativamente à sua substituição (Delgado Rodrigues, 2001).

Os tratamentos consolidantes promovem a coesão e aderência de materiais degradados, resultando num melhoramento das suas propriedades mecânicas (Franzoni *et al.*, 2013). Este incremento de coesão, é obtido através de modificações na estrutura porosa do material, nomeadamente por redução da porosidade.

2.3.2 Produtos consolidantes

Os produtos consolidantes disponíveis no mercado distinguem-se normalmente em orgânicos (nomeadamente resinas acrílicas e epoxídicas) e inorgânicos, nos quais se inserem os silicatos de etilo. Franzoni *et al.* (2016) referem-se ao facto de diversos estudos terem revelado, em geral, baixa compatibilidade dos consolidantes orgânicos com os substratos inorgânicos e fraca durabilidade. Em contrapartida, os silicatos de etilo têm vindo a apresentar resultados bastante satisfatórios para materiais como arenitos quartzíticos ou tijolos (Franzoni *et al.*, 2016), materiais ricos em Sílica, com os quais foi identificado haver uma boa afinidade química (Cultrone e Madkour, 2013).

A aplicação de um silicato de etilo num substrato poroso gera uma reação química de hidrólise entre o silicato de etilo e a água proveniente da humidade atmosférica, do vapor de água contido no interior dos poros capilares, ou poderá ainda ser adicionada para esse propósito (Constâncio *et al.*, 2010). A reação de hidrólise origina silanol e etanol. Quando o silanol sofre desidratação ocorre a precipitação de gel de sílica amorfa dentro dos poros do material. Nas primeiras horas de aplicação, dá-se um aumento da viscosidade do consolidante, de forma a prevenir a evaporação e percolação do mesmo, para o exterior do substrato. Ao fim de cerca de 1 mês de endurecimento/cura, toda a sílica gel foi formada e depositada. Esta constitui um produto totalmente inorgânico que geralmente revela boa compatibilidade química com o material e garante boa durabilidade, ao contrário do que acontece com muitos consolidantes poliméricos (Franzoni *et al.*, 2013).

2.3.3 Ação consolidante

A ação consolidante depende de diversos fatores, como por exemplo: composição do material, dimensões e tipo de espaço poroso, tipo e propriedades dos produtos consolidantes, procedimentos de aplicação (Delgado Rodrigues, 2010) e das condições ambientais existentes antes, durante e após a aplicação do produto (Ferreira Pinto e Delgado Rodrigues, 2008).

A avaliação do desempenho de um tratamento consolidante é um processo complexo e de difícil definição. Franzoni *et al.* (2016) descreveram os principais requisitos que um consolidante deverá cumprir (eficácia, compatibilidade e durabilidade), no âmbito do seu estudo de consolidação de pedra natural (Franzoni *et al.*, 2016). Ainda assim, estes requisitos consideram-se aplicáveis a qualquer tipo de material de construção poroso passível de ser tratado com produtos consolidantes, como é o caso do tijolo cerâmico, e encontram-se seguidamente descritos.

Eficácia:

O consolidante deverá penetrar em profundidade e homogeneamente no interior do material, conferindo melhorias nas características mecânicas do elemento tratado e aumento da sua resistência a processos de degradação.

Compatibilidade:

O tratamento não deverá causar alterações do aspeto estético visíveis ao olho humano, como escurecimento, mudança de cor ou aparência molhada, nem logo após o período de cura do consolidante, nem a longo prazo.

O consolidante não deverá originar subprodutos nocivos para o material, nem dar aso à evaporação de componente tóxicos, perigosos para a saúde humana.

Em termos de alteração das propriedades físicas do material, é expectável que este sofra redução da porosidade aberta e da capacidade de absorção de água. No entanto, não deverão ser utilizados consolidantes que obstruam poros ou alterem drasticamente as propriedades de transporte de água, no interior do material. Um bom tratamento consolidante será aquele no qual a permeabilidade ao vapor de água é preservada, havendo manutenção da difusão de vapor de água pelo material. Estes

requisitos tornam-se fundamentais na conservação de materiais consolidados, uma vez que a água líquida ou vapor de água, aprisionada atrás da camada tratada, ao ser sujeita a fenômenos de congelamento ou cristalização de sais, dará origem a diversas formas de degradação. Por estes motivos, um outro fator a ter em atenção é a taxa de secagem do material tratado, que deverá ser alterada o mínimo possível.

Por fim, o tratamento consolidante deverá introduzir variações graduais no material à medida que vai penetrando em profundidade, minimizando a ocorrência de fortes interfaces tratado/ não tratado. Deverá dar-se uma transição gradual, sem formação de uma crosta superficial rígida após o tratamento.

Durabilidade:

Ao longo do tempo, a exposição do material tratado a agentes ambientais agressivos, não deverá dar lugar a uma perda de eficácia do consolidante. Por outro lado, o consolidante por si só, não deverá gerar produtos nocivos no decorrer do seu processo de envelhecimento.

Existem muitas publicações que estudam a eficácia e desempenho de tratamentos consolidantes em pedra natural, enquanto que o número de investigações relativas ao uso destes produtos em tijolos cerâmicos é mais escasso. Ainda assim, resumem-se na Tabela 2.2 e Tabela 2.3, propriedades determinadas antes e após tratamento de materiais cerâmicos, resultado da aplicação de produtos consolidantes à base de silicato de etilo e resina acrílica, encontrados em quatro publicações diferentes.

Franzoni *et al.* (2013) estudaram os efeitos da consolidação de provetes cúbicos ($4 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$), extraídos de tijolos cerâmicos, com um silicato de etilo (TEOS) aplicado por dois métodos diferentes: pincelagem e imersão. Todos os tratamentos revelaram uma redução moderada da porosidade, sendo que os tratamentos por imersão apresentaram uma maior diminuição do volume de vazios e do diâmetro dos poros. Os provetes consolidados não apresentaram formação de película rígida à superfície, e de uma forma geral foi obtido um resultado estético satisfatório, sobretudo no caso dos provetes tratados por pincelagem (Franzoni *et al.*, 2013).

Num outro estudo que incidiu também na consolidação de provetes provenientes de tijolos cerâmicos, foram executados ensaios hídricos em provetes cúbicos ($3 \times 3 \times 3 \text{ cm}^3$) e/ou cilíndricos (3 cm de altura por 2,5 de diâmetro) e ensaios de caracterização colorimétrica em provetes tipo “pastilha” ($3 \times 3 \times 0,5 \text{ cm}^3$), entre outros. Foram utilizados dois tipos de consolidantes: Tegovakon V (silicato de etilo) e Paraloid B-72 (resina acrílica), ambos aplicados apenas por capilaridade. Neste estudo o Tegovakon V revelou melhor capacidade de penetração no cerâmico do que o Paraloid B-72. Apesar de ambos os produtos terem gerado alterações do espaço poroso e redução da porosidade, os provetes tratados com Paraloid B-72 revelaram resultados muito semelhantes aos obtidos em provetes não tratados. A nível de aspeto visual, os dois produtos produziram alteração de cor, sendo que esta foi menor no caso do Tegovakon V (Cultrone e Madkour, 2013).

Os azulejos cerâmicos têm também sido alvo de estudo no âmbito da conservação com tratamentos consolidantes.

Constâncio *et al.* (2010) incidiram o seu estudo em azulejos cerâmicos, num processo comparativo entre três produtos de conservação, sendo dois deles consolidantes: TEOS (silicato de etilo) e Paraloid B-72 (resina acrílica). A consolidação foi efetuada recorrendo a três métodos de aplicação: pincelagem, imersão e pulverização. Ambos os consolidantes geraram redução da porosidade, do teor em água máximo e do coeficiente de absorção de água por capilaridade, sendo que esta variação se verificou muito mais evidente, no caso do Paraloid B-72, uma vez que a resina acrílica foi responsável por obstrução dos poros no interior do material (Constâncio *et al.*, 2010).

Num outro estudo, foi analisada a aplicação por pincelagem de dois silicatos de etilo: Tegovakon V e Rhodorsil RC-90, em azulejos cerâmicos de pavimento antigos. Os dois tratamentos deram origem a uma redução percentual da porosidade, diretamente relacionada com a quantidade de produto retida em cada amostra, enquanto que o teor máximo em água não apresentou uma redução tão significativa, com a exceção das amostras tratadas com RC-90 que retiveram maior quantidade de produto. Também se verificou uma redução do coeficiente de capilaridade com a aplicação dos consolidantes, e importa referir que, ao longo do ensaio de absorção de água por capilaridade, a progressão da franja líquida foi muito irregular. Neste estudo foram ainda representadas as curvas de secagem das amostras não tratadas, e tratadas com os dois consolidantes já referidos. Concluiu-se que o Tegovakon V teve muito pouca influência no comportamento de secagem das amostras, enquanto que o RC-90 reduziu significativamente a taxa de secagem das mesmas, para além de que se observaram grandes diferenças no teor de humidade crítico, entre amostras tratadas e não tratadas com o RC-90, o que é indicador de que este consolidante promoveu a retenção de água dentro do azulejo. Ambos os tratamentos originaram alterações de cor perceptíveis ao olho humano (Revez *et al.*, 2008).

2.3.4 Nocividade/Compatibilidade

Uma vez que o presente trabalho incide na avaliação da potencial nocividade de um tratamento consolidante, importa explorar um pouco melhor este conceito, cujo significado coincide substancialmente com o conceito de compatibilidade, já referido anteriormente. Este termo pode ainda ser posto em paralelo com outros conceitos familiares, como intervenção mínima e irreversibilidade, ainda que este último deva ser menos utilizado, dado ser um conceito mal definido (Delgado Rodrigues e Grossi, 2007).

O conceito de reversibilidade prevê que um tratamento possa ser removido posteriormente à sua aplicação, mas tal não é possível no caso de produtos consolidantes. Assim sendo, em vez de reversibilidade, o tratamento consolidante deverá permitir futuras novas aplicações na superfície do material tratado, com o mesmo ou diferente consolidante (Franzoni *et al.*, 2016).

Muitos dos monumentos e edifícios que foram alvo de processos de conservação, sofreram com intervenções erradas, fraca escolha de materiais, práticas interventivas incompatíveis ou políticas de decisão inadequadas, o que conseqüentemente levou a que muitos elementos de elevado valor patrimonial fossem perdidos. Felizmente, a nível das ações de conservação, tem-se vindo a desenvolver uma consciência da necessidade de seguir padrões de elevada qualidade e do importante

papel de atividades de controlo, no sentido de um planeamento mais eficaz (Delgado Rodrigues e Grossi, 2007).

O conceito de nocividade/ compatibilidade é um dos mais complexos no âmbito da conservação, na medida em que este não pode ser definido em termos absolutos. Nunca será possível encontrar soluções “perfeitamente compatíveis” ou com “nocividade nula”, sendo que o objetivo será encontrar aquelas que minimizam o grau de incompatibilidade/ efeitos nocivos (Delgado Rodrigues e Grossi, 2007).

Tabela 2.2 - Propriedades analisadas antes e após tratamento, provenientes de dois estudos de avaliação da ação consolidante em tijolos cerâmicos.

Elemento	Produto consolidante	Método de aplicação	Propriedades	NT	T	Referência	
Tijolo cerâmico	TEOS (silicato de etilo)	Pincelagem	Teor em água máximo (%)	30,4±0,12	23,6±0,39	(Franzoni et al., 2013)	
			Coordenadas Colorimétricas	L*	67,6		63,8
				a*	9		8,5
		Diferença total de cor	ΔE*	4,4			
		Imersão	Teor em água máximo (%)	30,4±0,12	22,7±0,5		
			Coordenadas Colorimétricas	L*	67,6		57,8
a*	9			11,6			
Diferença total de cor	ΔE*	10,2					
Tijolo cerâmico	Paraloid B-72 (resina acrílica)	Capilaridade	Porosidade (%)	27,61	27,09	(Cultrone e Madkour, 2013)	
			Teor em água máximo (%)	14,61	14,41		
			Massa volúmica real (g/cm^3)	2,61	2,58		
			Massa volúmica aparente (g/cm^3)	1,89	1,88		
			Coefficiente de saturação (%)	94,17	89,33		
			Coefficiente de capilaridade	0,201	0,106		
			Índice de secagem	0,76	0,8		
			Coordenadas Colorimétricas	L*	79,04		69,51
				a*	7,18		10,82
	Croma	C*	12,78	17,71			
	Diferença total de cor	ΔE*	10,76				
	Tegovakon V (silicato de etilo)	Capilaridade	Porosidade (%)	27,61	19,98		
			Teor em água máximo (%)	14,61	9,87		
			Massa volúmica real (g/cm^3)	2,61	2,53		
			Massa volúmica aparente (g/cm^3)	1,89	2,03		
			Coefficiente de saturação (%)	94,17	87,09		
			Coefficiente de capilaridade	0,201	0,11		
			Índice de secagem	0,76	0,77		
			Coordenadas Colorimétricas	L*	79,04		73,22
a*				7,18	8,81		
Croma			C*	12,78	14,16		
Diferença total de cor	ΔE*	6,06					

Tabela 2.3 - Propriedades analisadas antes e após tratamento, provenientes de dois estudos de avaliação da ação consolidante em azulejos cerâmicos.

Elemento	Produto consolidante	Método de aplicação	Propriedades	NT	T	Referência
Azulejo cerâmico	Paraloid B-72 (resina acrílica)	Pincelagem	Porosidade (%)	27,7	0,4 - 3,4	(Constâncio <i>et al.</i> , 2010).
			Teor em água máximo (%)	16,5	0,2 - 2,0	
			Coefficiente capilaridade ($g.cm^{-2}.s^{-0.5}$)	$1,7 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-5}$ - $5,0 \times 10^{-5}$	
		Imersão	Porosidade (%)	27,7	0,7 - 0,8	
			Teor em água máximo (%)	16,5	0,4	
			Coefficiente capilaridade ($g.cm^{-2}.s^{-0.5}$)	$1,7 \times 10^{-2}$	$3,0 \times 10^{-5}$	
		Pulverização	Porosidade (%)	27,7	0,7 - 0,8	
			Teor em água máximo (%)	16,5	0,4	
			Coefficiente capilaridade ($g.cm^{-2}.s^{-0.5}$)	$1,7 \times 10^{-2}$	$2,0 \times 10^{-4}$ - $8,0 \times 10^{-4}$	
	TEOS (silicato de etilo)	Pincelagem	Porosidade (%)	27,7	22,6 - 27,6	
			Teor em água máximo (%)	16,5	14,4-16,1	
			Coefficiente capilaridade ($g.cm^{-2}.s^{-0.5}$)	$1,7 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-4}$ - $6,0 \times 10^{-4}$	
		Pulverização	Porosidade (%)	27,7	24,8 - 28,7	
			Teor em água máximo (%)	16,5	14,5 - 17,0	
			Coefficiente capilaridade ($g.cm^{-2}.s^{-0.5}$)	$1,7 \times 10^{-2}$	$2,0 \times 10^{-4}$ - $4,2 \times 10^{-3}$	
Azulejo cerâmico	Tegovakon (silicato de etilo)	Pincelagem	Porosidade (%)	34,5 - 34,7	33,1 - 33,9	(Revez <i>et al.</i> , 2008)
			Teor em água máximo (%)	19,6 - 19,7	18,7 - 19,2	
			Coefficiente capilaridade ($kg.m^{-2}.h^{-0.5}$)	3,19 - 3,55	1,15 - 3,15	
			Variação de coordenadas colorimétricas	ΔL^*	(-0,56) - (-3,01)	
				Δa^*	(-0,46) - (-1,59)	
				Δb^*	(-1,49) - (-5,49)	
		Variação de cromia	ΔC^*	(-1,6) - (-5,7)		
	Variação total de cor	ΔE^*	3,4 - 5,7			
	Rhodorsil RC-90 (silicato de etilo)	Pincelagem	Porosidade (%)	34,5 - 34,7	28,0 - 32,2	
			Teor em água máximo (%)	19,6 - 19,7	15,6 - 18,3	
			Coefficiente capilaridade ($kg.m^{-2}.h^{-0.5}$)	3,19 - 3,55	0,03 - 0,16	
			Variação de coordenadas colorimétricas	ΔL^*	(-5,16) - (-12,02)	
				Δa^*	0,99 - 2,06	
				Δb^*	0,08 - 1,62	
			Variação de cromia	ΔC^*	1,0 - 2,6	
Variação total de cor	ΔE^*	5,8 - 12,1				

A razão pela qual a avaliação da eficácia, compatibilidade e durabilidade é uma tarefa difícil, prende-se com o facto dos parâmetros a serem testados não estarem bem definidos, nem haver critérios de aceitação ou regras explícitas que definam quais os resultados que se consideram bem ou mal sucedidos (Franzoni *et al.*, 2016). Não existe uma doutrina exata para integrar os parâmetros testados, num processo de decisão para avaliação de eficácia e nocividade de elementos tratados.

Assim, as propriedades determinadas no decorrer dos estudos de conservação são muitas vezes avaliadas em termos comparativos e frequentemente podem ser encontradas expressões como: "... mais compatível que...", numa tentativa de encontrar um equilíbrio entre os extremos, completamente compatível e completamente incompatível (Delgado Rodrigues e Grossi, 2007).

No entanto, o estudo desenvolvido por Delgado Rodrigues e Grossi (2007) constitui um importante contributo na avaliação da eficácia e da potencial nocividade de tratamentos consolidantes, na medida em que são definidos critérios concretos para a quantificação de ações de consolidação. Os autores propuseram um sistema de avaliação, que atribui uma escala de classificação de 0 a 10 a um determinado parâmetro (indicador de compatibilidade), de acordo com o seu potencial para gerar efeitos nocivos no elemento tratado. Após a análise individual de cada indicador de compatibilidade é possível integrar esses parâmetros através de uma expressão matemática, no sentido de determinar o grau de incompatibilidade geral da ação de consolidação. A referida metodologia é apresentada com maior detalhe na secção 5.4 – Análise de resultados.

3 - Apresentação e descrição do plano de trabalhos

3.1 Considerações iniciais

O presente trabalho tem como principal objetivo estudar a influência de um tratamento consolidante aplicado a um material cerâmico, pelo que neste capítulo primeiramente são abordados os materiais utilizados: o tijolo cerâmico e o produto consolidante. De seguida é descrito o plano de trabalhos que envolve a caracterização do material disponível para a realização do estudo, a aplicação do produto consolidante e, por último, a caracterização da ação consolidante. No final deste capítulo, são descritos os métodos de ensaio utilizados.

3.2 Materiais estudados

3.2.1 Tijolo cerâmico

Os tijolos cerâmicos utilizados no desenvolvimento do presente estudo apresentam dimensões aproximadas de 4x5x20 [cm]. Estes foram escolhidos a partir de um grande número de tijolos armazenados nas instalações do Laboratório de DECivil do IST, previamente alvo de estudos de caracterização de alvenarias antigas ali realizados.

Uma vez que o conjunto de tijolos disponíveis apresentava variabilidade de características, tanto a nível de dimensões, como devido à presença de defeitos e irregularidades, foi selecionada uma amostra constituída pelos tijolos que se apresentavam mais intactos e geometricamente mais definidos. Ainda assim, a amostra recolhida continuou a possuir alguma variabilidade em termos dimensionais e verificou-se também a presença de resíduos de argamassa na maioria dos tijolos.

Em todos os tijolos foi possível identificar uma face mais lisa e plana (Figura 3.1), que se distingue das restantes, mais rugosas e irregulares. Esta face, com menos textura, deverá ter sido a face submetida à prensagem, resultante do processo de conformação que deu forma aos tijolos.



Figura 3.1 - Faces exteriores dos tijolos cerâmicos.

3.2.2 Produto consolidante

No presente trabalho foi utilizado apenas um tipo de produto consolidante. Das várias hipóteses de produtos comerciais, optou-se por um silicato de etilo da Wacker - Silres BS OH 100 (Figura 3.2). A ficha técnica deste produto é apresentada no anexo III.

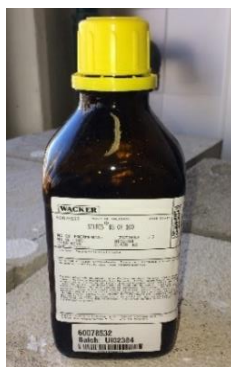


Figura 3.2 - Silres BS OH 100.

O silicato de etilo utilizado é constituído por tetraetilenosilicato que funciona como agente consolidante. A Tabela 3.1 apresenta as informações relativas ao produto, referidas pelo fabricante (Wacker, 2014).

Tabela 3.1 - Informações relativas ao SILRES BS OH 100, retiradas da ficha técnica do produto (Wacker, 2014).

Características gerais	<ul style="list-style-type: none"> • Produto sem solvente e pronto a utilizar; • Não contém aditivos hidrofóbicos como silanos ou siloxanos; • Baixo peso molecular e conseqüentemente ótima penetração; • Ausência de subprodutos que levem à degradação do material de construção; • O ligante formado é mineral, assemelhando-se ao material de construção e resiste ao ataque de ácidos; • Os poros do material de construção tratado não são obstruídos, pelo que este mantém a sua permeabilidade ao vapor de água;
Substratos	Pedra natural, estuque, frescos, tijolo cerâmico e terracota.
Condições do substrato	<ul style="list-style-type: none"> • O substrato deve ser limpo; • É necessário que o substrato seque ao ar, de forma a se encontrar absorvente, e que não apanhe chuva nos 2 a 3 dias seguintes; • Previamente ao tratamento, o substrato deverá ser protegido contra a incidência direta do sol;
Métodos de aplicação	Pulverização, pincelagem ou imersão.
Condições de aplicação	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura ótima de aplicação: 10-20°C • Humidade relativa: > 40%
Propriedades físicas do produto	<ul style="list-style-type: none"> • Cor: incolor/ amarelado; • Teor em silicato de etilo: aprox. 100% • Densidade a 25°C: aprox. 0,997 g/cm³

3.3 Plano de trabalhos

Dada a falta de informação relativa às características específicas do tijolo maciço português utilizado ao longo de todo o presente trabalho, houve necessidade de proceder à sua caracterização através de ensaios laboratoriais.

Foi efetuada uma caracterização física dos tijolos inteiros, de dimensões aproximadas 4x5x20 [cm], que incluiu a determinação da absorção de água por capilaridade, da porosidade acessível à água e do teor em água após 48 horas de imersão. Além dos ensaios referidos procedeu-se também à determinação da velocidade de propagação de ultra-sons dos tijolos inteiros.

O ensaio de porosidade acessível à água foi executado em maior número de tijolos inteiros, do que os restantes ensaios, na medida em que os valores de porosidade foram utilizados como critério de seleção, de modo a limitar a heterogeneidade da amostra de tijolos a ser utilizada nos ensaios, associados à avaliação da potencial nocividade do tratamento consolidante. Nesse sentido, foi necessário determinar a porosidade de 53 tijolos inteiros, para que se conseguisse obter um número suficiente de tijolos com valores de porosidade dentro de um determinado intervalo. Os tijolos selecionados foram utilizados tanto no trabalho laboratorial da presente dissertação, bem como no trabalho experimental de Ribeiro (2016).

Com o intuito da aplicação do tratamento consolidante foram selecionados 6 tijolos inteiros com porosidades compreendidas entre 20,0 e 20,3 % - tijolo 1, 4, 9, 12, 13 e 20.

Numa primeira fase, após aparar as extremidades, cada tijolo inteiro foi cortado em dois provetes de dimensões médias 3,7x3,7x5,0 [cm], que permaneceram não tratados, e um provete de dimensões médias 3,7x7,6x5,0 [cm], onde foi aplicado o consolidante. Esta aplicação foi feita sobre a face do provete designada por “face de tratamento”, representada pela letra “T” na Figura 3.3. A “face de tratamento” corresponde à face que, numa alvenaria de tijolo, estaria visível e exposta às agressões ambientais. Antes e após o tratamento procedeu-se à caracterização colorimétrica do provete de maiores dimensões.

Posteriormente cada provete tratado foi cortado ao meio, resultando em dois provetes de dimensões iguais aos que permanecerem sem tratamento na primeira fase de corte. Nestes provetes de dimensões médias 3,7x3,7x5,0 [cm], tratados e não tratados, foram executados ensaios de determinação da porosidade acessível à água, da absorção de água por capilaridade e de cinética de secagem.

Por último, foram selecionados 6 provetes tratados e 2 provetes não tratados e procedeu-se ao seu corte em “pastilhas”, de dimensões 3,7x3,7 [cm] e espessura compreendida entre 6 e 9 mm. De cada provete foram retiradas duas “pastilhas”, identificadas com as designações P1 e P2. A “pastilha” designada por P1 corresponde à “primeira camada de tratamento” e foi cortada através da marcação da espessura pretendida perpendicularmente à “face de tratamento”. Após o corte da “pastilha” P1, a espessura pretendida voltou a ser marcada, desta vez perpendicularmente à nova face de corte, e obteve-se a segunda “pastilha”, designada por P2. Estas “pastilhas” foram utilizadas no ensaio de permeabilidade ao vapor de água.

A Figura 3.3 apresenta de forma esquemática todas as etapas de corte descritas anteriormente, bem como o plano de ensaios estabelecido e sistema de numeração utilizado, para o exemplo de um tijolo inteiro “x”. De referir que a face inicialmente numerada com as designações “x.1”, “x.2”, “x.3.1” e “x.3.2” corresponde à “face de prensagem”, sendo esta a face mais lisa e com menos textura, resultante do processo de conformação dos tijolos.

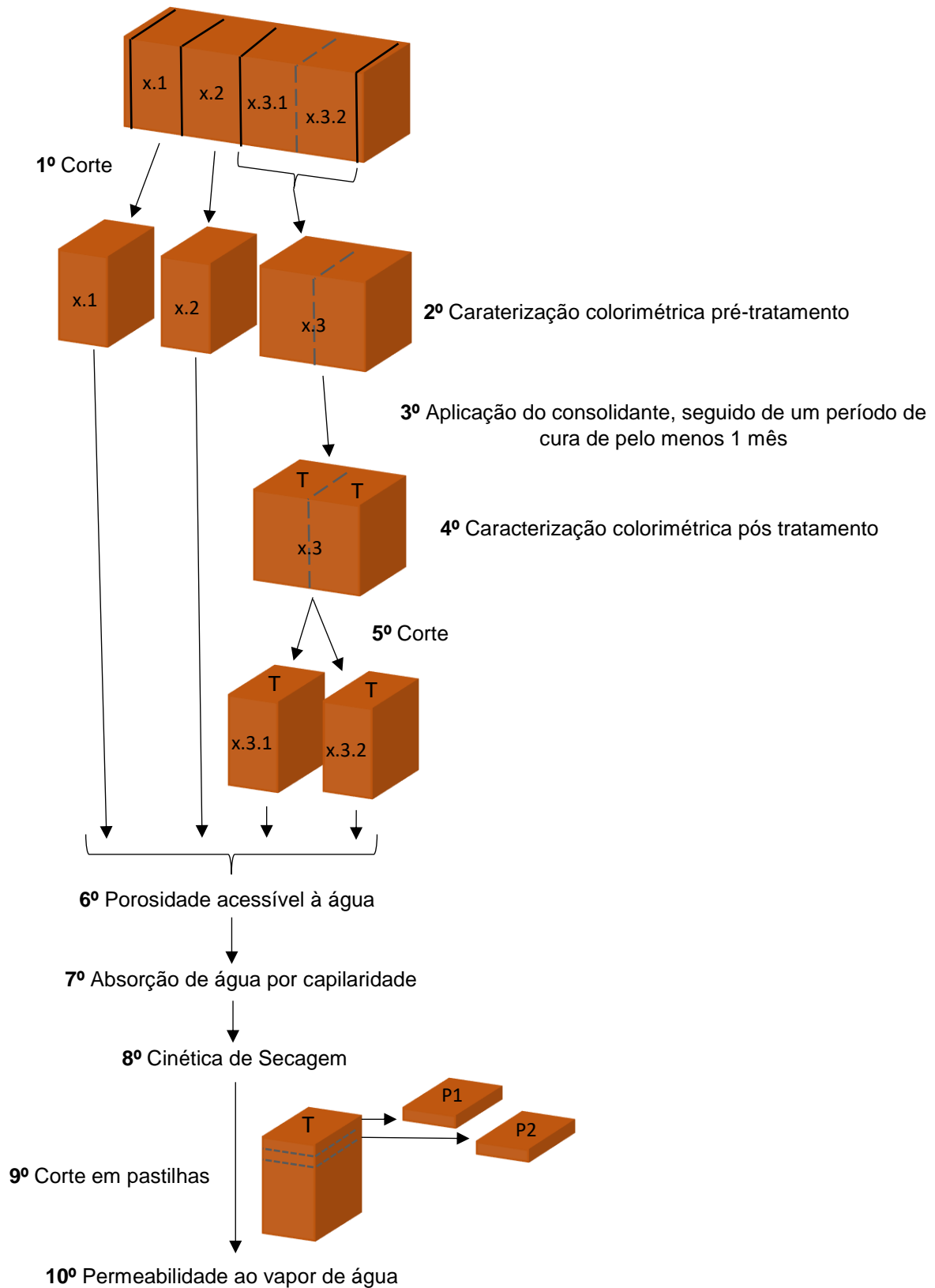


Figura 3.3 - Plano de corte e de ensaios para provetes não tratados e tratados.

3.4 Métodos de ensaio

Neste capítulo são descritos os ensaios experimentais realizados tanto em tijolos inteiros como em provetes prismáticos, tratados e não tratados, resultantes do corte de tijolos inteiros.

O trabalho experimental foi executado nos Laboratórios do DECivil do IST e os procedimentos de ensaio adotados basearam-se em normas e recomendações existentes para materiais porosos e em procedimentos desenvolvidos em trabalhos de investigação anteriores.

3.4.1 Caracterização física

Ensaio de absorção de água por capilaridade

O procedimento para avaliação da absorção de água por capilaridade baseou-se na recomendação RILEM Test No. II.6.

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi executado em tijolos inteiros segundo três direções de capilaridade (Longitudinal, T1 e T2), representadas na Figura 3.4, e em provetes prismáticos de dimensões médias 3,7x3,7x5,0 [cm], segundo a direção T1. No sentido de uma melhor compreensão do posicionamento dos tijolos relativamente ao sentido de absorção de água por capilaridade, na Figura 3.4 encontra-se identificada a “face de prensagem”, através da letra “P”.

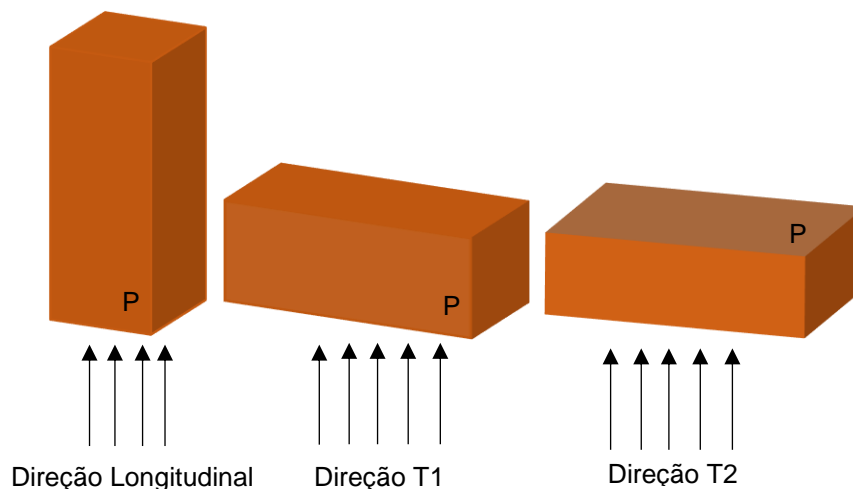


Figura 3.4 - Esquema das direções estudadas no ensaio de absorção de água por capilaridade.

Recorrendo a uma estufa ventilada a $60^{\circ}\pm 5^{\circ}\text{C}$, os provetes foram secos até atingirem massa constante (m_{seca}). Considerou-se a massa como constante, quando a variação de massa dos provetes foi igual ou inferior a 0,1% da massa total, num intervalo de 24 horas.

As amostras foram mantidas num exsiccador com sílica gel, de modo a arrefecerem sem absorverem humidade.

Os provetes foram dispostos em tabuleiros metálicos, sobre malhas de borracha, de modo a não entrarem em contacto direto com o fundo dos tabuleiros. De seguida, com o auxílio de um esguicho foi introduzida água até ao nível pretendido ($2\text{mm}\pm 1\text{mm}$).

Os tabuleiros foram cobertos com caixas de plástico, de modo a evitar a evaporação de água e o nível de água foi mantido constante ao longo do ensaio, adicionando água quando necessário.

Em intervalos de tempo pré-estabelecidos, e após a remoção do excesso de água com o auxílio de um pano húmido, os provetes foram pesados (m_i) e foi registada a altura da franja líquida (h_i). Este processo foi executado de forma célere, de modo a que os provetes fossem rapidamente colocados novamente em contacto com a água.

Os períodos de tempo estabelecidos, referentes ao início do ensaio ($t=0$), foram: 1 min, 3 min, 5 min, 10 min, 15 min, 30 min, 1 h, 2h, 3h, 5h, 7h, 24h e, por fim, de 24 em 24 horas até atingirem massa constante.

A Figura 3.5 apresenta as várias fases do ensaio de absorção de água por capilaridade dos tijolos inteiros e a Figura 3.6 dos provetes prismáticos.



Figura 3.5 - Etapas do ensaio de absorção de água por capilaridade em tijolos inteiros.



Figura 3.6 - Etapas do ensaio de absorção de água por capilaridade em provetes prismáticos.

Com a informação obtida neste ensaio traçaram-se as curvas de absorção de água por unidade de área (M_i), em função da raiz quadrada do tempo. Através da determinação do declive da reta, correspondente ao troço inicial da curva (M_i / \sqrt{t}), obtém-se o coeficiente de capilaridade (CC).

A absorção de água por unidade de área, expressa em Kg/m², é dada pela seguinte expressão:

$$(M_i) = \frac{m_i - m_{seca}}{S} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

sendo S a área da superfície do provete em contacto com a água.

Porosidade acessível à água

O procedimento experimental para determinação da porosidade acessível à água baseou-se na recomendação RILEM Test No. II.1.

Este ensaio foi executado em tijolos inteiros e em provetes prismáticos de dimensões médias 3,7x3,7x5,0 [cm].

Os provetes foram secos, em estufa ventilada a $60^{\circ} \pm 5^{\circ} \text{C}$, até atingirem massa constante (m_{seca}) e arrefecidos no interior de um exsicador com sílica gel.

Posteriormente, os provetes foram colocados dentro de um exsicador interligado a uma bomba de vácuo. Ao ligar a bomba, a pressão foi sendo gradualmente reduzida e foi mantida constante durante as 24 horas seguintes, com o intuito de retirar o ar contido no interior dos poros. Decorridas as primeiras 24 horas, foi introduzida água de forma lenta e gradual, ao longo de um período de cerca de 15 min, de modo a que os provetes ficassem completamente submersos. Os provetes foram deixados submersos e com a bomba de vácuo ligada, por mais 24 horas. Decorrido esse período de tempo, retirou-se a tampa do exsicador e os provetes foram mantidos submersos à pressão atmosférica, durante 24 horas.

Após o término do ensaio, procedeu-se à determinação da massa dos provetes imersos (m_{imersa}), através da pesagem hidrostática dos mesmos. Foi também realizada a medição da massa dos provetes saturados ($m_{saturada}$), depois de retirado o excesso de água com um pano húmido.

A Figura 3.7 ilustra as diversas etapas do ensaio de porosidade acessível à água nos tijolos inteiros e a Figura 3.8 nos provetes prismáticos.



Figura 3.7 - Etapas do procedimento de determinação de porosidade acessível à água em tijolos inteiros.



Figura 3.8 - Etapas do processo de determinação de porosidade acessível à água em provetes prismáticos.

Os dados obtidos, permitem o cálculo do valor da porosidade (P), do teor máximo em água ($W_{máx}$) e das massas volúmicas real e aparente ($M_{vol.real}$ e $M_{vol.aparente}$), obtidos através das seguintes expressões:

$$P = \frac{m_{saturada} - m_{seca}}{m_{saturada} - m_{imersa}} \times 100 \text{ [%]} \quad (\text{Eq. 3.2})$$

$$W_{m\acute{a}x} = \frac{m_{saturada} - m_{seca}}{m_{seca}} \times 100 \text{ [%]} \quad (\text{Eq. 3.3})$$

$$M_{vol.real} = \frac{m_{seca}}{m_{seca} - m_{imersa}} \times 10^3 \text{ [Kg/m}^3\text{]} \quad (\text{Eq. 3.4})$$

$$M_{vol.aparente} = \frac{m_{seca}}{m_{saturada} - m_{imersa}} \times 10^3 \text{ [Kg/m}^3\text{]} \quad (\text{Eq. 3.5})$$

Teor em água após 48 horas de imersão em água

A avaliação do teor em água após 48 horas de imersão consiste na determinação da quantidade de água absorvida pelos tijolos inteiros, após estarem 48 horas imersos em água, à pressão atmosférica.

A realização deste ensaio é precedida da secagem dos tijolos em estufa ventilada a $60^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$, até atingirem massa constante (m_{seca}).

Após arrefecimento no exsiccador, os tijolos foram submersos em água dentro de um recipiente, colocados sobre uma rede ligeiramente inclinada, de forma a não aprisionarem bolhas na superfície inferior (Figura 3.9). Decorridas 48 horas, os tijolos foram retirados da água e após ter sido retirado o excesso de água com um pano húmido, efetuou-se a medição da massa saturada (m_{sat48h}).



Figura 3.9 - Submersão de tijolos inteiros em água por 48h.

O teor em água após 48h de imersão (W_{48h}), foi determinado com recurso à seguinte expressão:

$$W_{48h} = \frac{m_{sat48h} - m_{seca}}{m_{seca}} \times 100 \text{ [%]} \quad (\text{Eq. 3.6})$$

O quociente entre o teor de água presente na estrutura porosa do material, após completa imersão à pressão atmosférica durante um período de 48 horas (W_{48h}), e o teor máximo de água acessível aos poros ($W_{m\acute{a}x}$), designa-se por coeficiente de saturação (CS) e fornece informação relativamente à facilidade de saturação do material por imersão (Ferreira Pinto, 2002).

Este coeficiente de saturação é dado pela seguinte expressão:

$$CS = \frac{W_{48h}}{W_{m\acute{a}x}} \times 100 [\%] \quad (\text{Eq. 3.7})$$

Cinética de secagem

O procedimento experimental adotado para a avaliação da cinética de secagem baseou-se na recomendação RILEM Test No. II.5.

Este ensaio foi realizado em provetes prismáticos tratados e não tratados, de dimensões médias 3,7x3,7x5,0 [cm].

As quatro faces laterais dos provetes foram impermeabilizadas com resina epoxídica SIKADUR 32 N, de modo a que o fluxo se realizasse unidirecionalmente. Foi aplicada uma primeira demão da resina e 24 horas depois foi aplicada uma segunda. Os provetes ficaram a secar ao ar durante 4 dias, de modo a que se procedesse a cura da resina e posteriormente foram secos em estufa ventilada a $60^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$, até atingirem massa constante (m_{seca}). Seguidamente, os provetes foram saturados com recurso a um exsiccador interligado a uma bomba de vácuo e registou-se a massa saturada ($m_{saturada}$).

De seguida, recorrendo a uma película de plástico e a um elástico, procedeu-se ao isolamento de uma das faces não impermeabilizadas (face oposta à “face de tratamento”), em todos os provetes. Esta etapa teve como objetivo garantir que a secagem se realizasse num só sentido.

Por último, registou-se a evolução da massa dos provetes até à sua estabilização, através de pesagens regulares dos provetes (m_i).

A Figura 3.10 ilustra, de forma sequencial, as etapas da realização deste ensaio.

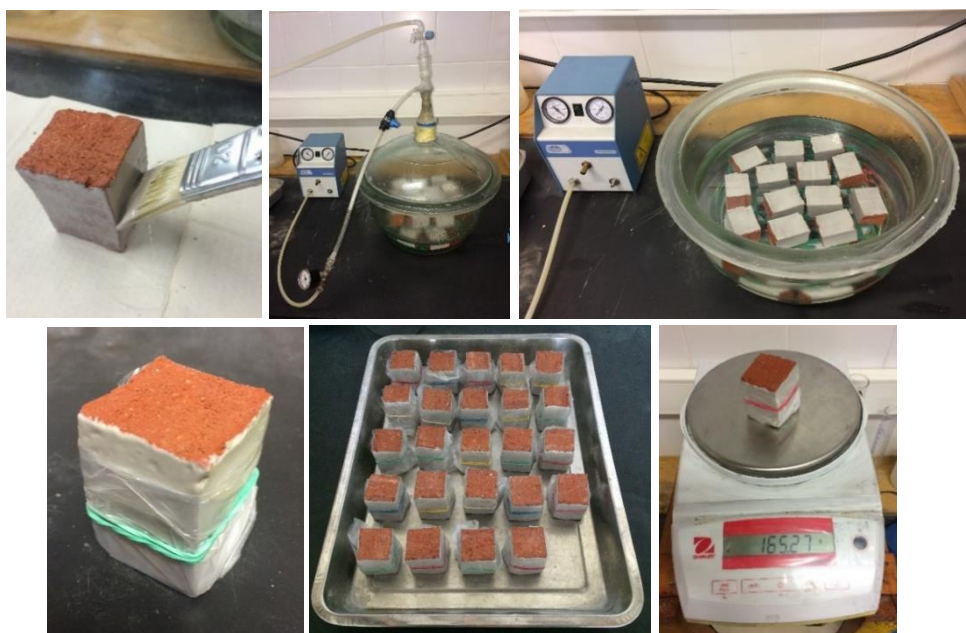


Figura 3.10 - Etapas do ensaio de secagem.

Com base nos valores registados, foi elaborado um gráfico de evolução do teor em água (W_i), expresso em percentagem, em função do tempo (t_i). Através da curva obtida é possível determinar o índice de secagem, sendo este um indicador que avalia a resistência dos provetes à secagem.

O teor em água (W_i) pode ser calculado através da seguinte fórmula:

$$W_i = \frac{m_i - m_{seca}}{m_{seca}} \times 100 [\%] \quad (\text{Eq. 3.8})$$

O índice de secagem (IS) corresponde ao quociente do integral da curva de secagem, pelo produto do teor em água inicial (W_0) com o tempo total de ensaio (t_f), e é dado pela seguinte expressão:

$$IS = \frac{\int_{t_0}^{t_f} f(W_i) \times dt}{W_0 \times t_f} \quad (\text{Eq. 3.9})$$

Permeabilidade ao vapor de água

O procedimento experimental adotado para determinação da permeabilidade ao vapor de água, baseou-se na recomendação RILEM Test No. II.2 e no protocolo adotado por Ferreira Pinto no seu trabalho de investigação (Ferreira Pinto, 2002).

Este ensaio foi realizado em provetes de dimensões médias 3,7x3,7 [cm] e espessuras compreendidas entre 6 e 9 mm, resultantes do corte de provetes prismáticos de dimensões médias 3,7x3,7x5,0 [cm] em “pastilhas”. As faces laterais dos provetes já haviam sido impermeabilizadas antes do corte (para o ensaio de secagem) através da aplicação de resina epoxídica SIKADUR 32 N em duas demãos intervaladas de 24 horas, de modo a garantir um fluxo unidirecional. Os provetes foram secos em estufa ventilada a $60^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$, até atingirem massa constante (m_{seca}).

A permeabilidade ao vapor de água de um material poroso é uma propriedade indicadora da facilidade com que o material se deixa atravessar pelo vapor de água, quando sujeito a um gradiente de pressão entre duas superfícies (Ferreira Pinto, 2002). Para criação deste gradiente de pressão foi utilizado o método da “cápsula seca”, sendo que o sentido do fluxo de difusão de vapor se dá de fora para dentro da cápsula. Os provetes foram fixados com o auxílio de mástique em células de medição individual, contendo no seu interior cloreto de cálcio, por forma a garantir uma humidade relativa de 0%. Estas células foram posicionadas dentro de uma caixa maior que continha uma solução sobressaturada de cloreto de sódio que proporcionou um ambiente de humidade relativa próximo de 75%.

Finda a montagem do ensaio, procedeu-se ao controlo da evolução da massa das células de medição individual ao longo do tempo, através de pesagens diárias e com recurso a uma balança de precisão (0,1mg). Efetuou-se também o registo da temperatura e humidade relativa dentro da caixa maior, que continha a solução salina.

A Figura 3.11 apresenta as principais etapas deste ensaio.



Figura 3.11 - Etapas do ensaio de permeabilidade ao vapor de água.

Com base nos valores de massa registados ao longo do tempo foi elaborado um gráfico de massa, em função do tempo.

O ensaio terminou quando se verificou que os pontos definiam claramente uma reta (regime estacionário), ou seja, quando a quantidade de vapor de água que atravessou o provete em função do tempo se verificou constante. A partir do quociente entre o declive da reta e a área do provete obtém-se o fluxo de vapor de água (q_d), expresso em $[kg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}]$.

Assim, é possível calcular o coeficiente de permeabilidade ao vapor de água (Π), expresso em $[kg \cdot m^{-1} \cdot h^{-1} \cdot Pa^{-1}]$, através da seguinte expressão:

$$\Pi = \frac{q_d \times e}{\Delta p} \quad (\text{Eq. 3.10})$$

em que:

e - espessura do provete [m];

Δp – variação das pressões parciais de vapor de água das atmosferas localizadas em ambos os lados do provete [Pa].

A pressão parcial de vapor de água de uma atmosfera, a uma dada temperatura e humidade relativa, é calculada através da expressão $P_{\text{sat}} \cdot Hr/100$, em que P_{sat} é a pressão de saturação (dependente da

temperatura) e H_r a humidade relativa (Ferreira Pinto, 2002). Desta forma, a variação de pressões de vapor de água pode ser calculada com recurso à seguinte fórmula:

$$\Delta p = P_e - P_i = P_{sat} \times \frac{H_{re}}{100} - P_{sat} \times \frac{H_{ri}}{100} \quad (\text{Eq. 3.11})$$

Onde P_e e P_i são, respetivamente, as pressões existentes no exterior e no interior das células. H_{re} e H_{ri} são, respetivamente, as humidades relativas no exterior e no interior das células e P_{sat} é a pressão de vapor de saturação [Pa], que depende da temperatura (Tabela 3.2).

Tabela 3.2 – Pressão de saturação em função da temperatura [W1].

Temperatura [°C]	Pressão de saturação [Pa]
17	1937,6
18	2063,8
19	2197,2
20	2338,1
21	2486,8
22	2643,7

O ensaio de permeabilidade ao vapor de água permite também determinar a espessura da camada de ar de difusão equivalente (S_d) [m], através da seguinte expressão:

$$S_d = \frac{(1,95 \times 10^{-10} \times 3600) * e}{\Pi} \quad (\text{Eq. 3.12})$$

3.4.2 Velocidade de propagação de ultra-sons

A velocidade de propagação de ultra-sons foi determinada com base nos procedimentos descritos no documento de apoio às aulas de laboratório da cadeira de Materiais de Construção II do IST.

Este ensaio foi realizado em tijolos inteiros, primeiramente secos e posteriormente saturados. Os tijolos secos foram obtidos por secagem em estufa ventilada a $60 \pm 5^\circ\text{C}$, até atingirem massa constante (m_{seca}). Os tijolos saturados, foram saturados por imersão a 48 horas, de acordo com o procedimento descrito na secção “Teor em água após 48 horas de imersão em água”.

O ensaio foi realizado recorrendo ao método direto, posicionando-se os transdutores em faces opostas dos provetes, e para as três direções já referidas no ensaio de absorção de água por capilaridade (Longitudinal, T1 e T2), tal como é possível observar na Figura 3.12.

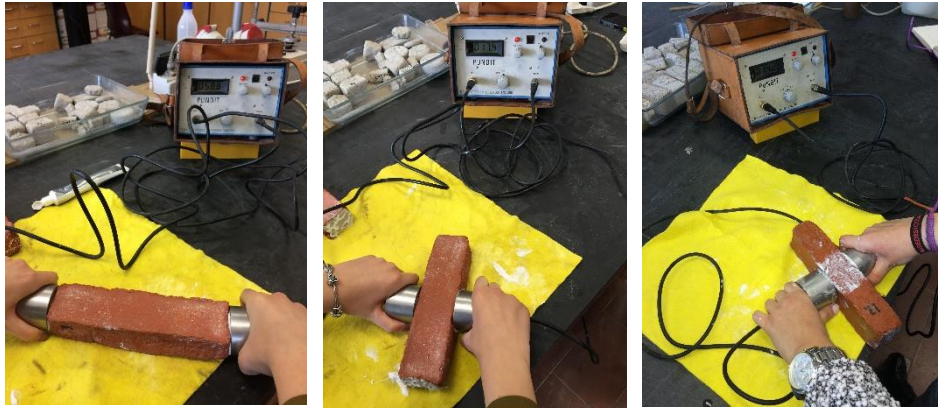


Figura 3.12 - Ultra-sons segundo direção Longitudinal, T1 e T2.

O equipamento de ultra-sons utilizado quantifica o tempo, em μs , que as ondas ultrassónicas demoram a percorrer a distância compreendida entre o transdutor emissor e o recetor. Posteriormente é calculada a velocidade, em m/s, através do quociente entre a distância entre transdutores e o tempo obtido.

3.4.3 Caracterização colorimétrica

Este ensaio baseou-se no procedimento adotado por Ferreira Pinto, no âmbito da sua tese de doutoramento (Ferreira Pinto, 2002).

A caracterização colorimétrica foi efetuada quantitativamente, recorrendo a um espectocolorímetro e avaliada segundo o modelo de representação de cores CIELAB, L^* , a^* e b^* . Este modelo representa a cor num espaço tridimensional, através de um conjunto de coordenadas cromáticas. Segundo o eixo Z é registada a coordenada L^* , que representa a luminosidade (valor 0 = branco; valor 100 = preto). No plano XY representam-se a coordenada a^* , que indica a posição do tom entre vermelho e verde, e a coordenada b^* , que indica a posição do tom entre azul e amarelo, Figura 3.13.

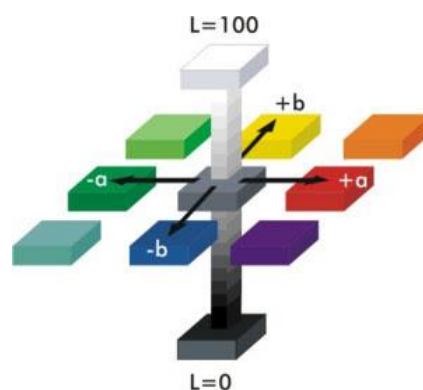


Figura 3.13 - Coordenadas no sistema CIELAB, L^* , a^* e b^* [W2].

O ensaio foi executado em provetes prismáticos de dimensões médias $3,7 \times 3,7 \times 5,0$ [cm], antes e após o tratamento consolidante (Figura 3.14). No sentido de uma melhor quantificação da cor dos provetes foram executadas várias medições, ao longo de toda a superfície de tratamento.



Figura 3.14 - Caracterização colorimétrica de provetes antes e após tratamento consolidante.

Com base nas coordenadas L^* , a^* e b^* foi possível obter os valores de croma, isto é, de saturação de cor, através da seguinte expressão:

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (\text{Eq. 3.13})$$

4 - Análise e caracterização dos tijolos

4.1 Considerações iniciais

Em tijolos inteiros, tal como já foi mencionado, foram realizados ensaios de porosidade acessível à água e massas volúmicas, de teor em água após 48h de imersão, de absorção de água por capilaridade e o ensaio de determinação da velocidade de ultra-sons. No presente capítulo é feita uma caracterização desses mesmos tijolos, baseada nos resultados obtidos através dos referidos ensaios.

4.2 Caracterização física

A Tabela 4.1 apresenta o valor médio e desvio padrão da porosidade, massa volúmica real e aparente e teor em água máximo, determinados em tijolos inteiros. São também apresentados os valores máximos e mínimos dos referidos resultados. Os valores individuais, obtidos para cada tijolo ensaiado, estão disponíveis no Anexo I.

Tabela 4.1 - Valores de porosidade, massa volúmica real e aparente e teor em água máximo, obtidos em tijolos inteiros.

n	Porosidade P[%]			Massa Volúmica						Teor em água máximo		
				Real			Aparente					
	Média	Máx	Min	M _{vol.real} [kg/m ³]			M _{vol.aparente} [kg/m ³]			W _{máx} [%]		
				Média	Máx	Min	Média	Máx	Min	Média	Máx	Min
53	19,1 (±1,8)	21,8	14,1	2585 (±26)	2616	2505	2092 (±28)	2153	2036	9,1 (±1,0)	10,7	6,6

Os valores de porosidade obtidos encontram-se compreendidos entre 14,1% e 21,8%, sendo que a gama de porosidades com o maior número de tijolos corresponde ao intervalo de 19,5% a 20,4%, tal como ilustra a Figura 4.1.

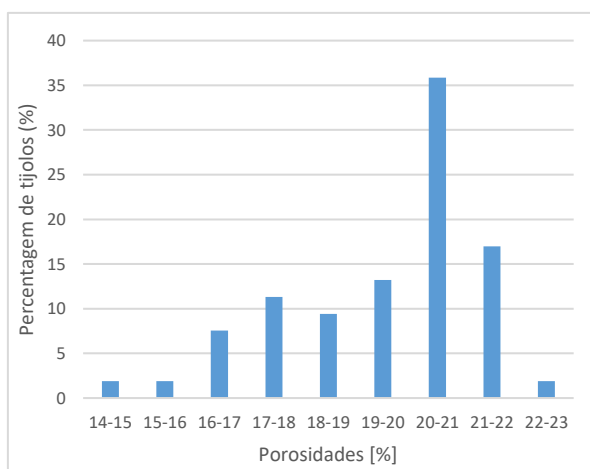


Figura 4.1 – Distribuição dos valores de porosidades, determinados em tijolos inteiros.

Genericamente, os tijolos cerâmicos antigos apresentam sempre valores de porosidade elevada. Fernandes (2006), no âmbito do seu estudo de caracterização de tijolos antigos, provenientes de seis monumentos portugueses, obteve valores de porosidade compreendidos entre 12 e 43%, sendo que 80% dos resultados se situaram acima dos 25% de porosidade (Fernandes e Lourenço, 2016).

Os tijolos antigos analisados por Fernandes (2006), por serem provenientes de monumentos construídos entre os séculos XII e XVIII, já se encontravam bastante degradados devido à exposição prolongada a agentes ambientais agressivos (ex.: chuva, vento, cristalização de sais, gelo-degelo, etc.), resultando na alteração das suas propriedades originais. Os mesmos fenómenos de degradação ocorreram também na amostra de tijolos estudada no presente trabalho, uma vez que estes foram recolhidos numa demolição de um edifício antigo. No entanto, os tijolos analisados nesta dissertação serão de origem mais recente do que os estudados por Fernandes (2006).

Assim sendo, encontra-se justificação para o facto dos valores de porosidade apresentados no presente trabalho se encontrarem todos abaixo da maior incidência de resultados apresentados por Fernandes (2006) (abaixo dos 25% de porosidade). Por outro lado, diferenças na composição mineralógica da argila e no processo de fabrico dos tijolos poderão também justificar esta discrepância nos valores.

Analisando os valores obtidos na amostra de 53 tijolos ensaiados verifica-se uma grande variabilidade de valores de porosidade que resulta da elevada heterogeneidade, tipicamente presente neste tipo de material, consequência da diversidade de matéria prima, da temperatura de cozimento e da atmosfera de secagem (Cultrone e Madkour, 2013).

No presente trabalho, foram encontrados valores de teor máximo em água compreendidos entre 6,6% e 10,7% e valores de massa volúmica aparente compreendidos entre 2036 e 2153 (kg/m^3). Comparativamente com o estudo de caracterização de tijolos antigos provenientes de monumentos portugueses, desenvolvido por Fernandes (2006), foram determinados valores de teor máximo em água compreendidos entre 6% e 32% (Fernandes *et al.*, 2010) e valores de massa volúmica aparente compreendidos entre 1600 e 1800 (kg/m^3) (Fernandes e Lourenço, 2016).

A Tabela 4.2 apresenta o valor médio e desvio padrão do teor em água após 48h de imersão e do coeficiente de saturação, bem como o valor médio e desvio padrão da porosidade e do teor em água máximo. São também apresentados os valores máximos e mínimos dos referidos resultados. Os valores individuais obtidos para cada tijolo ensaiado estão disponíveis no Anexo I.

Tabela 4.2 – Valores de porosidade, teor em água máximo e após 48 de imersão e coeficiente de saturação.

n	Porosidade P[%]			Teor em água						Coef. Saturação CS[%]		
				máximo			às 48 horas					
				$W_{máx}$ [%]			W_{48h} [%]					
Média	Máx	Min	Média	Máx	Min	Média	Máx	Min	Média	Máx	Min	
19	19,5 ($\pm 1,7$)	21,8	15,4	9,4 ($\pm 1,0$)	10,7	7,1	7,5 ($\pm 1,0$)	9,0	5,3	80,2 ($\pm 2,9$)	83,9	72,9

De uma forma geral, os valores do coeficiente de saturação obtidos são elevados, o que é revelador da facilidade de saturação dos tijolos por imersão em água durante 48 horas. Tal deve-se ao facto do tijolo cerâmico possuir uma rede porosa com significativa interconetividade.

A Figura 4.2 apresenta os valores do coeficiente de saturação, em função da porosidade.

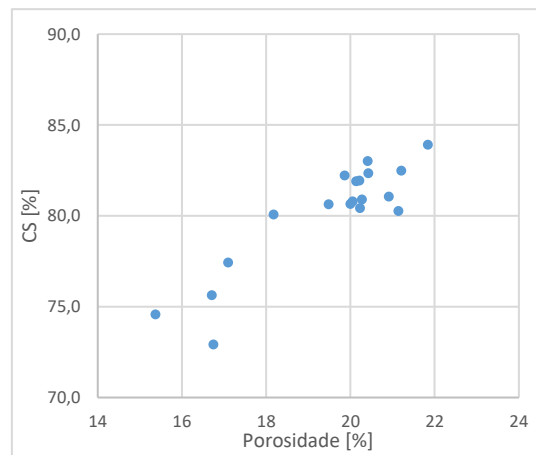


Figura 4.2 – Porosidade vs coeficiente de saturação.

A análise da Figura 4.2 permite verificar, tal como é expectável, que o coeficiente de saturação (CS) é mais reduzido no caso dos tijolos com valor mais baixo de porosidade, o que denota uma maior dificuldade de saturação dos tijolos menos porosos.

Tal como já foi referido, o ensaio de absorção de água por capilaridade, em tijolos inteiros, foi realizado segundo três direcções (Longitudinal, T1 e T2).

A opção de estudar a absorção de água por capilaridade segundo três direcções, prende-se com o facto de poder existir variabilidade de absorção segundo diferentes direcções.

Selecionaram-se 11 tijolos com porosidades compreendidas entre 19,9% e 21,9%, que foram ensaiados segundo as três direcções de capilaridade referidas anteriormente. Para cada uma das direcções, foi também ensaiado um tijolo de porosidade mais baixa (Longitudinal – tijolo 16; T1 – tijolo 21; T2 – tijolo 18).

A Figura 4.3 apresenta as curvas de absorção de água por capilaridade em função da raiz quadrada do tempo, para as direcções Longitudinal, T1 e T2.

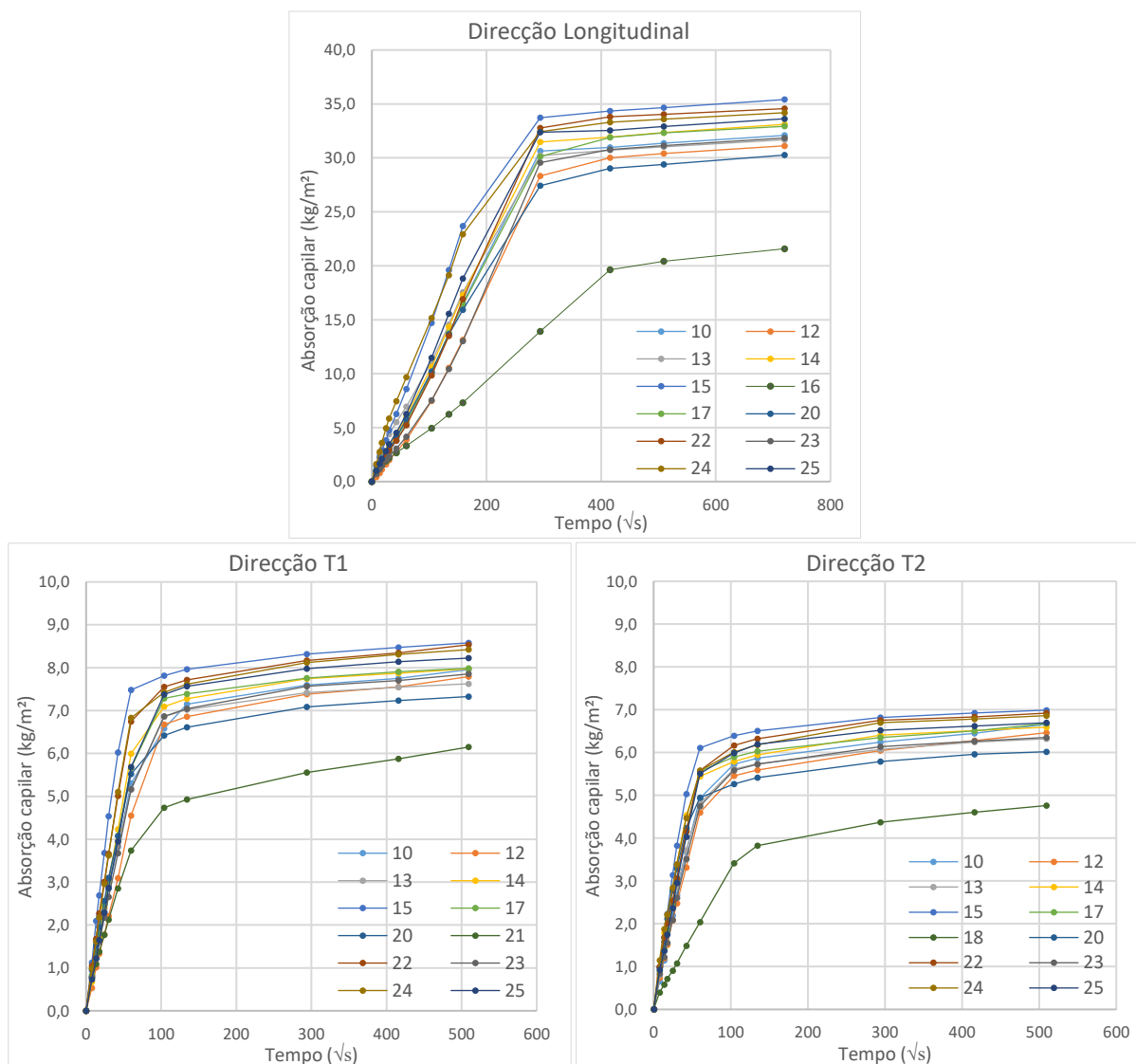


Figura 4.3 - Curvas de absorção de água por capilaridade em função da raiz do tempo.

A Tabela 4.3 e Tabela 4.4 apresentam, respetivamente, o valor médio e desvio padrão dos coeficientes de absorção de água por capilaridade (CC) e dos valores assintóticos (VA), relativos apenas aos 11 tijolos com porosidades compreendidas entre 19,9% e 21,9%. São também apresentados os valores máximos e mínimos dos referidos resultados.

Tabela 4.3 – Valores do coeficiente de capilaridade.

n	CC [$kg/m^2 \cdot s^{0.5}$]								
	Longitudinal			T1			T2		
	Média	Máx	Min	Média	Máx	Min	Média	Máx	Min
11	0,107 ($\pm 0,019$)	0,145	0,079	0,104 ($\pm 0,022$)	0,144	0,075	0,095 ($\pm 0,014$)	0,121	0,075

Tabela 4.4 – Valores assintóticos.

n	VA [kg/m^2]								
	Longitudinal			T1			T2		
	Média	Máx	Min	Média	Máx	Min	Média	Máx	Min
11	32,8 ($\pm 1,5$)	35,4	30,3	8,0 ($\pm 0,4$)	8,6	7,3	6,6 ($\pm 0,3$)	7,0	6,0

Analisando a Tabela 4.3 verifica-se que os valores médios do coeficiente de capilaridade são bastante semelhantes para as três direções de capilaridade avaliadas, o que revela a existência de um comportamento anisotrópico pouco pronunciado. No entanto, o menor coeficiente de capilaridade corresponde à direção T2, sendo essa a direção de absorção perpendicular à “face de prensagem”. Tal, poderá dever-se ao facto da estratificação presente no interior do material se encontrar perpendicularmente à direção do fluxo de água. Esta disposição da estratificação deriva do processo de conformação que deu forma aos tijolos.

Fernandes (2006), no seu estudo de caracterização de tijolos antigos provenientes de monumentos portugueses, reportou valores de coeficiente de capilaridade compreendidos entre 0,09 e 0,32 $kg/m^2 \cdot s^{0.5}$ (Fernandes *et al.*, 2010). Os valores médios obtidos no presente trabalho encontram-se dentro do intervalo de valores apresentado por Fernandes (2006), ainda que os valores mínimos determinados se situem abaixo da gama de resultados obtida pelo autor.

Os valores assintóticos, apresentados na Tabela 4.4 e representados nos gráficos da Figura 4.3, variam consoante a direção de capilaridade estudada. A direção Longitudinal apresenta valores assintóticos superiores, uma vez que tem maior altura de absorção e a direção T2 apresenta os valores assintóticos mais reduzidos, dado que é a direção que tem menor altura de absorção. Como tal, as curvas de absorção de água por capilaridade estabilizam em momentos diferentes, dependendo da direção analisada. Numa outra perspetiva, se os valores assintóticos forem divididos pela respetiva altura de absorção obtêm-se, mais uma vez, valores relativamente semelhantes para as três direções de capilaridade avaliadas (Tabela 4.5).

Tabela 4.5 – Valores assintóticos em função da altura de absorção.

n	Longitudinal	T1	T2
	VA [$kg/m^2 \cdot cm$]	VA [$kg/m^2 \cdot cm$]	VA [$kg/m^2 \cdot cm$]
11	1,65 ($\pm 0,08$)	1,63 ($\pm 0,08$)	1,72 ($\pm 0,06$)

Analisando a Figura 4.3, é possível verificar que os tijolos com porosidades mais baixas (tijolo 16, 18 e 21) apresentaram curvas inferiores às dos restantes, o que se traduz numa menor velocidade de absorção de água por capilaridade. A Tabela 4.6 apresenta os valores do coeficiente de capilaridade e valores assintóticos, determinados para essa amostra.

Tabela 4.6 - Coeficiente de capilaridade e valor assintótico, obtidos em tijolos de menor porosidade.

Tijolo	Porosidade [%]	Direção de capilaridade	CC [$kg/m^2 \cdot s^{0.5}$]	VA [kg/m^2]
16	15,4	Longitudinal	0,045	21,6
21	17,1	T1	0,061	6,1
18	16,7	T2	0,033	4,8

Verifica-se uma tendência para que os tijolos com valores de porosidade mais baixas, apresentem valores de coeficiente de capilaridade e assintóticos mais reduzidos.

A Figura 4.4 apresenta os gráficos de evolução da altura da franja líquida em função da raiz quadrada do tempo, para as direções Longitudinal, T1 e T2.

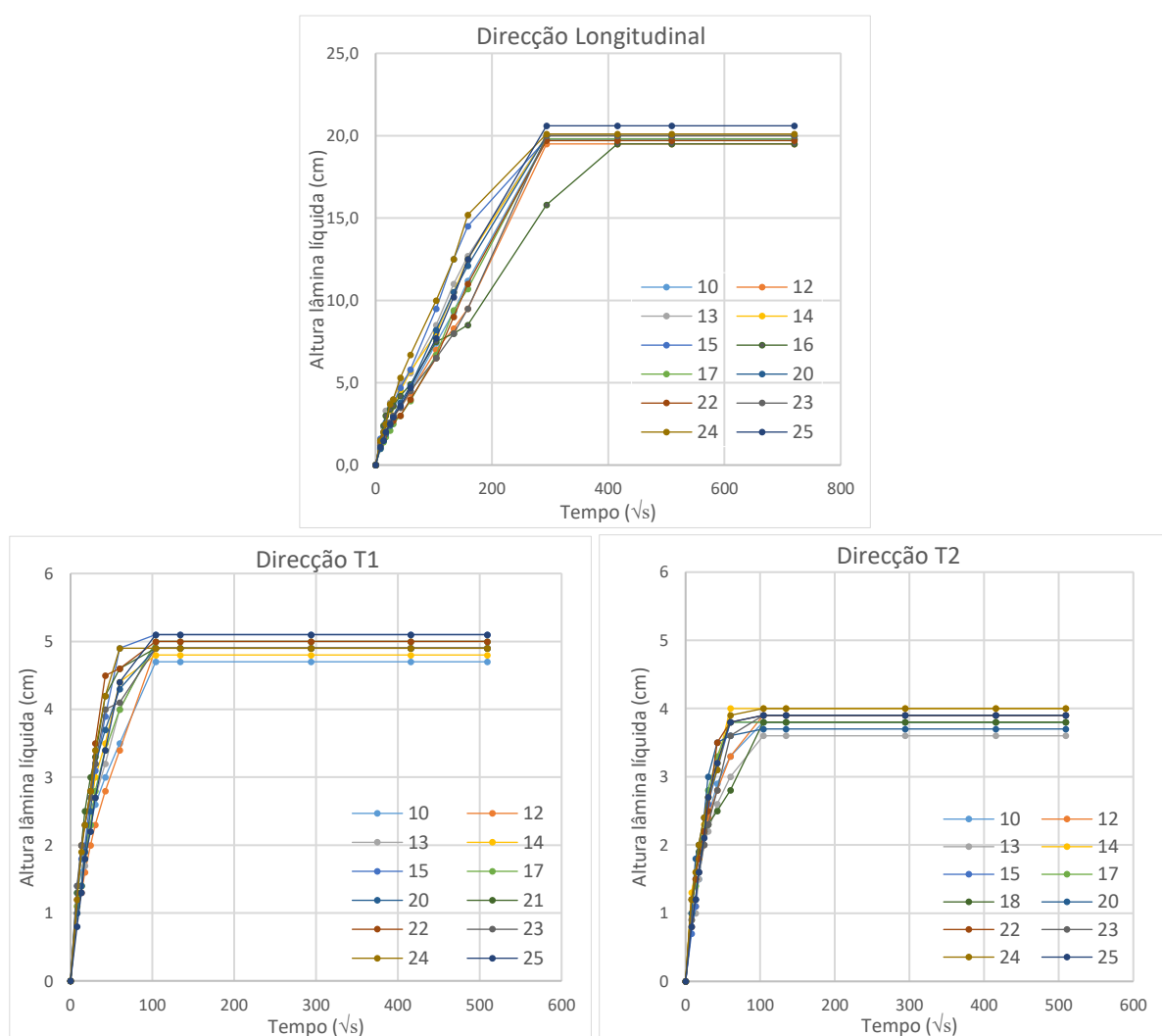


Figura 4.4 - Evolução da altura da franja líquida em função da raiz quadrada do tempo.

No gráfico de evolução da altura da franja líquida da direção Longitudinal destaca-se o tijolo 16, que apresenta uma subida da franja líquida mais lenta do que a dos restantes tijolos ensaiados. Tal deve-se ao facto do tijolo 16 ter reduzida porosidade, o que condiciona a sua capacidade de absorção de

água por capilaridade. O mesmo acontece, ainda que de forma menos evidente, para o tijolo 18 representado no gráfico de evolução da altura da franja líquida da direção T2.

4.3 Velocidade de propagação de ultra-sons

O ensaio de determinação da velocidade de propagação de ultra-sons foi executado em tijolos inteiros secos e saturados, segundo três direções (Longitudinal, T1 e T2).

Para este ensaio foram utilizados 5 tijolos com porosidades compreendidas entre 14,1% e 16,8% e 3 tijolos com porosidades compreendidas entre 20,0% e 20,9%.

A Tabela 4.7 apresenta o valor médio e desvio padrão da velocidade de propagação de ultra-sons determinada para tijolos inteiros, consoante o intervalo de porosidades em que se inserem. Os valores individuais obtidos para cada tijolo ensaiado estão disponíveis no Anexo I.

Tabela 4.7 - Velocidade de propagação de ultra-sons.

n	Porosidade P[%]	Velocidade (m/s)					
		Longitudinal		T1		T2	
		seco	saturado	seco	saturado	seco	saturado
5	15,6 (±0,9)	3475 (±108)	3633 (±88)	3249 (±110)	3449 (±206)	2896 (±296)	3246 (±297)
3	20,4 (±0,4)	3291 (±128)	3403 (±126)	3040 (±78)	3261 (±89)	2631 (±98)	2711 (±80)

A Figura 4.5 a) e a Figura 4.5 b) apresentam, sob outro formato, o valor médio da velocidade de propagação de ultra-sons, obtido em tijolos inteiros secos e saturados, e o respetivo desvio máximo e mínimo.

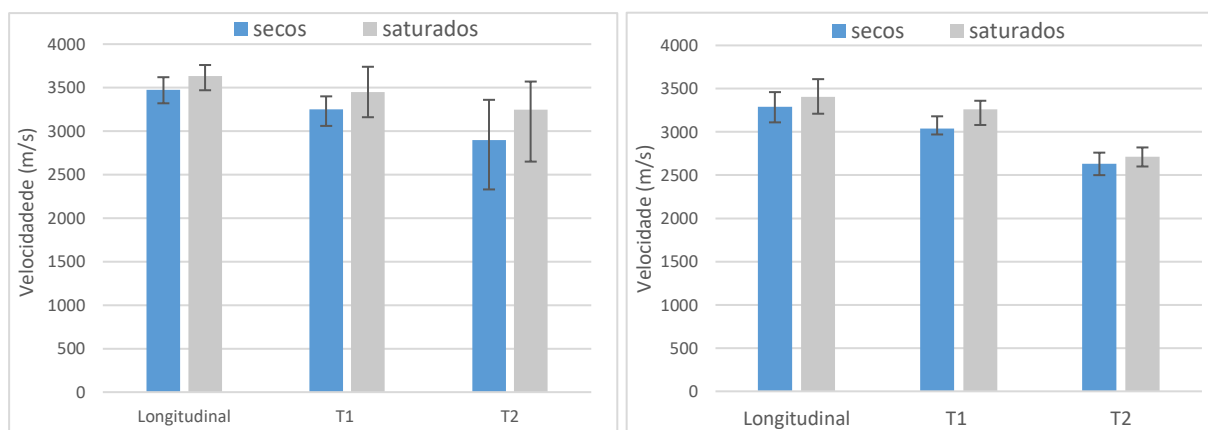


Figura 4.5 a) - Velocidade de propagação de ultra-sons de 5 tijolos de menor porosidade (14,1% a 16,8%).

Figura 4.5 b) - Velocidade de propagação de ultra-sons de 3 tijolos de maior porosidade (20,0% a 20,9%).

Os valores de velocidade mais elevados estão associados à direção Longitudinal. Pelo contrário, os valores mais baixos correspondem à direção T2, sendo que à direção T1 equivalem os valores intermédios. Os valores de velocidades registados são bastante distintos e variam consoante a direção

analisada, pelo que se conclui que os tijolos apresentam um comportamento anisotrópico bastante pronunciado.

A variabilidade das velocidades obtidas entre diferentes direções deve-se ao processo de fabrico, que envolve a prensagem da matéria prima dentro de um molde segundo uma determinada direção, pelo que o espaço poroso do material apresenta uma estratificação perpendicular à direção segundo a qual foi compactado.

Os tijolos saturados revelam maior velocidade de propagação de ultra-sons do que os tijolos secos, o que comprova que os tijolos cerâmicos são constituídos por uma rede porosa aberta e interligada, parcialmente constituída por fissuras. Quando esses espaços vazios se encontram preenchidos com água, os ultra-sons propagam-se mais rapidamente, gerando o aumento da velocidade.

Os valores de velocidade registados para tijolos com menor porosidade são superiores aos valores registados para tijolos com porosidades maiores. Esta análise é válida tanto para tijolos secos, como para tijolos saturados. Tal deve-se ao facto dos tijolos menos porosos apresentarem menor volume de vazios, pelo que os ultra-sons percorrem mais meio sólido e menos meio gasoso/líquido, adquirindo velocidades maiores.

5 - Ação do tratamento consolidante

5.1 Considerações iniciais

No âmbito do presente trabalho, foram utilizados 6 provetes de dimensões médias 3,7x7,6x5,0 [cm] para efeitos de aplicação do consolidante. Posteriormente, estes provetes foram submetidos a diversos ensaios laboratoriais com o intuito da avaliação da potencial nocividade do tratamento.

O mesmo tratamento consolidante foi também executado no âmbito de outra dissertação associada à avaliação da eficácia inicial - “Estudos de tratamentos de consolidação de materiais cerâmicos – Avaliação de eficácia” (Ribeiro, 2016), ainda que em provetes de diferentes dimensões. Ribeiro (2016) realizou a aplicação do consolidante em provetes de dimensões médias 2,5x4x20 [cm], ou seja, em provetes com metade da espessura dos que foram utilizados neste trabalho.

O procedimento de aplicação do tratamento consolidante foi sensivelmente o mesmo para ambas as dissertações, uma vez que o produto aplicado e o método de aplicação são os mesmos e os intervalos estabelecidos entre etapas de aplicação e a duração média de cada etapa foram muito semelhantes.

5.2 Tratamento consolidante

A ação do tratamento consolidante dá-se através de uma reação de hidrólise entre o silicato de etilo e a água, proveniente sobretudo do vapor de água contido no interior dos poros capilares.

Deste modo, a aplicação do consolidante deve ser efetuada em suporte não completamente seco, mas com alguma humidade, resultante duma presença prolongada ao ar em ambiente de laboratório.

Antes da aplicação do produto, os provetes foram previamente secos em estufa ventilada a $60^{\circ}\pm 5^{\circ}\text{C}$ e armazenados num exsiccador com sílica gel, para não absorverem humidade exterior. Devido a limitações temporais, não houve possibilidade de deixar os tijolos a absorver humidade do ar de uma forma natural, pelo que se recorreu ao uso da câmara húmida ($T = 20^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ e $\text{HR} > 95\%$) para acelerar este processo.

Da amostra inicial de 53 tijolos inteiros, submetidos ao ensaio de porosidade acessível à água, muitos não prosseguiram para ensaios associados à avaliação da ação consolidante, pelo que se encontravam há várias semanas em ambiente de laboratório, tendo assim atingido o equilíbrio higroscópico. A partir dessa amostra remanescente, foram selecionados 3 tijolos e foi determinado o seu teor em água, com o intuito de servir de indicador para os provetes onde seria feita a aplicação do consolidante.

Na Tabela 5.1 estão apresentados os valores de teor em água dos 3 tijolos testados, que permaneciam em ambiente de laboratório há várias semanas. Importa referir que os 3 tijolos selecionados apresentam valores de porosidade inferiores à gama de valores registada nos provetes a consolidar, o que poderá traduzir-se em percentagens mais baixas de teor em água, do que o que será expectável nos provetes

sobre os quais será aplicado o tratamento consolidante. Tal deve-se ao facto da amostra sobranter incluir apenas tijolos com porosidades mais baixas, dado que os tijolos com porosidades superiores se encontravam em utilização, tanto para efeitos do presente trabalho, como para o trabalho experimental desenvolvido por Ribeiro (2016).

Tabela 5.1 - Teor em água dos tijolos que permaneciam em ambiente de laboratório.

Tijolo nº	Teor em água (%)
26	0,17
27	0,17
28	0,23

Nos 6 provetes a consolidar foi então adotado o seguinte procedimento: primeiramente os provetes permaneceram em câmara húmida ($T = 20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ e $\text{HR} > 95\%$) durante 17h, no fim das quais foram retirados e envolvidos em película aderente, com o objetivo de evitar secagem superficial e garantir a homogeneização do teor de humidade no interior dos provetes. Após 24 horas envoltos na película aderente, a mesma foi retirada e os provetes foram mantidos ao ar durante 6/7 dias, até ao dia da aplicação do consolidante. A aplicação ocorreu em dois dias consecutivos, sendo que no primeiro e no segundo dia foram tratados, respetivamente, 2 e 4 provetes. Na Figura 5.1, é apresentada a evolução do teor em água dos provetes, desde a secagem até ao dia do tratamento. O registo das medições de massa encontra-se disponível no anexo II.

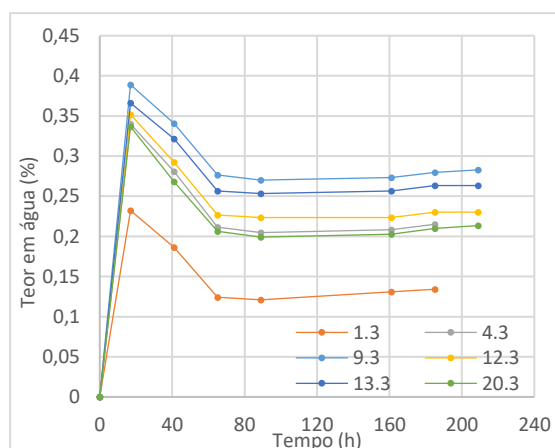


Figura 5.1 - Controlo do teor em água antes do tratamento.

Os valores de teor em água dos provetes a consolidar, após estabilização em ambiente de laboratório, situam-se entre o intervalo de valores de 0,13 – 0,28%.

A Figura 5.2 apresenta algumas fases deste processo.

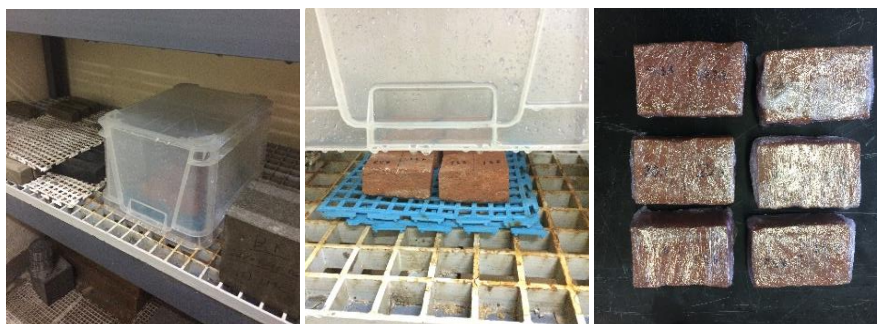


Figura 5.2 - Etapas do processo de absorção de humidade (interior da câmara húmida e ambiente de laboratório).

Os provetes utilizados para aplicação do consolidante têm dimensões médias 3,7x7,6x5,0 [cm] e tal como já foi descrito, foram cortados ao meio depois da aplicação do mesmo. Optou-se por fazer a aplicação do produto em provetes maiores, e só posteriormente proceder ao corte dos mesmos, pois quanto maior for a superfície disponível, mais fácil é a aplicação.

Segundo a ficha técnica do Silres BS OH 100, o produto poderá ser aplicado por pulverização, pincelagem ou imersão, consoante o objeto a ser consolidado. O procedimento de aplicação selecionado foi a aplicação por pincelagem.

A ficha técnica deste produto refere ainda que, de maneira a ser atingida a profundidade de penetração desejada, o material de construção deverá ser tratado “molhado sobre molhado”, até que o mesmo se encontre totalmente saturado, i.e., quando for incapaz de absorver mais produto.

Optou-se por aplicar o consolidante sensivelmente até “meio do provete”. Para atingir essa profundidade de penetração foram feitas efetuadas entre 13 a 16 etapas de aplicação do produto, dependendo do provete. A duração total do tratamento, registada para cada provete, variou entre 4h e 35min e 5h e 50min.

Foi sendo feita uma inspeção visual do progressivo aumento da altura da franja líquida, até esta atingir cerca de metade da espessura do provete. Este limite nem sempre foi de fácil identificação, dadas as frequentes escorrências do produto pelas faces laterais do provete.

Tal como já foi referido, Ribeiro (2016) realizou a aplicação do consolidante em provetes com metade da espessura dos que foram utilizados no presente trabalho. No seu caso, a aplicação por pincelagem foi feita até aparente absorção total do provete, isto é, quando se verificou que o produto cobriu totalmente a face oposta à face de aplicação. Os valores de consumo e a quantidade de matéria absorvida registados por Ribeiro (2016) serviram de critério de paragem auxiliar para a aplicação do consolidante, descrita nesta dissertação.

Por forma a realizar uma descrição mais detalhada do procedimento de aplicação, a Figura 5.3 apresenta, de forma esquemática, os intervalos de tempo entre etapas de aplicação. Entende-se por etapa de aplicação, o conjunto de pincelagens (demãos) de produto consolidante, efetuadas na “face de tratamento”.

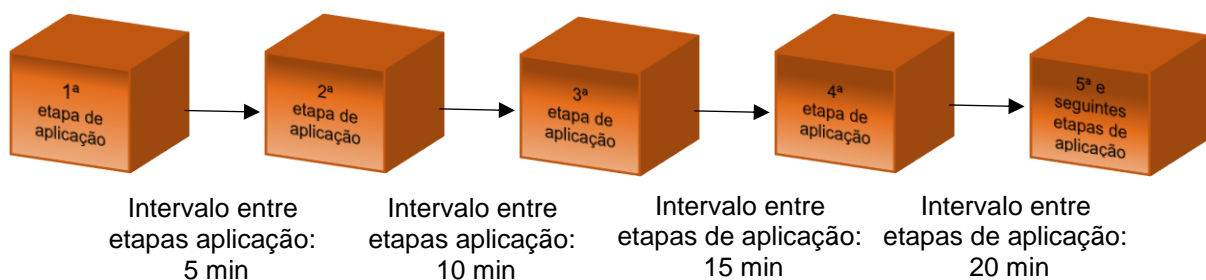


Figura 5.3 - Esquema do intervalo de tempo entre etapas de aplicação.

O objetivo a cada etapa de aplicação foi fazer o maior número de pincelagens que a superfície permitiu, sendo que só se prosseguiu para uma nova pincelagem quando a superfície deixou de ter aparência húmida. A duração média de cada uma das etapas de aplicação foi de 5 min, sendo que nas primeiras etapas foi possível realizar cerca de 6 pincelagens e nas últimas, apenas, cerca de 4 pincelagens. No caso de alguns provetes, na última etapa de aplicação foram feitas apenas duas pincelagens, por forma a tentar atingir a profundidade de penetração pretendida.

Após cada etapa de aplicação, tanto os provetes, como o conjunto copo + produto + pincel foram pesados e posteriormente cobertos com película aderente até à etapa de aplicação seguinte.

Todo o processo de aplicação por pincelagem foi feito com o suporte inclinado, com o objetivo de simular, de certa forma, condições desfavoráveis de aplicação em obra. Após a última etapa de aplicação foi colocada película aderente sobre os provetes, com o intuito de retardar a evaporação imediata do produto e de garantir uma correta absorção do mesmo. A película foi colocada de forma folgada para não impedir a circulação de ar. Os provetes foram mantidos nessas condições por 4 dias, findos os quais, a película foi retirada, tendo os mesmos permanecido ao ar durante o restante período de cura. A Figura 5.4 ilustra as fases do processo de aplicação do consolidante, anteriormente descritas.

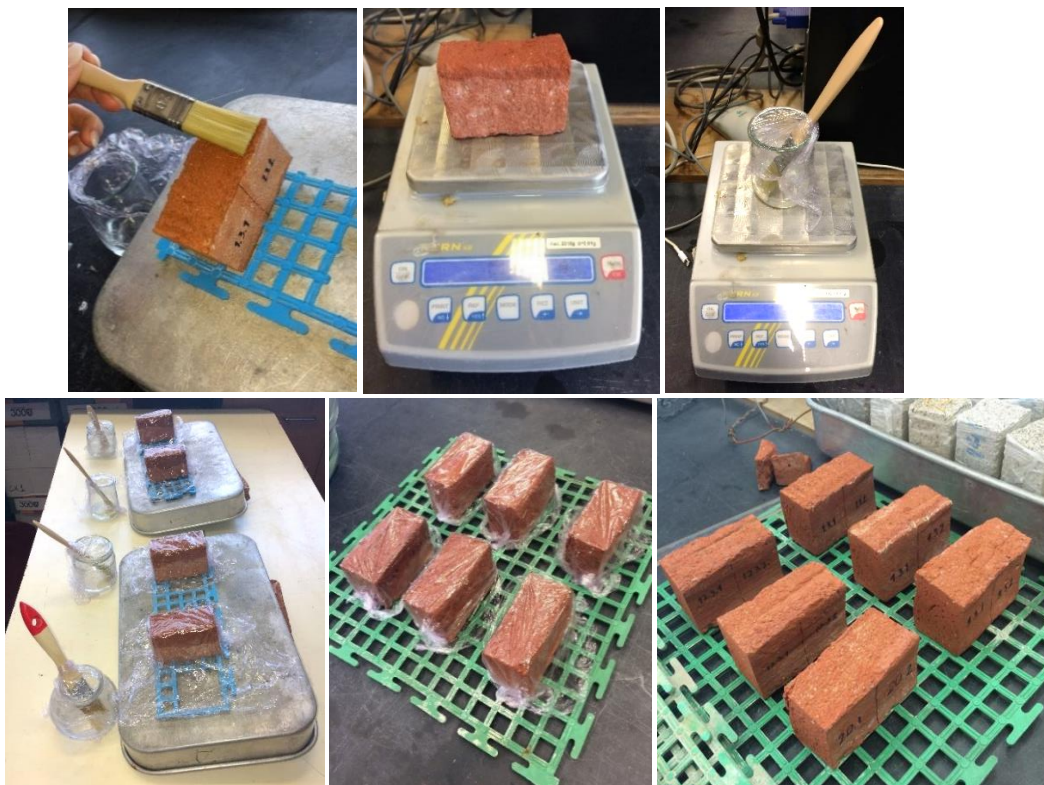


Figura 5.4 - Fases do processo de aplicação do consolidante.

A cada etapa da aplicação do consolidante foi sendo registado o valor da franja líquida, através de múltiplas medições executadas, tanto na “face rugosa”, como na “face de corte” (Figura 5.5). A razão pela qual foram efetuadas várias medições, em diferentes faces do provete, prende-se com o facto de existir uma grande variabilidade de alturas de franja líquida. Os valores registados na “face de corte”

foram sempre bastante inferiores às medições feitas na “face rugosa”, razão pela qual foi difícil de perceber quando é que o consolidante atingiu o “meio do provete”.

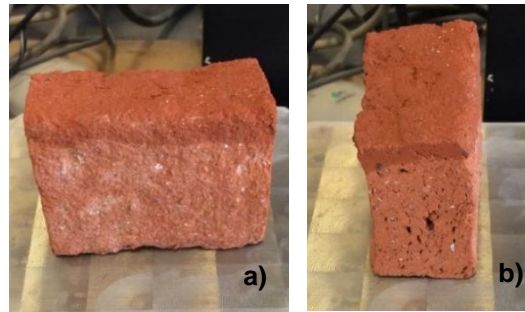


Figura 5.5 - a) Medição da franja líquida na "Face rugosa" e b) Medição da franja líquida na "Face de corte".

Tal como já foi referido, estas medições nem sempre foram facilmente executadas devido a algumas escorrências de produto pelas faces laterais do provete, em particular na “face de prensagem”, por se tratar de uma face mais lisa e plana. Ainda assim, foi possível elaborar um gráfico da evolução da franja líquida em função da raiz quadrada do tempo. A Figura 5.6 traduz essas mesmas medições, tanto ao longo do processo de aplicação, como nos dois dias consecutivos, após se ter terminado o tratamento.

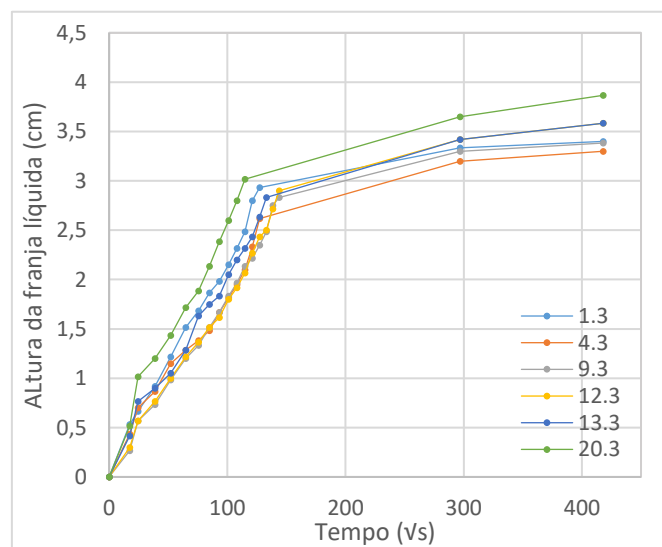


Figura 5.6 - Evolução da altura da franja líquida ao longo do processo de aplicação do consolidante e nos dois dias imediatamente a seguir ao fim do tratamento.

A título de exemplo, a Figura 5.7 retrata a evolução da franja líquida do provete 13.3, do início ao fim do tratamento consolidante, através do registo fotográfico de algumas etapas de aplicação, tanto na “face de prensagem”, como na “face rugosa”.

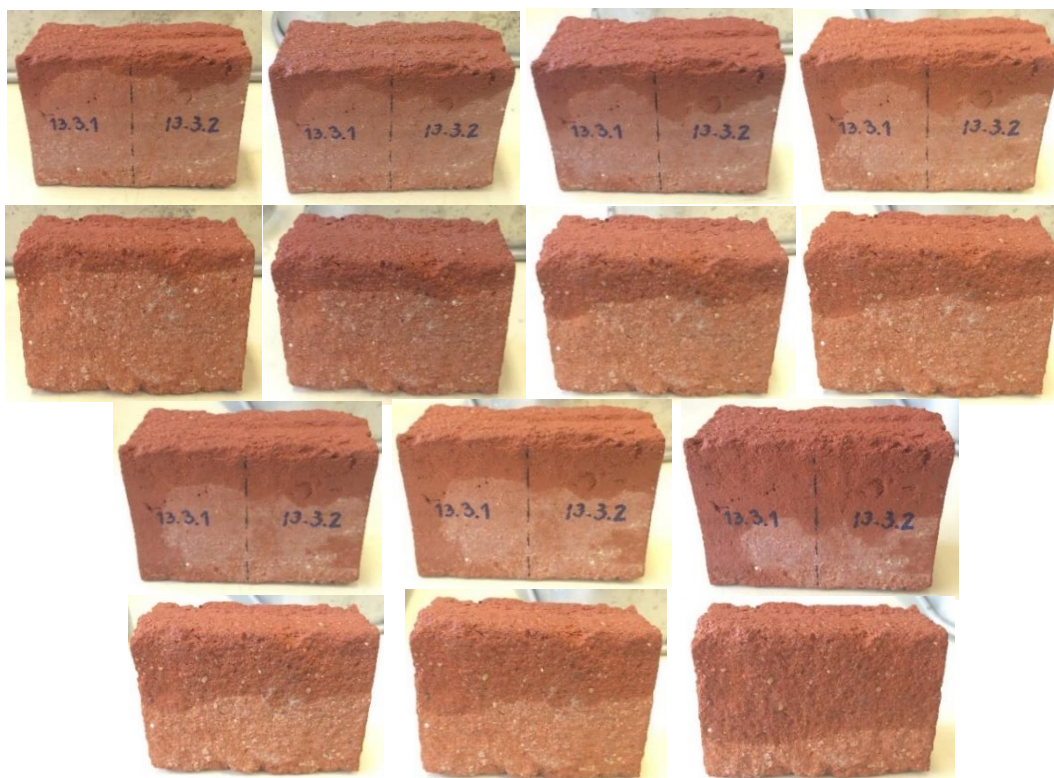


Figura 5.7 - Evolução da franja líquida do provete 13.3, ao longo do processo de aplicação do consolidante.

Como se pode observar, a progressão da franja líquida na “face rugosa” foi maior e mais definida do que na “face de prensagem”.

De um modo mais geral, a caracterização da presença do consolidante pode ser efetuada através da quantificação dos valores finais de consumo e de quantidade absorvida de produto, presentes na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Valores de consumo e de quantidade absorvida de produto.

Provete	Consumo (kg/m ²)	Consumo Valor médio	Quantidade absorvida (kg/m ²)	Quantidade absorvida Valor médio
1.3	4,58	4,82	4,09	4,18
4.3	4,10		3,59	
9.3	5,18		4,37	
12.3	5,36		4,75	
13.3	4,58		4,00	
20.3	4,79		4,25	

As diferenças entre os valores de consumo e de quantidade absorvida de produto são da ordem de 13% de produto.

Com objetivo de avaliar o procedimento por pincelagem de forma mais aprofundada foram analisados os valores de consumo e quantidade absorvida de produto, em cada etapa de aplicação (Figura 5.8).

Uma vez que nem todos os provetes foram sujeitos ao mesmo número de etapas de aplicação (provetes 1.3 e 4.3 – 13 etapas de aplicação; provetes 9.3 e 12.3 – 16 etapas de aplicação; provete 13.3 – 14 etapas de aplicação; provete 20.3 – 11 etapas de aplicação), a análise dos valores de consumo e de quantidade absorvida de produto, em cada etapa de aplicação, foi dividida em 4 grupos de provetes, consoante o número de etapas de aplicação que lhes foram feitas.

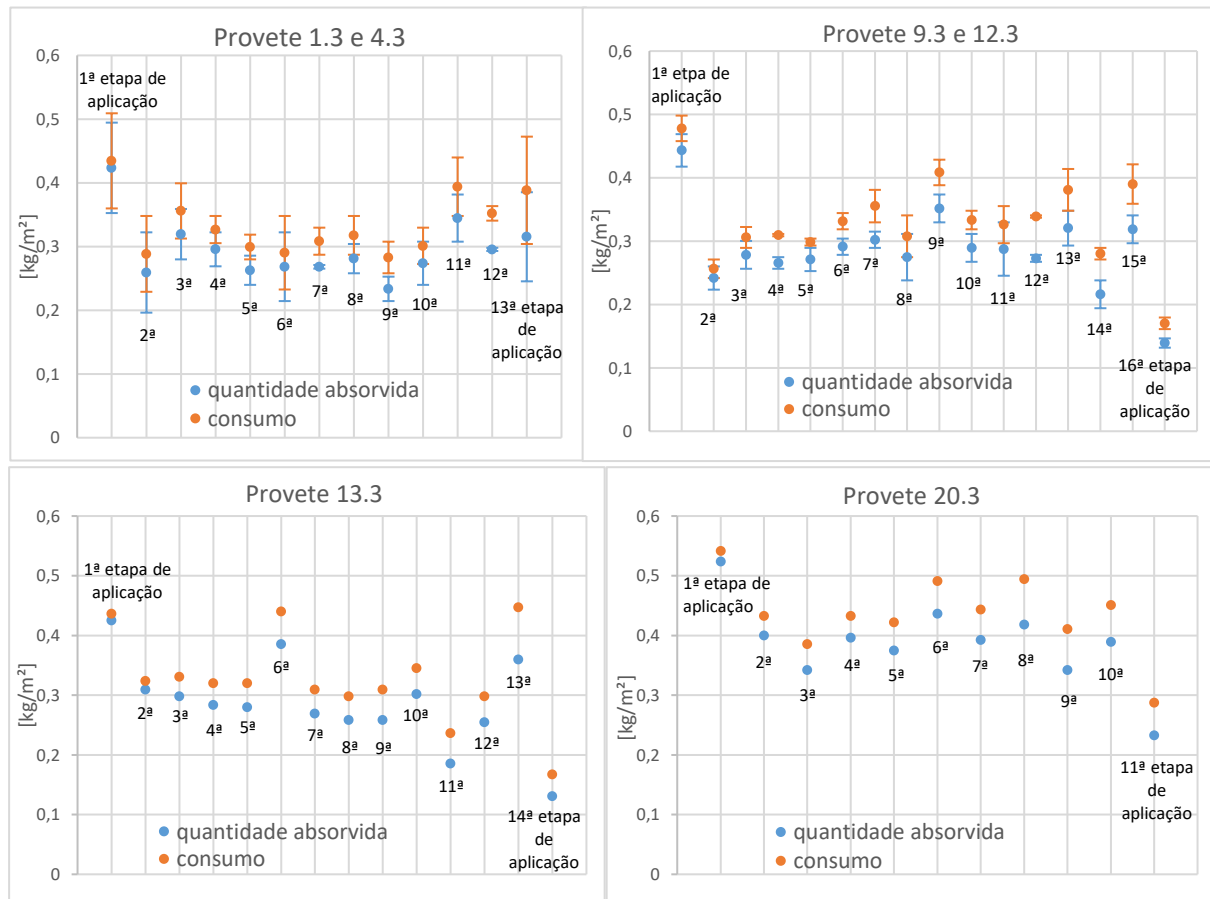


Figura 5.8 - Consumo e quantidade absorvida de produto em cada etapa de aplicação.

Em todos os provetes, a 1^a etapa de aplicação foi a que revelou maior quantidade absorvida de produto, por unidade de superfície.

No caso dos provetes 9.3 e 12.3, a 16^a etapa de aplicação revelou baixa absorção de produto, uma vez que apenas foram feitas duas pincelagens, com o intuito de atingir a profundidade de penetração pretendida. O mesmo sucedeu com a 14^a etapa de aplicação no provete 13.3.

Apesar do tratamento por pincelagem ter procurado utilizar quantidades de produto muito semelhantes e efetuar sensivelmente o mesmo número de pincelagens em cada etapa de aplicação, verifica-se uma grande dificuldade na correlação entre dados de diferentes provetes, pelo que a sua avaliação teria que ser feita “caso a caso”.

Assim sendo, torna-se evidente que, quando se trata de materiais porosos com um grau de heterogeneidade relativamente elevado, a adoção de um procedimento “normalizado” é extremamente difícil de implementar.

A ficha técnica do produto indica que a dureza final é adquirida duas semanas após a aplicação do produto, quando a maior parte do silicato de etilo já foi convertido em gel de sílica. Não obstante, foi garantido um intervalo nunca inferior a 1 mês, entre a conclusão do tratamento e a sua caracterização. Por constrangimentos relacionados com a acessibilidade ao laboratório durante o período de férias, este intervalo de tempo foi alargado, sendo que entre a aplicação do produto e o início da avaliação da sua ação, decorreram cerca de 128 dias.

Após a aplicação do consolidante e durante o período de cura do mesmo, os provetes foram mantidos em ambiente de laboratório (HR = 56±15% e T= 24±4°C), tendo-se procedido ao controlo da evolução da massa dos provetes ao longo do tempo (Figura 5.9).

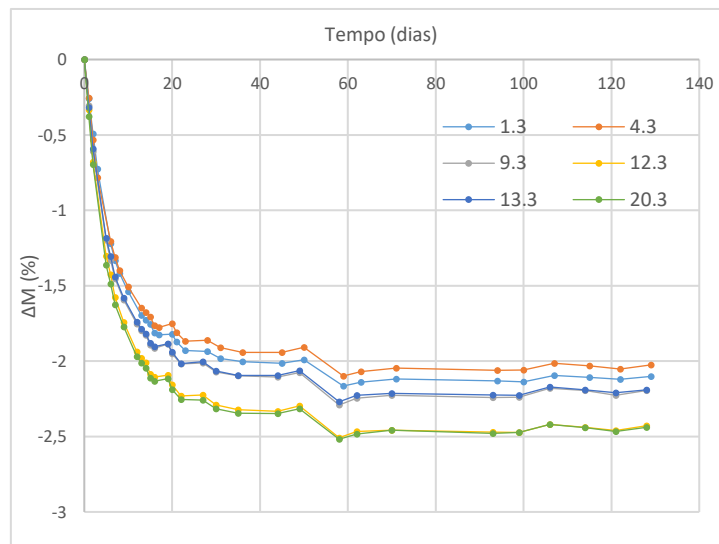


Figura 5.9 - Variação da massa dos provetes após aplicação do consolidante.

5.3 Avaliação da potencial nocividade

Os tratamentos consolidantes têm como principal objetivo restituir coesão e resistência mecânica ao substrato. Assim sendo, a primeira etapa no complexo processo de avaliação de desempenho de qualquer tratamento consolidante, é a avaliação da eficácia conferida pelo mesmo. Este tema foi alvo de estudo de outra dissertação intitulada “Estudo de tratamentos de consolidação de materiais cerâmicos – Avaliação de eficácia” (Ribeiro, 2016).

A avaliação da potencial nocividade de um tratamento consolidante é uma etapa que se segue à avaliação da eficácia e deverá ser introduzida no processo apenas quando a eficácia do referido tratamento for garantida dentro de limites aceitáveis (Delgado Rodrigues e Grossi, 2007).

Desta forma, no presente capítulo, primeiramente são apresentados os dados obtidos na dissertação “Estudos de tratamentos de consolidação de materiais cerâmicos - Avaliação de Eficácia”, no sentido de, juntamente com os resultados obtidos no presente trabalho, se aferir se a aplicação do tratamento consolidante é considerada aceitável.

No âmbito da avaliação da potencial nocividade de um tratamento consolidante sabe-se que, quando se trata de materiais porosos, a saída da água do interior dos poros do material por evaporação pode originar processos de degradação bastante significativos. Uma vez que a presença de produtos consolidantes num material tratado, se traduz em alterações do espaço poroso original do suporte e consequentemente em alterações nas características relacionadas com a presença e movimento de água no interior do material consolidado (Ferreira Pinto, 2002), no presente estudo foram realizados ensaios de determinação de porosidade acessível à água, absorção de água por capilaridade, cinética de secagem e permeabilidade ao vapor de água, em provetes tratados e não tratados.

Para além desta alteração na morfologia interna do material, a aplicação de um tratamento consolidante pode alterar o especto visual do suporte através de modificações cromáticas. É importante aferir se essa variação de cor é considerada aceitável, não modificando em demasia o aspeto original do material. Como tal procedeu-se também à caracterização colorimétrica das superfícies de tratamento, antes e depois da aplicação do consolidante.

5.3.1 Resultados obtidos no âmbito do estudo de avaliação da eficácia inicial

A dissertação “Estudo de tratamentos de consolidação de materiais cerâmicos – Avaliação de eficácia” procurou estudar esse tema recorrendo a uma série de ensaios laboratoriais, em provetes tratados e não tratados, entre os quais:

- Ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons (método direto e indireto);
- Ensaio de determinação de resistência mecânica à flexão e à compressão;
- Ensaio de perfuração controlada (DRMS).

O ensaio de propagação de ultra-sons foi realizado em provetes de dimensões médias 2,5x4x20 [cm] tratados e não tratados, recorrendo ao método direto e indireto. O ensaio foi executado em provetes secos e saturados. No método direto foram analisadas as direções Longitudinal e T1. A Tabela 5.3 apresenta o valor médio e desvio padrão da velocidade de propagação de ultra-sons determinados segundo o método direto, e a Tabela 5.4 apresenta os referidos valores para o método indireto.

Tabela 5.3 – Valores de velocidade de propagação de ultra-sons - método direto (Ribeiro, 2016).

Provetes não tratados				
n	Velocidade: Longitudinal (m/s)		Velocidade: T1 (ms/s)	
	Seco	Saturado	Seco	Saturado
6	2552 (±91)	2652 (±76)	1216 (±87)	1259 (±76)
Provetes tratados				
n	Velocidade: Longitudinal (m/s)		Velocidade: T1 (ms/s)	
	Seco	Saturado	Seco	Saturado
6	2703 (±89)	2766 (±86)	1301 (±54)	1344 (±42)

Tabela 5.4 – Valores de velocidade de propagação de ultra-sons - método indireto (Ribeiro, 2016).

Provete não tratado		
n	Velocidade (m/s)	
	Seco	Saturado
6	2375 (±114)	2605 (±218)
Provete tratado		
n	Velocidade (m/s)	
	Seco	Saturado
6	2567 (±100)	2780 (±108)

De uma forma geral Ribeiro (2016) verificou que os provetes tratados apresentam valores mais elevados de velocidade de propagação de ultra-sons, o que estará diretamente relacionado com a precipitação do produto consolidante no interior dos poros do material.

Os ensaios de determinação da resistência mecânica foram executados em provetes tratados e não tratados. O ensaio de resistência à flexão foi efetuado em provetes de dimensões médias 2,5x4x20 [cm] e o ensaio de resistência mecânica à compressão foi realizado em provetes de dimensões médias 2,3x2,4x3 [cm]. Os valores obtidos através destes ensaios encontram-se apresentados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 - Valores de resistência à flexão e compressão, em provetes não tratados e tratados (Ribeiro, 2016).

Provetes não tratados			
n	Resistência à flexão (MPa)	n	Resistência à compressão (MPa)
6	1,6 ($\pm 0,3$)	21	18,2 ($\pm 2,4$)
Provetes tratados			
n	Resistência à flexão (MPa)	n	Resistência à compressão (MPa)
6	1,7 ($\pm 0,3$)	21	19,5 ($\pm 2,6$)

Apenas os valores obtidos no ensaio de resistência à compressão apresentam um aumento de resistência relevante, associado à aplicação do tratamento consolidante. Ainda assim, Ribeiro (2016) verificou que este incremento se encontra bastante aquém dos resultados obtidos em outros estudos semelhantes.

O ensaio de resistência à perfuração controlada foi realizado em provetes tratados e não tratados, de dimensões médias 2,3x2,4x3 [cm]. A Figura 5.10 apresenta as curvas médias e os desvios padrão da força de perfuração obtida através do ensaio de perfuração controlada.

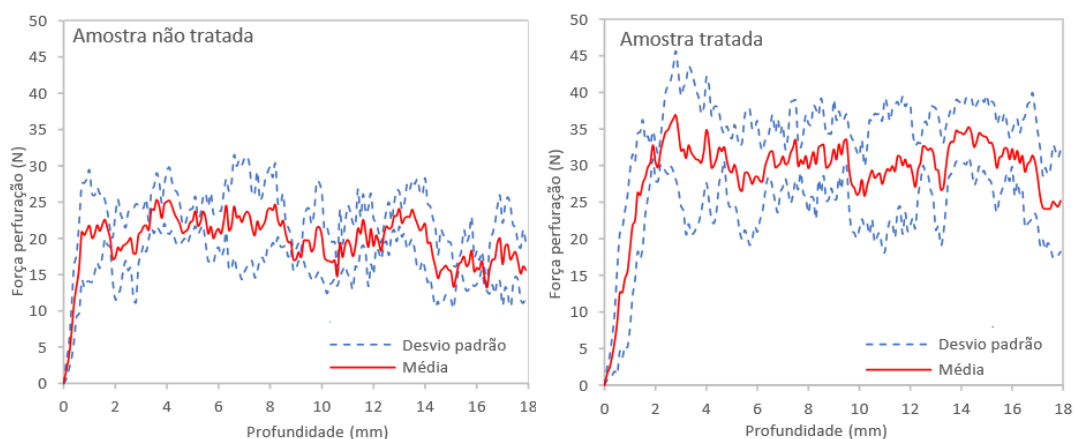


Figura 5.10 - Perfis de força de perfuração, para provetes não tratados e tratados (Ribeiro, 2016).

A ação do tratamento consolidante é perfeitamente identificável, visto que os provetes tratados apresentam valores médios de força superiores aos dos provetes não tratados. Verificou-se que o perfil da amostra tratada apresenta um valor médio de 31(± 7) N e o perfil da amostra não tratada exibe um valor médio de 20(± 5) N (Ribeiro, 2016).

Segundo Ribeiro (2016) o produto consolidante distribui-se uniformemente pelo tijolo cerâmico, ao longo de toda a sua profundidade. Não se verifica a formação de uma película superficial de características distintas, na medida em que não se observa nenhum pico de força de perfuração junto à superfície.

5.3.2 Alterações colorimétricas

O fenómeno de alteração de cor deve-se à impregnação do produto consolidante nos poros do material, que previamente ao tratamento se encontravam preenchidos pelo ar. O consolidante apresenta uma tonalidade incolor/amarelada, pelo que o seu índice de refração diferirá do índice de refração do ar, resultando na alteração das propriedades óticas do cerâmico.

No final da aplicação do consolidante, a superfície tratada apresentava uma aparência claramente mais escura do que a original, sendo que essa diferença se foi tornando cada vez menos evidente durante o período de cura. Após o tratamento, nunca foi observada uma aparência brilhante na superfície, o que é um indicador visual de que não terá sido criada uma película à superfície (filme).

A caracterização colorimétrica após o período de cura do tratamento foi realizada em 6 provetes de dimensões médias 3,7x7,6x5,0 [cm], que posteriormente foram cortados, através da medição das coordenadas colorimétricas no sistema CIELAB.

Em cada provete foram efetuadas 10 medições na face de tratamento, antes e após a aplicação do consolidante.

A Tabela 5.6 apresenta o valor médio das coordenadas colorimétricas, dos valores de croma medidos e respetivo desvio padrão, antes e após tratamento.

Tabela 5.6 - Coordenadas colorimétricas e valores de croma – antes e após tratamento.

Provetes não tratados				
Provete	L*	a*	b*	C*
1.3	43,90 (±1,12)	21,43 (±0,84)	25,11 (±0,90)	33,01 (±1,10)
4.3	46,79 (±1,32)	19,39 (±1,12)	21,28 (±1,11)	28,79 (±1,49)
9.3	43,37 (±1,37)	22,28 (±0,80)	24,43 (±1,16)	33,06 (±1,37)
12.3	40,98 (±0,94)	20,52 (±0,66)	23,43 (±0,69)	31,15 (±0,75)
13.3	43,20 (±0,52)	21,38 (±1,00)	23,73 (±1,41)	31,94 (±1,67)
20.3	42,77 (±1,00)	21,88 (±0,74)	24,59 (±0,77)	32,92 (±0,94)
Provetes tratados				
Provete	L*	a*	b*	C*
1.3	39,40 (±0,88)	23,50 (±0,43)	29,92 (±0,55)	38,04 (±0,64)
4.3	41,47 (±1,45)	22,43 (±1,15)	26,34 (±1,37)	34,60 (±1,78)
9.3	39,60 (±0,82)	23,51 (±0,32)	28,39 (±0,60)	36,86 (±0,62)
12.3	37,40 (±0,96)	21,42 (±0,55)	26,38 (±0,93)	33,98 (±0,89)
13.3	39,04 (±0,54)	22,87 (±0,56)	27,42 (±0,56)	35,71 (±0,71)
20.3	39,61 (±0,83)	22,79 (±0,72)	27,67 (±0,93)	35,85 (±1,16)

A Figura 5.11 e a Figura 5.12 apresentam, respetivamente, a coordenada luminosidade (L*) versus croma (C*) e a coordenada a* versus b*, resultantes das várias medições executadas nos mesmos provetes, antes e após tratamento.

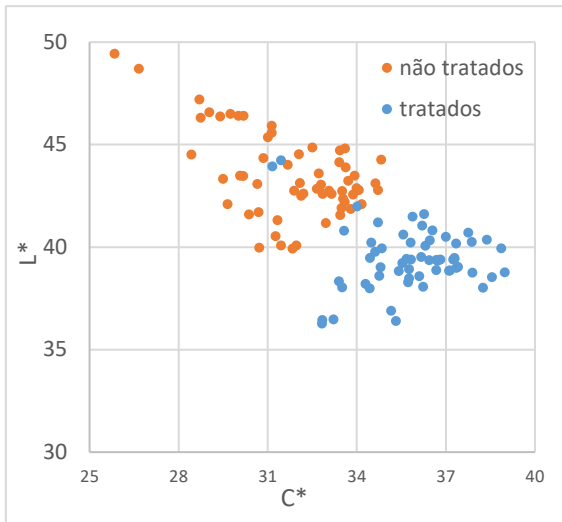


Figura 5.11 - L^* vs C^*

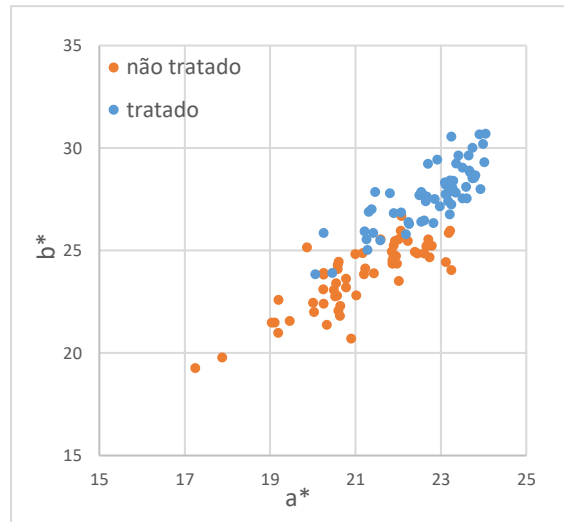


Figura 5.12 - a^* vs b^*

A avaliação das alterações de cor foi efetuada através da análise das diferenças entre valores médios de coordenadas cromáticas (a^* , b^* e L^*), antes (não tratado) e após tratamento (tratado, T), e através da quantificação da diferença de croma (ΔC^*) e da diferença total de cor (ΔE^*), recorrendo às expressões seguidamente apresentadas.

$$\begin{aligned} \text{Diferenças entre coordenadas cromáticas: } \Delta L^* &= L_T^* - L^* \\ \Delta a^* &= a_T^* - a^* \\ \Delta b^* &= b_T^* - b^* \end{aligned}$$

$$\text{Diferença de croma: } \Delta C^* = C_T^* - C^*$$

$$\text{Diferença total de cor: } \Delta E^* = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}}$$

A Tabela 5.7 apresenta os valores das diferenças entre coordenadas cromáticas, da diferença de croma e da diferença total de cor. É também apresentado o valor médio dos referidos resultados.

Tabela 5.7 – Diferenças entre coordenadas colorimétricas, diferença de croma e de cor.

Provete	ΔL^*	ΔL^* Valor médio	Δa^*	Δa^* Valor médio	Δb^*	Δb^* Valor médio	ΔC^*	ΔC^* Valor médio	ΔE^*	ΔE^* Valor médio
1.3	-4,51		2,07		4,81		5,03		6,91	
4.3	-5,32		3,04		5,06		5,80		7,95	
9.3	-3,77	-4,09	1,23	1,61	3,96	3,93	3,79	4,03	5,60	5,91
12.3	-3,59		0,90		2,95		2,83		4,73	
13.3	-4,17		1,49		3,69		3,77		5,77	
20.3	-3,16		0,91		3,09		2,93		4,51	

A obtenção de valores negativos de ΔL^* , significa que o tratamento deu origem ao escurecimento da superfície. Os resultados de Δa^* e Δb^* foram positivos, correspondendo a situações de mudança de cor para o extremo mais vermelho (a^*) e amarelo (b^*), respetivamente. O valor da diferença de croma (ΔC^*) obtido é positivo, o que equivale a uma situação de maior saturação (intensidade) da cor.

O tratamento consolidante gerou em média uma diferença total de cor (ΔE^*) de 5,91, pelo que é possível concluir que o tratamento foi responsável por variações de cor perceptíveis ao olho humano ($\Delta E^* > 3$) [(Franzoni *et al.*, 2016) (Luo *et al.*, 2015)].

A Tabela 5.8 apresenta os valores das diferenças entre coordenadas cromáticas, da diferença de croma e da diferença total de cor, obtidos em dois estudos onde foram aplicados produtos à base de silicato de etilo sobre materiais cerâmicos, recorrendo ao método de aplicação por pincelagem.

Tabela 5.8 – Diferenças de coordenadas cromáticas, diferença de croma e de cor, obtidas em estudos de tratamentos à base de silicato de etilo, efetuados sobre material cerâmico.

Elemento	Produto consolidante	Método de aplicação	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔC^*	ΔE^*	Referência
Tijolo Cerâmico	TEOS (silicato de etilo)	Pincelagem	-3,8	-0,5	-2,4	-2,38	4,4	(Franzoni <i>et al.</i> , 2013).
Azulejo cerâmico	Tegovakon (silicato de etilo)	Pincelagem	-0,56 a -3,01	-0,46 a -1,59	-1,49 a -5,49	-1,6 a -5,7	3,4 a 5,7	(Revez <i>et al.</i> , 2008)
	Rhodosil RC-90 (silicato de etilo)	Pincelagem	-5,16 a -12,02	0,99 a 2,06	0,08 a 1,62	1,0 a 2,6	5,8 a 12,1	

Comparativamente com os estudos realizados por Franzoni *et al.* (2013) e Revez *et al.* (2008), cujos resultados se apresentam na Tabela 5.8, verifica-se que os valores da diferença total de cor (ΔE^*) obtidos no presente trabalho são, genericamente, da mesma ordem de grandeza dos valores apresentados nos referidos estudos. Os valores de ΔL^* referidos na Tabela 5.8 são negativos, tal como acontece no presente trabalho, pelo que se pode afirmar que existe uma tendência para os tratamentos consolidantes, com base em silicatos de etilo, gerarem um escurecimento da superfície tratada. Por outro lado, ambas as investigações mencionadas revelam valores de Δa^* , Δb^* e ΔC^* tanto positivos, como negativos. Valores negativos de Δa^* , Δb^* correspondem a situações de mudança de cor para o extremo mais verde (a^*) e mais azul (b^*) e valores negativos de ΔC^* relevam menor saturação da cor, o que não coincide com os resultados obtidos nesta dissertação. No caso específico do estudo desenvolvido por Revez *et al.* (2008), em que, a aplicação do produto Tegovakon gerou $\Delta C^* < 0$, o autor refere-se ao facto do tratamento com esse produto ter gerado “branqueamento” da superfície tratada.

É um facto que os tratamentos consolidantes geram sempre algum nível de homogeneização da superfície, mas por observação visual das mesmas antes e após a aplicação do consolidante é perceptível que não houve uma excessiva redução da heterogeneidade cromática dos provetes, característica que tipicamente caracteriza os tijolos cerâmicos.

5.3.3 Porosidade acessível à água e teor máximo em água

A Tabela 5.9 apresenta o valor médio e desvio padrão da porosidade e do teor máximo em água, determinados, respetivamente, em 12 provetes não tratados e em 12 provetes tratados, de dimensões médias 3.7x3.7x5.0 [cm]. Os valores individuais obtidos para cada provete ensaiado estão disponíveis no Anexo II.

Tabela 5.9 – Porosidade e teor máximo em água - provetes não tratados e tratados.

Provetes não tratados		
n	Porosidade P[%]	Teor em água máximo $W_{m\acute{a}x}$ [%]
12	20,7 ($\pm 0,2$)	9,9 ($\pm 0,2$)
Provetes tratados		
n	Porosidade P[%]	Teor em água máximo $W_{m\acute{a}x}$ [%]
12	18,7 ($\pm 0,3$)	8,8 ($\pm 0,2$)

De uma forma geral, verifica-se um decréscimo dos valores médios de porosidade de 20,7% para 18,7% e de teor máximo em água de 9,9% para 8,8%, dos provetes não tratados para os provetes tratados. Tal deve-se ao facto do tratamento consolidante ter originado uma redução do volume de vazios, uma vez que o produto, após precipitação, preencheu parte do espaço poroso dos provetes.

No estudo elaborado por Franzoni *et al.* (2013), onde foi aplicado, por pincelagem, um tratamento consolidante à base de silicato de etilo (TEOS) sobre provetes cúbicos ($4 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$) provenientes de tijolos cerâmicos, o teor de água máximo reduziu de 30,4% para 23,6%, o que constitui uma diferença de valores bastante superior.

No entanto, no trabalho apresentado por Franzoni *et al.* (2013), o consolidante foi aplicado a tijolos cerâmicos até à rejeição do mesmo, correspondendo a um estado de completa saturação, enquanto que no presente estudo o produto consolidante foi aplicado sensivelmente até “meio do provete”.

Não foram encontrados outros estudos que apresentassem condições semelhantes às reproduzidas no presente trabalho (provetes de geometria idêntica, método de aplicação por pincelagem e produto consolidante à base de silicato de etilo), pelo que não foi possível fazer uma análise comparativa mais extensa.

5.3.4 Absorção de Água por Capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi executado em 12 provetes não tratados e em 12 provetes tratados, de dimensões médias $3,7 \times 3,7 \times 5,0 \text{ [cm]}$, segundo a direção T1.

A razão pela qual o ensaio foi realizado segundo a direção de capilaridade T1, prende-se com o facto de se querer estudar o comportamento da face onde foi aplicado o produto consolidante. Assim sendo, a face do provete em contacto com a lâmina de água corresponde à “face de tratamento”, designada pela letra “T”, no esquema da Figura 3.3.

A Figura 5.13 apresenta as curvas de absorção de água por capilaridade obtidas com base na caracterização dos provetes já referidos.

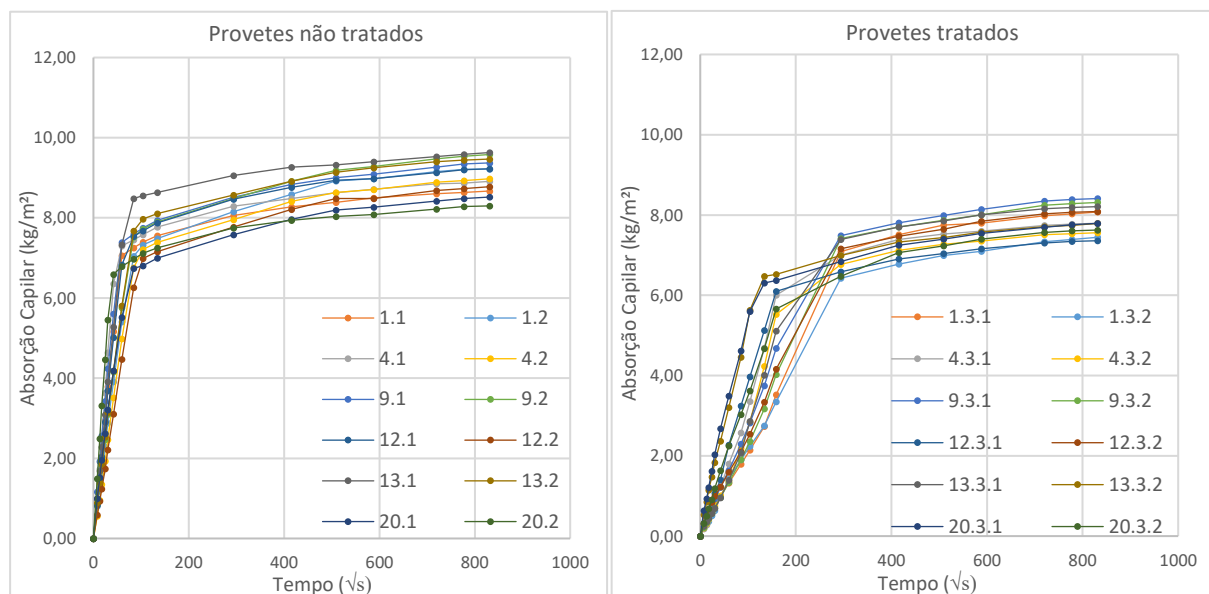


Figura 5.13 - Curvas de absorção de água por capilaridade de provetes não tratados e tratados.

Numa primeira observação é possível concluir que os troços iniciais das curvas de absorção de água por capilaridade dos provetes não tratados apresentam maior declive do que os troço iniciais das curvas dos provetes tratados, o que corresponde a uma maior velocidade inicial de absorção de água por capilaridade. Os provetes não tratados demonstraram também uma maior quantidade máxima de água absorvida, comparativamente aos provetes tratados.

A Figura 5.14 é representativa da informação obtida através das curvas de absorção de água por capilaridade. O tabuleiro da esquerda apresenta os provetes não tratados “saturados” e o tabuleiro da direita, os provetes tratados ainda bastante secos, acrescida a particularidade de que o ensaio nos provetes tratados foi iniciado antes do ensaio em provetes não tratados.



Figura 5.14 - Ensaio de absorção de água por capilaridade - provetes não tratados e tratados.

No caso das curvas de absorção de água por capilaridade de vários provetes tratados, a fase de declive mais acentuado não termina no dia em que o ensaio foi iniciado, como acontece em todas as curvas de provetes não tratados. Como tal, nesses casos só foi possível fazer uma nova medição 24h depois

do início do ensaio, o que se traduziu em termos gráficos numa reta de declive constante entre a última medição do 1º dia de ensaio e a primeira medição do 2º dia de ensaio, o que poderá não corresponder à realidade. Ainda assim, como não foram incluídos esses segmentos na determinação do declive do troço inicial das curvas, o coeficiente de capilaridade não foi afetado.

A Tabela 5.10 apresenta o valor médio e desvio padrão do coeficiente de capilaridade e do valor assintótico dos provetes não tratados e tratados.

Tabela 5.10 - Coeficiente de capilaridade e valores assintóticos de provetes não tratados e tratados.

Provetes não tratados		
n	T1	
	CC [kg/m ² .s ^{0.5}]	VA [kg/m ²]
12	0,112 (±0,031)	9,1 (±0,4)
Provetes tratados		
n	T1	
	CC [kg/m ² .s ^{0.5}]	VA [kg/m ²]
12	0,033 (±0,010)	7,9 (±0,3)

Verificou-se uma redução do coeficiente de capilaridade de 70,5% dos provetes tratados em relação aos provetes não tratados. Esta elevada redução na absorção de água por capilaridade pode ter resultado apenas das modificações ocorridas no espaço poroso, ou dever-se também à presença de alguma ação hidrófuga desencadeada pelo consolidante (Ferreira Pinto, 2002).

A Figura 5.15 apresenta os gráficos de evolução da altura da franja líquida em função da raiz quadrada do tempo, para os provetes não tratados e tratados.

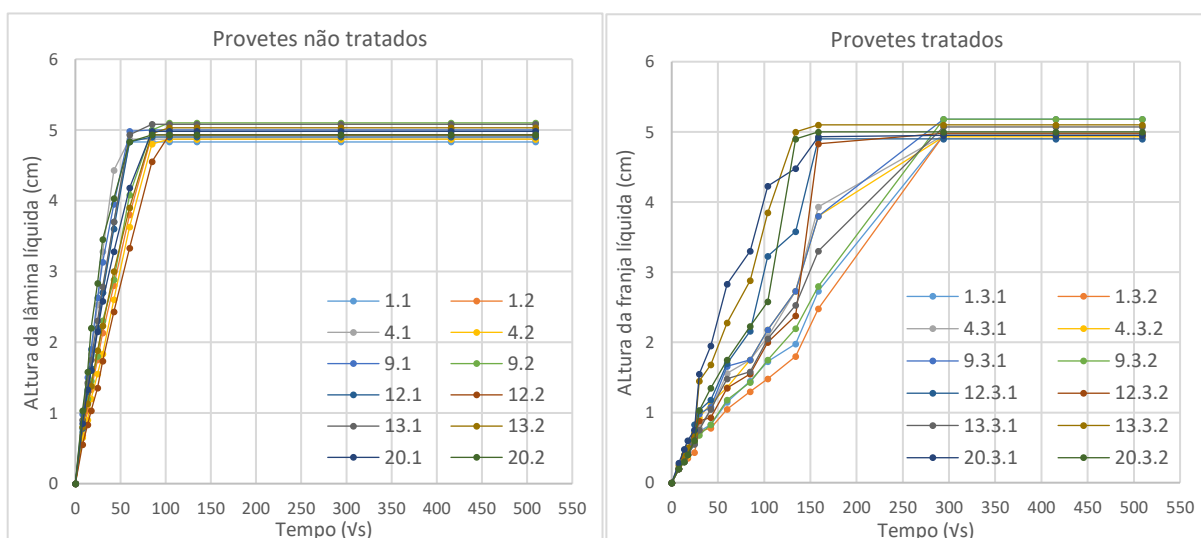


Figura 5.15 - Evolução da franja capilar dos provetes não tratados e tratados.

Tal como se pode observar, o gráfico da evolução da altura da franja líquida nos provetes tratados apresenta uma não linearidade na evolução da altura da franja líquida, até à sua estabilização. Tal deve-se eventualmente ao facto da ascensão de água não ter ocorrido de forma contínua, sendo que ao longo do ensaio, os provetes tratados apresentaram manchas secas na “face de prensagem”, como ilustram os exemplos da Figura 5.16. A progressão da franja líquida foi sempre mais rápida na “face rugosa” do que na “face de prensagem”, pelo que quando a primeira atingiu a altura de franja líquida máxima, passou a ser ainda mais complicado fazer o registo da altura da franja líquida, uma vez que as manchas secas na “face de prensagem” tornaram este limite dificilmente identificável.



Figura 5.16 - Manchas secas na “face de prensagem” dos provetes tratados - ensaio de absorção de água por capilaridade.

Este tipo de ocorrência pode ter como justificação, o facto de o provete tratado ter passado a possuir zonas com porosidade fechada ou muito baixa interconetividade (Hall e Hoff, 2002 citado por Almeida Santos, 2013).

5.3.5 Características de secagem

O estudo da cinética de secagem foi realizado em 12 provetes não tratados e em 12 provetes tratados, de dimensões médias 3.7x3.7x5.0 [cm].

A Figura 5.17 e Figura 5.18 apresentam, respetivamente, as curvas de secagem dos provetes não tratados e tratados, para uma duração de ensaio de 112 dias (HR=60±21% e T=18±5°C).

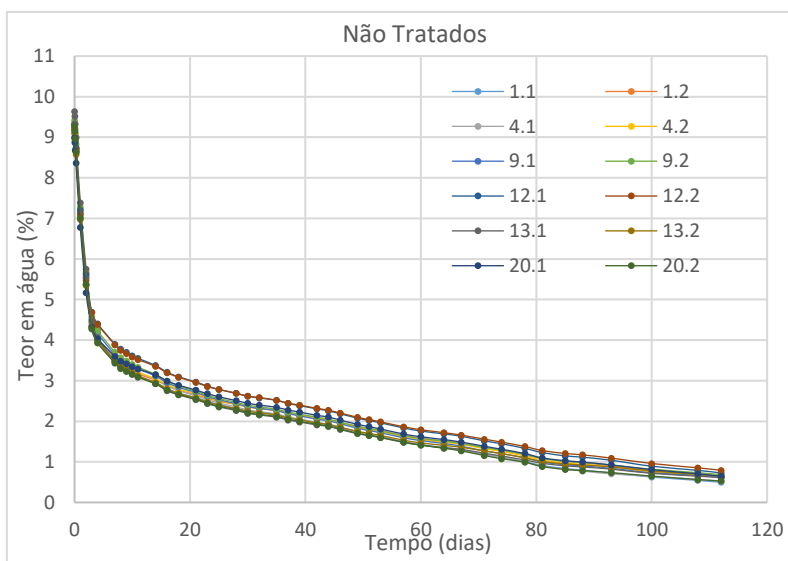


Figura 5.17 - Curvas de secagem de provetes não tratados.

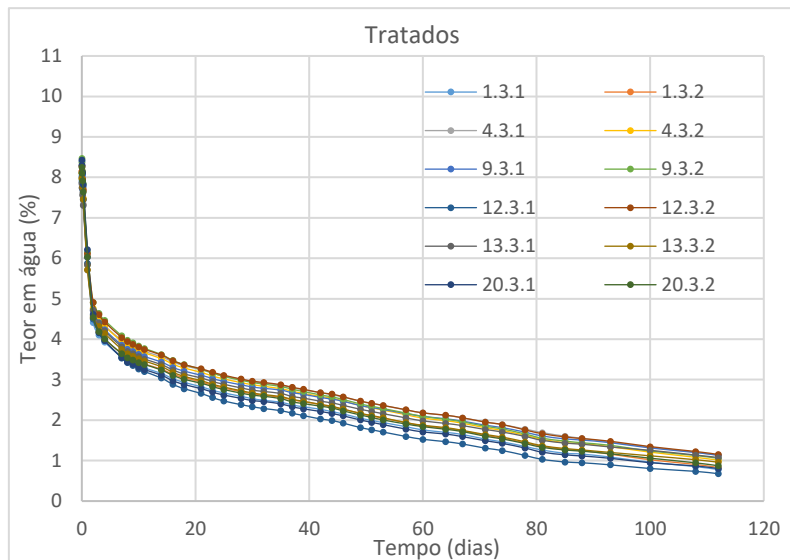


Figura 5.18 - Curvas de secagem de provetes tratados.

Todas as curvas apresentam um trecho inicial linear que corresponde a uma taxa de secagem aproximadamente constante, sendo possível identificar o ponto a partir do qual a taxa de secagem passa a ser decrescente (teor de umidade crítica).

A Tabela 5.11 apresenta o valor médio e desvio padrão do teor em água no início e no fim do ensaio, do teor de umidade crítica e do índice de secagem, para os provetes não tratados e tratados. Os valores individuais obtidos para cada provete ensaiado estão disponíveis no Anexo II.

Tabela 5.11 - Valores de teor em água inicial e final, teor de umidade crítica e índice de secagem dos provetes não tratados e tratados.

Provetes não tratados				
n	Teor em água no início do ensaio (%)	Teor em água no final do ensaio (%)	Teor de umidade crítica (%)	Índice de secagem
12	9,38 (±0,19)	0,63 (±0,15)	4,43 (±0,15)	0,205 (±0,022)
Provetes tratados				
n	Teor em água no início do ensaio (%)	Teor em água no final do ensaio (%)	Teor de umidade crítica (%)	Índice de secagem
12	8,18 (±0,15)	0,96 (±0,08)	4,66 (±0,15)	0,271 (±0,013)

Analisando os gráficos e tabelas anteriores, pode concluir-se que o tratamento consolidante originou alterações na cinética de evaporação dos provetes de tijolo cerâmico.

Verificou-se um aumento do índice de secagem de 32,2% dos provetes tratados em relação aos provetes não tratados, o que confirma a tendência do tratamento consolidante desacelerar o processo de secagem.

O valor do teor de humidade crítica é semelhante em ambos os casos. Porém, este teor de humidade foi obtido 72h após o início do ensaio, no caso dos provetes não tratados, e apenas 48h após o início do ensaio, no caso dos provetes tratados.

5.3.6 Permeabilidade ao vapor de água

O ensaio de permeabilidade ao vapor de água, foi realizado em 12 provetes tratados e 4 provetes não tratados, de dimensões 3,7x3,7 [cm] e espessura compreendida entre 6 e 9 mm. Estes provetes foram obtidos através do corte de provetes de dimensões médias 3,7x3,7x5,0 [cm] em duas “pastilhas”, as quais foram identificadas com a numeração do provete de origem, acrescido da designação P1 ou P2, consoante a proveniência da mesma. A “pastilha” designada por P1 corresponde à “primeira camada de tratamento” e foi cortada através da marcação da espessura pretendida, perpendicularmente à “face de tratamento”. Após o corte da “pastilha” P1, a espessura pretendida voltou a ser marcada, desta vez perpendicularmente à nova face de corte, e cortou-se a segunda “pastilha”, designada por P2.

A Figura 5.19 ilustra o procedimento de corte e de numeração das pastilhas P1 e P2, recorrendo ao exemplo do provete 1.3.1.

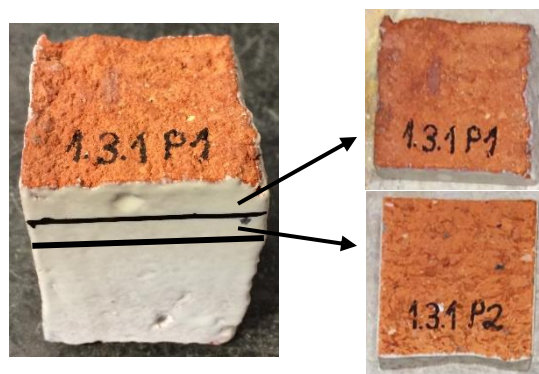


Figura 5.19 – Corte e numeração das “pastilhas” P1 e P2 utilizadas no ensaio da permeabilidade ao vapor de água.

O objetivo, ao recorrer a duas “pastilhas” provenientes do mesmo provete foi avaliar em que medida a difusão de vapor de água foi afetada pelo tratamento consolidante, em “camadas” de diferentes profundidades.

No ensaio de permeabilidade ao vapor de água avaliou-se o coeficiente de permeabilidade (Π), e a espessura de camada de ar de difusão equivalente (Sd), cujos valores obtidos são apresentados na Figura 5.20 e Tabela 5.12.

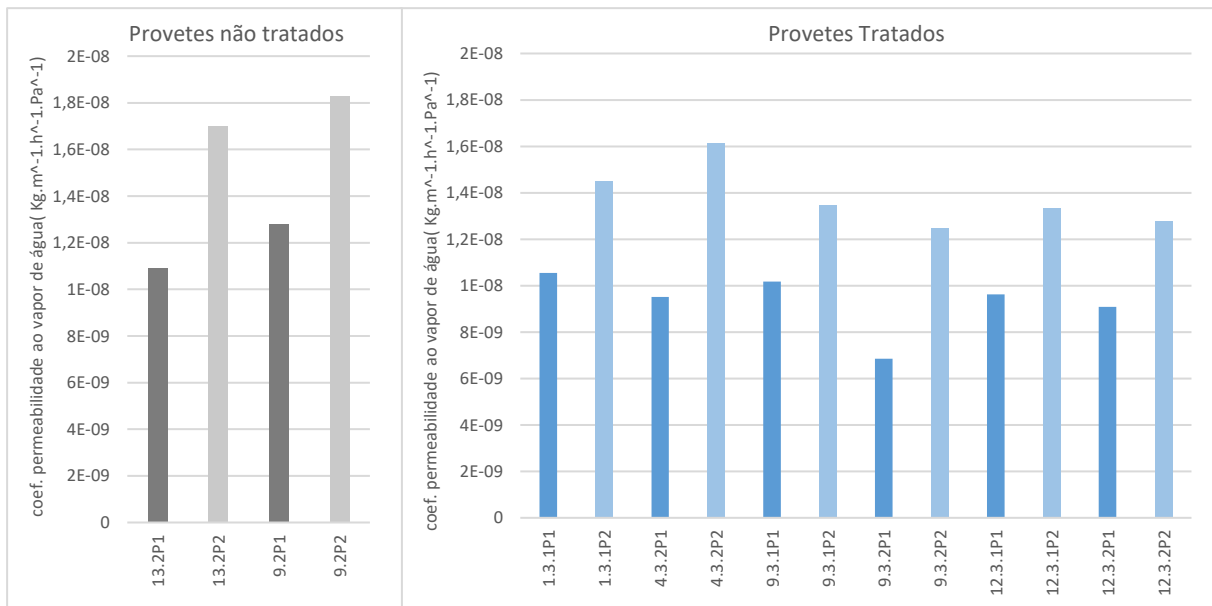


Figura 5.20 - Coeficiente de permeabilidade ao vapor de água em provetes não tratados e tratados.

Tabela 5.12 - Coeficiente de permeabilidade (Π) e espessura de camada de ar de difusão equivalente (S_d) de provetes não tratados e valores médios e desvio-padrão de provetes tratados.

Provetes não tratados				
Provete	$\Pi \times 10^{-8} [kg.m^{-1}.h^{-1}.Pa^{-1}]$		S_d [m]	
	P1	P2	P1	P2
9.2	1,28	1,83	0,41	0,26
13.2	1,09	1,70	0,43	0,30
Provetes tratados				
n	$\Pi \times 10^{-8} [kg.m^{-1}.h^{-1}.Pa^{-1}]$		S_d [m]	
	P1	P2	P1	P2
6	0,93 ($\pm 0,12$)	1,38 ($\pm 0,12$)	0,57 ($\pm 0,08$)	0,36 ($\pm 0,03$)

Os tratamentos consolidantes não devem constituir obstáculos às trocas de vapor de água no interior do material tratado, porém, uma vez que a difusão de vapor depende essencialmente da porosidade aberta, é expectável que se verifique alguma diminuição do coeficiente de difusão de vapor, consequência direta da redução de porosidade que o tratamento consolidante originou.

A análise da Tabela 5.12 permite verificar que o tratamento consolidante provocou uma redução da permeabilidade ao vapor de água e um aumento da camada de ar de difusão equivalente, em ambas as “pastilhas” tratadas, P1 e P2.

As “pastilhas” P1 revelam-se menos permeáveis do que as “pastilhas” P2, apresentando um coeficiente de permeabilidade ao vapor de água inferior.

5.4 Análise de resultados

Nos subcapítulos 5.3.1 a 5.3.6 foi feita uma análise comparativa dos resultados obtidos em provetes tratados e não tratados e, em alguns casos, uma comparação com outros estudos semelhantes, tendo sido feitas aferições pouco conclusivas, relativamente ao potencial nocivo que as alterações decorridas do tratamento originaram. No decorrer de um estudo realizado por Delgado Rodrigues e Grossi (2007), os autores propuseram um sistema de avaliação multicritério, para quantificação do risco de incompatibilidade associado à aplicação de um tratamento consolidante. Tal sistema constitui um instrumento de análise válido no âmbito da presente dissertação, uma vez que o conceito de compatibilidade coincide substancialmente com o conceito de potencial nocividade, pelo que o referido sistema será utilizado na quantificação dos resultados obtidos.

O sistema de avaliação multicritério consiste na quantificação de um dado parâmetro (indicador de compatibilidade) numa escala de classificação de 0 a 10, de acordo com o efeito nocivo que origina no material tratado, isto é, a classificação dada a cada indicador de compatibilidade traduz-se num maior ou menor grau de incompatibilidade.

A Tabela 5.13 apresenta a escala de classificação proposta por Delgado Rodrigues e Grossi (2007) para um tratamento consolidante aplicado a uma superfície pétreo. Esta escala classificativa fornece apenas critérios gerais orientadores, pelo que poderão também ser utilizados no âmbito dos materiais cerâmicos. As classificações 0, 5 e 10 referem-se, respetivamente, a baixo, médio e alto risco de incompatibilidade.

Tabela 5.13 - Riscos de incompatibilidade associados a um tratamento consolidante (adaptado de Delgado Rodrigues e Grossi (2007)).

Critério	Indicador de compatibilidade	Riscos de Incompatibilidade (escala de classificação)
Propriedades Visuais	Diferença total de cor (ΔE^*)	Menor que 3 → 0
		Entre 3 e 5 → 5
		Maior que 5 → 10
Propriedades Mecânicas	Resistência à flexão	
	Resistência à compressão	Valores variam menos de 10% → 0
	Resistência à perfuração	Valores variam entre 10 e 25% → 5
	(valores do provete tratado face ao provete não tratado)	Valores variam mais de 25% → 10
Comportamento Hidrofílico	Coefficiente de absorção de água	
	Índice de secagem	Valores variam menos de 10% → 0
	Permeabilidade ao vapor de água	Valores variam entre 10 e 25% → 5
	(valores do provete tratado face ao provete não tratado)	Valores variam mais de 25% → 10

É de enfatizar que Delgado Rodrigues e Grossi (2007) propõem ainda outros indicadores de compatibilidade, a incorporar na avaliação do risco de incompatibilidade, tais como, a composição mineralógica, o coeficiente de expansão térmica e o módulo de elasticidade. Esses parâmetros não foram enunciados na Tabela 5.13 porque não foram determinados no decorrer do presente estudo, nem na dissertação intitulada “Estudo de tratamentos de consolidação de materiais cerâmicos – Avaliação de eficácia” (Ribeiro, 2016).

No trabalho desenvolvido por Delgado Rodrigues e Grossi (2007), os autores salientam que nem todos indicadores de compatibilidade propostos têm necessariamente de ser utilizados, se não existirem dados experimentais que os suportem e sugerem que o sistema classificativo poderá ainda ser complementado com novos parâmetros que se considerem relevantes.

No presente trabalho e no trabalho desenvolvido por Ribeiro (2016) foram determinados outros parâmetros, como a porosidade, o teor máximo em água e a velocidade de propagação de ultra-sons que, apesar de não terem sido propostos originalmente por Delgado Rodrigues e Grossi (2007), podem ser considerados igualmente relevantes, pelo que também serão introduzidos na análise.

A Tabela 5.14 e a Tabela 5.15 apresentam valores médios e desvios padrão dos indicadores de compatibilidade que foram determinados tanto no decorrer do presente trabalho como no trabalho de Ribeiro (2016). Em ambas as tabelas, são também apresentadas as variações percentuais, calculadas por comparação dos valores obtidos em provetes tratados e provetes não tratados, e os riscos de incompatibilidade associados a cada indicador avaliado. De mencionar, que a Tabela 5.14 se refere apenas aos indicadores de compatibilidade propostos por Delgado Rodrigues e Grossi (2007) e que a Tabela 5.15 se refere a indicadores de compatibilidade adicionais que não foram originalmente propostos pelos autores (não são apresentados na Tabela 5.13), mas que serão introduzidos na análise de compatibilidade.

Tabela 5.14 – Valores dos indicadores de compatibilidade obtidos e respectivos riscos de incompatibilidade.

Critério	Indicador de compatibilidade	Valores médios e desvio padrão		Variação percentual (provete tratado face ao provete não tratado)	Riscos de Incompatibilidade (escala de classificação)	
		NT	T			
Propriedades Visuais	Diferença total de cor (ΔE^*)	5,91		-	10	
Propriedades Mecânicas	Resistência à flexão (MPa)	1,6 ($\pm 0,3$)	1,7 ($\pm 0,3$)	Aumento de 6,25%	0	
	Resistência à compressão (MPa)	18,2 ($\pm 2,4$)	19,5 ($\pm 2,6$)	Aumento de 7,14%	0	
	Resistência à perfuração (N)	20 (± 5)	31 (± 7)	Aumento de 55,0%	10	
Comportamento Hidrofílico	Coeficiente de Absorção de água [$kg/m^2 \cdot s^{0.5}$]	0,112 ($\pm 0,031$)	0,033 ($\pm 0,010$)	Redução de 70,54%	10	
	Índice de secagem	0,205 ($\pm 0,022$)	0,271 ($\pm 0,013$)	Aumento de 32,20%	10	
	Permeabilidade ao vapor de água [$\times 10^{-8} [Kg \cdot m^{-1} \cdot h^{-1} \cdot Pa^{-1}]$]	P1	1,19 ($\pm 0,10$)	0,93 ($\pm 0,12$)	Redução de 21,85%	5
		P2	1,77 ($\pm 0,07$)	1,38 ($\pm 0,12$)	Redução de 22,03%	

Tabela 5.15 - Valores adicionais de indicadores de compatibilidade obtidos e respectivos riscos de incompatibilidade.

Critério	Indicador de compatibilidade	Condição dos provetes	Direção	Valores médios e desvio padrão		Variação percentual (provete tratado face ao provete não tratado)	Riscos de Incompatibilidade (escala de classificação)
				NT	T		
Propriedades Mecânicas	Velocidade de propagação de ultra-sons (m/s)	Provetes Secos	L	2552 (± 91)	2703 (± 89)	Aumento de 5,92%	0
			T1	1216 (± 87)	1301 (± 54)	Aumento de 7,0%	
	Método direto	Provetes Saturados	L	2652 (± 76)	2766 (± 86)	Aumento de 4,30%	
			T1	1259 (± 76)	1344 (± 42)	Aumento de 6,75%	
Comportamento Hidrofílico	Porosidade (%)	-	-	20,7 ($\pm 0,2$)	18,7 ($\pm 0,3$)	Redução de 9,66%	0
	Teor máximo em água (%)	-	-	9,9 ($\pm 0,2$)	8,8 ($\pm 0,2$)	Redução de 11,11%	5

A análise da Tabela 5.14 e da Tabela 5.15 permite verificar que a diferença total de cor está acima dos limites aceitáveis, estabelecidos para tratamentos consolidantes ($\Delta E^* > 5$), o que constitui um risco de incompatibilidade elevado.

Relativamente às características mecânicas, a resistência à flexão, a resistência à compressão e a velocidade de propagação de ultra-sons apresentam baixo risco de incompatibilidade, contrariamente à resistência à perfuração que apresenta elevado risco de incompatibilidade.

Nos ensaios associados ao comportamento hidrofílico verificou-se uma redução muito elevada na absorção de água por capilaridade, o que se traduz em alto risco de incompatibilidade. O mesmo acontece com a variação do índice de secagem, que se encontra acima do limite aceitável. Em contrapartida, o teor máximo em água e a permeabilidade ao vapor de água apresentam resultados mais razoáveis, correspondentes a um risco de incompatibilidade intermédio. A porosidade é o indicador de compatibilidade mais satisfatório, equivalendo a um risco de incompatibilidade baixo.

Delgado Rodrigues e Grossi (2007) apresentam uma fórmula matemática, através da qual é possível determinar o grau de incompatibilidade geral de qualquer ação de conservação:

$$ID_n = \sqrt{\frac{C_1^2 + C_2^2 + \dots + C_n^2}{n}} \quad (\text{Eq. 5.1})$$

Em que:

ID_n – grau de incompatibilidade;

$C_1 \dots C_n$ – classificações obtidas para os indicadores de compatibilidade (1 a n);

n – número de indicadores usados no cálculo do ID_n .

No estudo realizado por Delgado Rodrigues e Grossi (2007), os autores referem-se à importância de incluir no cálculo do ID_n , outro tipo de indicadores que não estão diretamente relacionados com os materiais objeto de intervenção. Estes tipos de indicadores integram-se no ramo operacional e socio-cultural do estudo da compatibilidade e lidam com componentes humanas e subjetivas, tais como logística e aspetos económicos, recursos sociais e problemáticas culturais.

No entanto, os critérios anteriormente referidos não se encontram explorados no âmbito da presente dissertação, uma vez que a mesma lida apenas com as alterações físicas decorrentes da aplicação de um produto consolidante em tijolo cerâmico, não se encontrando associada a uma intervenção de conservação real. Assim, os indicadores utilizados no cálculo do ID_n são apenas os representados na Tabela 5.14 e Tabela 5.15.

Integrando as classificações apresentadas na Tabela 5.14 e Tabela 5.15, na Eq. 5.1, têm-se:

$$ID_n = \sqrt{\frac{10^2 + 0^2 + 0^2 + 10^2 + 10^2 + 10^2 + 5^2 + 0^2 + 0^2 + 5^2}{10}} = 6,71 \quad (\text{Eq. 5.2})$$

Sendo que:

$ID_n = 0$ corresponde a uma ação perfeitamente compatível

$ID_n = 10$ corresponde a uma ação perfeitamente incompatível

O valor obtido ($ID_n = 6,71$) encontra-se entre uma situação intermédia de compatibilidade e o limite do perfeitamente incompatível, sendo que se encontra mais próximo do patamar classificativo intermédio ($ID_n = 5$).

Delgado Rodrigues e Grossi (2007) referem que as regras sugeridas para o processo de classificação constituem uma primeira abordagem ao problema e apesar de algumas serem suportadas por dados experimentais disponíveis em artigos de investigação, outras baseiam-se apenas em raciocínio lógico. Isto significa que é necessário desenvolver mais pesquisa para validar e calibrar o sistema, de forma a que se possa desenvolver uma metodologia forte e devidamente suportada (Delgado Rodrigues e Grossi, 2007). Assim sendo, devem analisar-se criticamente os resultados obtidos, no intuito duma possível redefinição das classificações individuais conferidas a cada indicador de compatibilidade.

Relativamente à diferença total de cor, o valor obtido ($\Delta E^* = 5,91$) encontra-se no limiar do que é considerado aceitável ($\Delta E^* < 5$), pelo que a atribuição da classificação de 10 poderá constituir uma leitura demasiado penalizadora. A inspeção visual efetuada nos provetes cerâmicos, antes da aplicação do consolidante e após o período de cura do mesmo, aquando da realização do ensaio de caracterização colorimétrica, não revelou uma diferença visual extremamente pronunciada, tal como se pode observar na Figura 5.21.



Figura 5.21 – Provetes antes e após tratamento consolidante – ensaio de caracterização colorimétrica.

É evidente que ocorreu um escurecimento e homogeneização da superfície tratada, mas não ao ponto de atribuir nível alto de incompatibilidade a este parâmetro. O critério de classificação proposto por Delgado Rodrigues e Grossi (2007) para este indicador de compatibilidade revela-se, talvez, muito exigente, pelo que se sugere a seguinte escala de classificação (Tabela 5.16).

Tabela 5.16 - Proposta de classificação para o indicador de compatibilidade ΔE^* .

Critério	Indicador de compatibilidade	Riscos de Incompatibilidade (escala de classificação)
Propriedades Visuais	Diferença total de cor (ΔE^*)	Menor que 3 → 0
		Entre 3 e 6 → 5
		Maior que 6 → 10

No que se refere às características mecânicas, a resistência à flexão, a resistência à compressão e a velocidade de propagação de ultra-sons apresentam risco de incompatibilidade = 0 e a resistência à perfuração apresenta risco de incompatibilidade = 10, o que constitui uma grande discrepância entre classificações atribuídas a indicadores de compatibilidade da mesma natureza (ensaios mecânicos). Esta discrepância poderá dever-se ao facto do ensaio de perfuração controlada apresentar maior incerteza de resultados, pelo que seria necessário efetuar uma investigação mais profunda, através da realização de mais ensaios, no sentido duma melhor compreensão da correlação entre os vários resultados. Desta forma, seria possível efetuar uma apreciação devidamente fundamentada, relativamente à adequação da escala de classificação atribuída ao indicador de compatibilidade - resistência à perfuração.

Com base na nova proposta de classificação atribuída ao indicador de compatibilidade ΔE^* , o grau de incompatibilidade foi recalculado:

$$ID_n = \sqrt{\frac{5^2 + 0^2 + 0^2 + 10^2 + 10^2 + 10^2 + 5^2 + 0^2 + 0^2 + 5^2}{10}} = 6,12 \quad (\text{Eq. 5.3})$$

O resultado obtido ($ID_n = 6,12$) encontra-se ainda mais próximo de um nível intermédio de compatibilidade, o que constitui uma melhoria relativamente ao primeiro cálculo efetuado ($ID_n = 6,71$).

Uma outra abordagem, seria efetuar uma média aritmética das classificações atribuídas a cada indicador de compatibilidade, em vez duma média quadrática, tal com foi proposto por Delgado Rodrigues e Grossi (2007). Esta sugestão é feita uma vez que a média quadrática “amplifica” as classificações penalizadoras (10) e desvaloriza as classificações favoráveis (0), enquanto que a média aritmética atribui o mesmo peso a todas as classificações.

Assim, tem-se:

$$ID_n = \frac{5 + 0 + 0 + 10 + 10 + 10 + 5 + 0 + 0 + 5}{10} = 4,5 \quad (\text{Eq. 5.4})$$

O resultado obtido ($ID_n = 4,5$) encontra-se entre o extremo do perfeitamente compatível e um nível intermédio de compatibilidade.

Analisando os três ID_n determinados, verifica-se que os dois primeiros cálculos, respetivamente, $ID_n = 6,71$ e $ID_n = 6,12$, se encontram entre uma situação intermédia de compatibilidade ($ID_n = 5$) e o limite do perfeitamente incompatível ($ID_n = 10$), ainda que ambos se situem mais próximos do patamar classificativo intermédio. O último ID_n calculado ($ID_n = 4,5$), corresponde um grau de incompatibilidade mais próximo do extremo do perfeitamente compatível ($ID_n = 0$), do que os anteriores. Ainda que os três cálculos anteriormente referidos apresentem alguma dispersão de resultados, em termos de apreciação global da potencial nocividade, pode concluir-se que o tratamento consolidante com o

silicato de etilo Silres BS OH 100, aplicado a provetes cerâmicos, gerou um grau de incompatibilidade moderado.

O sistema de avaliação originalmente proposto por Delgado Rodrigues e Grossi (2007) pode revelar-se mais adequado numa situação de análise comparativa entre duas ou mais ações de conservação, na medida em que seriam incorporados, no cálculo do ID_n , exatamente os mesmos indicadores de compatibilidade para todas as ações de conservação estudadas. Assim, seria possível aferir qual a ação mais compatível, sendo um sistema de classificação a considerar quando há necessidade de se proceder a uma intervenção de conservação e não se sabe qual o produto disponível no mercado mais adequado ao substrato.

A redefinição da escala de classificação atribuída ao indicador de compatibilidade ΔE^* e a alternativa proposta para o cálculo matemático do ID_n (média aritmética), constituíram tentativas de calibração do modelo proposto por Delgado Rodrigues e Grossi (2007), sendo que para a validação de um modelo mais fiável, seria necessária maior quantidade de dados experimentais. No âmbito das propostas para desenvolvimentos futuros, o ensaio de outros métodos de aplicação e de mais produtos consolidantes, poderá contribuir para construir uma metodologia fortemente suportada, aplicada a materiais cerâmicos.

6 – Conclusões e propostas para desenvolvimentos futuros

6.1 Conclusões gerais

Os ensaios de caracterização física e de velocidade de propagação de ultra-sons, executados no âmbito da análise e caracterização dos tijolos cerâmicos, demonstraram elevada heterogeneidade dos mesmos. A elevada heterogeneidade das propriedades determinadas em tijolos cerâmicos é uma característica frequentemente associada a este tipo de material, resultado dos processos de produção artesanais, da variabilidade na mineralogia da matéria prima, temperatura de cozedura e atmosfera de secagem.

A amostra de tijolos cerâmicos selecionada, apresentou bastante variabilidade nos valores de porosidade, massas volúmicas real e aparente e teor em água máximo. Os valores do teor em água após 48h de imersão e do coeficiente de saturação determinados, foram indicadores de que os tijolos com mais baixo valor de porosidade apresentam maior dificuldade de saturação. Ainda assim, obtiveram-se valores de coeficiente de saturação elevados, revelando que os tijolos cerâmicos possuem uma rede porosa com boa interconetividade.

A absorção de água por capilaridade refletiu, mais uma vez, a heterogeneidade da amostra estudada. Os valores de porosidade tiveram influência nesta propriedade, na medida em que os tijolos menos porosos apresentaram menor capacidade em absorver água por capilaridade.

Os ensaios de absorção de água por capilaridade e de determinação da velocidade de propagação de ultra-sons, foram executados segundo três direções e denunciaram alguma anisotropia nos tijolos cerâmicos, causada pelo processo de conformação associado à sua produção (prensagem segundo a direção T2). Os valores do coeficiente de capilaridade determinados para as três direções de capilaridade analisadas, indicaram a existência de um comportamento anisotrópico pouco pronunciado. Por outro lado, as velocidades de propagação de ultra-sons, analisadas também segundo essas três direções, foram reveladoras de um maior nível de anisotropia dos tijolos e sugerem a existência de um espaço poroso constituído por uma rede porosa aberta, em parte formado por fissuras.

A aplicação do produto consolidante foi feita por pincelagem, o que demonstrou ser um método adequado, uma vez que o produto penetrou no interior do provete com relativa facilidade. Ainda assim, as quantidades absorvidas de produto e respetivos consumos, a cada fase de aplicação, foram muito discrepantes, o que torna evidente que a adoção de um procedimento “normalizado” neste tipo de casos é extremamente difícil de implementar.

A avaliação da potencial nocividade da ação consolidante foi elaborada com base nos resultados obtidos em provetes tratados e não tratados, tanto no decorrer da presente dissertação, como no trabalho desenvolvido por Ribeiro (2016). No presente trabalho foram executados ensaios de

caracterização colorimétrica, de determinação de porosidade acessível à água, absorção de água por capilaridade, cinética de secagem e permeabilidade ao vapor de água, enquanto que Ribeiro (2016) determinou a velocidade de propagação de ultra-sons, a resistência mecânica à flexão e à compressão e a resistência à perfuração controlada.

No que respeita às alterações de cor, o tratamento consolidante foi responsável por variações perceptíveis à vista humana ($\Delta E^* > 3$), em todos os provetes. Verificou-se que o tratamento deu origem ao escurecimento da superfície e a situações de mudança de cor para o extremo mais vermelho e amarelo (modelo de representação de cores CIELAB).

A determinação da porosidade e do teor em água máximo demonstraram a presença de produto consolidante, uma vez que os valores dos provetes não tratados relativamente aos provetes tratados reduziram. Tal deve-se ao facto do tratamento consolidante ter originado diminuição do volume de vazios, através da precipitação do produto no interior dos poros dos provetes.

O ensaio de absorção de água por capilaridade revelou uma diminuição do coeficiente de capilaridade, dos provetes tratados em relação aos provetes não tratados, muito significativa, o que corresponde a uma redução na velocidade de absorção de água por capilaridade, por parte dos provetes tratados, muito considerável. Este tipo de ocorrência pode ter como justificação, o facto do tratamento consolidante ter reduzido a interconetividade da rede porosa do provete.

A quantificação das alterações desencadeadas pelo produto consolidante em termos da cinética de secagem e da permeabilidade ao vapor de água conduziram a informação semelhante, no que se refere ao potencial nocivo do tratamento, permitindo verificar que em ambos os casos, o tratamento foi responsável pela redução da capacidade inicial de “respiração” dos provetes.

A avaliação da potencial nocividade do tratamento consolidante permitiu verificar que este foi responsável por alterações relacionadas com a mudança de cor e com a presença e movimento de água no suporte mais significativas do que as alterações registadas por Ribeiro (2006), onde o incremento de coesão promovido pelo tratamento não foi tão evidente.

Em termos de apreciação global da potencial nocividade, e recorrendo ao sistema de avaliação proposto por Delgado Rodrigues e Grossi (2007), verifica-se que o tratamento consolidante com o silicato de etilo Silres BS OH 100, aplicado a provetes cerâmicos, gerou um grau de incompatibilidade moderado.

6.2 Proposta para desenvolvimentos futuros

No decorrer do presente estudo, foram sendo identificados outros aspetos interessantes a desenvolver da sequência do tema, que não puderam ser incluídos nos trabalhos em curso. Assim, apresentam-se algumas possíveis abordagens, a desenvolver em trabalhos futuros:

- Estudar outros métodos de aplicação do produto consolidante: imersão, pulverização, capilaridade e compressas;
- Estudar a aplicação de produtos consolidantes de diferente natureza;
- Estender o estudo a uma amostra de tijolos cerâmicos de menor porosidade e a uma amostra de antigos de constituição e características distintas;
- Desenvolvimento de trabalhos específicos que definam procedimentos de aplicação normalizados, de produtos consolidantes aplicados a materiais cerâmicos;
- Desenvolvimento de metodologias específicas em como integrar resultados experimentais num processo de decisão para avaliação do potencial nocivo de um tratamento consolidante, aplicado a materiais cerâmicos;
- Proceder à avaliação da durabilidade do tratamento consolidante utilizado, através de processos de envelhecimento artificial.

Referências bibliográficas

- Almeida Santos, A. (2013). “*Edifício da Central Tejo em Lisboa – Caracterização dos materiais e suas anomalias*”. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico – Universidade de Lisboa.
- Benavente, D. (2011). “Why pore size is importante in the deterioration of porous stones used in the built heritage”. *Revista de la sociedad española de minerología*, 15, 41-42.
- Brito, V. (2009). “Influência dos revestimentos por pintura na secagem do suporte”. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa.
- Constâncio, C., Franco, L., Russo, A., Anjinho, C. Pires, J., Vaz, M. e Carvalho, A. (2010). “Studies on Polymeric Conservation Treatments of Ceramic Tiles with Paraloid B-72 and Two Alkoxysilanes”. *Wiley InterScience*, 116, 2833-2839.
- Cultrone, G. e Madkour, F. (2013). “Evaluation of the effectiveness of treatment products in improving the quality of ceramics used in new historical buildings”. *Journal of Cultural Heritage*, 14, 304-310.
- Cultrone, G., Sebastián, E., Elert, K., de la Torre, M., Cazalla, O. E Navarro, C. (2004). “Influence of mineralogy and firing temperature on the porosity of bricks”. *Journal of the European Ceramic Society*, 24, 547-564.
- Delgado Rodrigues, J. (2001). “Consolidation of decayed stones. A delicate problem with few practical solutions”. In: Lourenço, P.B., Roca, P. (Eds). *Proceedings of the 3rd international seminar on historical constructions*, Universidade do Minho, Guimarães, 3-14.
- Delgado Rodrigues, J. (2010). “Stone Consolidation: research and practice”. *International Symposium on "Works of Art and Conservation Science Today"*, 1-7.
- Delgado Rodrigues, J. e Grossi, A. (2007). “Indicator and ratings for the compatibility assessment of conservation actions”. *Journal of Cultural Heritage*, 8, 32-43.
- Fernandes, F. M., (2006), "Evaluation of two novel NDT techniques: Microdrilling of clay bricks and ground penetrating radar in masonry" Tese de doutoramento em Engenharia Civil - Universidade do Minho. Referência citada em Fernandes *et al.*, 2010 e Fernandes e Lourenço, 2016 e não consultada directamente.
- Fernandes, F. e Lourenço, P. (2016). “Caracterização de tijolos antigos”. *Kéramica*, N339, 26-36.
- Fernandes, F., Lourenço, P. e Castro, F. (2010). “Ancient Clay Bricks: Manufacture and Properties”. Em *Materials, Technologies and Practice in Historic Heritage Structures* editado por Maria Bostenaru Dan, Foundation ERGOROM, Richard Prikryl e Akos Torok, 29-48.
- Ferreira Pinto, A. e Delgado Rodrigues, J. (2008). “Stone consolidation: The role of treatment procedures”. *Journal of Cultural Heritage*, 9, 38-53.
- Ferreira Pinto, A. (2002). “Conservação de pedras carbonatadas: estudo e selecção de tratamentos”. Tese de doutoramento em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico – Universidade de Lisboa.
- Ferreira, A., Gomes, A. (2009). “*Caraterização de betões no estado endurecido para por recurso a ensaios destrutivos e não destrutivos - Módulo 5*”. Aulas de Laboratório de Materiais de construção II.

Franzoni, E., Leemann, A., Pigino, B. e Lura, P. (2013). "Use of TEOS for fired-clay bricks consolidation". *Materials and Structures*, 47, 1175-1184.

Franzoni, E., Sassoni, E. e Graziani, G. (2016). "An innovative phosphate-based consolidant for limestone. Part 1: Effectiveness and compatibility in comparison with ethyl silicate". *Construction and Building Materials*, 102, 918-930.

Freitas, V. (1992). "*Transferência de humidade em paredes de edifícios. Análise do fenómeno na interface*". Tese de doutoramento em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia – Universidade do Porto.

Freitas, V., Torres, M., Guimarães, A. (2008). "Humidade Ascensional". FEUP edições. Referência citada em Brito, V. (2009) e não consultada diretamente.

Gonçalves, T. D. (2007). "Salt crystallization in plastered or rendered walls". Tese de doutoramento em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico – Universidade de Lisboa.

Hall, C., Hoff, W. (2002). "Water transport in brick, stone and concrete". Spon Press. Referência citada em Almeida Santos, A. (2013) e não consultada diretamente.

Luo, Y., Xiao, L. e Zhang, X. (2015). "Characterization of TEOS/PDMS/HA nanocomposites for application as consolidant/hydrophobic products on sandstones". *Journal of Cultural Heritage*, 16, 470-478.

Luque, A., Cultrone, G., Sebastián, E. e Cazalla, O. (2008). "Evaluación de la eficacia de tratamientos en el incremento de la durabilidad de una calcareña bioclástica". *Materialies de Construcción*, 58, 115-128.

Rato, V. (2006). "Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas". Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologias.

Revez, J., Costa, D. e Delgado Rodrigues, J. (2008). "Effects of TEOS-based consolidants on ancient paving tiles". *International Symposium on "Stone Consolidation in Cultural Heritage. Research and Practice"*, 336-378.

Ribeiro, L. (2016). "Estudo de tratamentos de consolidação de materiais cerâmicos - Avaliação da eficácia". Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico – Universidade de Lisboa.

RILEM Test No. I.1 – Porosity accessible to water. RILEM 25-PEM 1980 – Recommendations provisoires. Essais recommandés pour mesurer l'altération des pierres et évaluer l'efficacité des methods de traitement. *Matériaux et Construction*, Vol.13, N°75.

RILEM Test No. II.2 – Coefficient of water vapour conductivity. RILEM 25-PEM 1980 – Recommendations provisoires. Essais recommandés pour mesurer l'altération des pierres et évaluer l'efficacité des methods de traitement. *Matériaux et Construction*, Vol.13, N°75.

RILEM Test No. II.5 - Evaporation Curve. RILEM 25-PEM 1980 – Recommendations provisoires. Essais recommandés pour mesurer l'altération des pierres et évaluer l'efficacité des methods de traitement. *Matériaux et Construction*, Vol.13, N°75.

RILEM Test No. II.6 – Water absorption coefficient. RILEM 25-PEM 1980 – Recommendations provisoires. Essais recommandés pour mesurer l'altération des pierres et évaluer l'efficacité des methods de traitement. *Matériaux et Construction*, Vol.13, N°75.

Wacker. (2014). "Technical data sheet for Silres BS OH 100". Wacker Chemic AG, 1-3.

Sites consultados

[w1] - http://www.esalq.usp.br/departamentos/leb/aulas/lce200/Tabela_Pressao_de_vapor_saturado_lie.pdf, consultado em Junho 2016

[w2] - <http://reproducaodacor.blogspot.pt/2012/09/modelo-cie-lab.html>, consultado em Abril 2017

Anexos

Anexo I – Análise e caracterização dos tijolos cerâmicos

Porosidade, massas volúmicas, teor em água máximo e após 48h de imersão, e coeficiente de saturação

Tijolo Inteiro nº	Porosidade P[%]	Massa Volúmica		Teor em água		Coef. Saturação CS[%]
		Real	Aparente	máximo	às 48 horas	
		M _{vol.real} [kg/m ³]	M _{vol.aparente} [kg/m ³]	W _{máx} [%]	W _{48h} [%]	
1	20,1	2600	2078	9,7	7,8	80,8
2	19,5	2595	2089	9,3	7,5	80,6
3	20,2	2599	2074	9,7	8,0	81,9
4	20,1	2603	2079	9,7	7,9	81,9
5	17,9	2578	2117	8,4	-	-
6	21,0	2614	2064	10,2	-	-
7	19,4	2595	2090	9,3	-	-
8	18,3	2569	2098	8,7	-	-
9	20,2	2596	2071	9,8	7,9	80,4
10	20,9	2599	2055	10,2	8,3	81,1
11	16,8	2557	2129	7,9	5,7	72,9
12	20,0	2597	2077	9,6	7,8	80,6
13	20,1	2600	2076	9,7	-	-
14	20,4	2601	2070	9,9	8,1	82,3
15	21,8	2604	2036	10,7	9,0	83,9
16	15,4	2544	2153	7,1	5,3	74,6
17	20,4	2607	2075	9,8	8,2	83,0
18	16,7	2563	2135	7,8	5,9	75,6
19	18,2	2585	2115	8,6	6,9	80,1
20	20,3	2602	2074	9,8	7,9	80,9
21	17,1	2572	2132	8,0	6,2	77,4
22	21,2	2610	2057	10,3	8,5	82,5
23	19,9	2595	2079	9,6	7,9	82,2
24	21,1	2602	2052	10,3	8,3	80,3
25	20,0	2574	2059	9,7	-	-
26	17,3	2535	2095	8,3	-	-
27	15,8	2516	2119	7,5	-	-
28	16,0	2521	2118	7,5	-	-
29	14,1	2505	2152	6,6	-	-
30	18,5	2565	2089	8,9	-	-
31	17,7	2582	2125	8,3	-	-
32	16,1	2541	2131	7,6	-	-
33	21,0	2611	2063	10,2	-	-
34	19,3	2585	2086	9,3	-	-
35	16,3	2557	2141	7,6	-	-
36	19,5	2596	2091	9,3	-	-
37	18,9	2590	2099	9,0	-	-
38	20,8	2609	2067	10,1	-	-
39	20,0	2606	2085	9,6	-	-
40	18,5	2586	2107	8,8	-	-
41	17,8	2581	2121	8,4	-	-
42	19,7	2597	2085	9,5	-	-
43	19,3	2588	2088	9,3	-	-
44	16,7	2561	2134	7,8	-	-
45	19,6	2595	2087	9,4	-	-
46	20,3	2602	2074	9,8	-	-
47	21,0	2616	2066	10,2	-	-
48	20,6	2607	2070	9,9	-	-
49	17,1	2568	2127	8,1	-	-
50	19,6	2601	2091	9,4	-	-
51	19,4	2601	2098	9,2	-	-
52	21,1	2611	2060	10,2	-	-
53	20,4	2604	2074	9,8	-	-

Coeficiente de capilaridade e valores assintóticos

Tijolo inteiro nº	Longitudinal		T1		T2	
	CC [kg/m ² .s ^{0.5}]	VA [kg/m ²]	CC [kg/m ² .s ^{0.5}]	VA [kg/m ²]	CC [kg/m ² .s ^{0.5}]	VA [kg/m ²]
10	0,1035	32,1	0,1437	8,0	0,0879	6,7
12	0,0815	31,1	0,0752	7,8	0,0754	6,5
13	0,103	31,7	0,0859	7,6	0,0873	6,3
14	0,1069	33,1	0,1011	8,0	0,1057	6,6
15	0,1451	35,4	0,1437	8,6	0,1206	7,0
17	0,1011	32,9	0,0937	8,0	0,0925	6,7
20	0,0996	30,3	0,0954	7,3	0,1094	6,0
22	0,103	34,6	0,112	8,5	0,0904	6,9
23	0,0786	31,8	0,0851	7,9	0,0781	6,4
24	0,1379	34,2	0,1146	8,4	0,11	6,9
25	0,116	33,6	0,0945	8,2	0,0908	6,7

Velocidade de propagação de ultra-sons

Tijolo inteiro nº	Velocidade (m/s)					
	Longitudinal		T1		T2	
	seco	saturado	seco	saturado	seco	saturado
9	3460	3510	2990	3330	2720	2720
	3430	3610	2970	3360	2600	2630
	3400	3500	2970	3270	2550	2630
10	3150	3290	3010	3200	2530	2680
	3110	3240	2970	3160	2500	2700
	3110	3210	3010	3080	2560	2600
11	3600	3720	3400	3740	3170	3450
	3610	3700	3380	3710	3130	3480
	3570	3690	3330	3680	3150	3510
12	3340	3450	3180	3330	2700	2820
	3320	3410	3140	3310	2760	2800
	3300	3410	3120	3310	2760	2820
16	3430	3690	3160	3220	2500	2650
	3420	3640	3100	3160	2330	2700
	3410	3550	3060	3160	2330	2720
27	3320	3530	3160	3480	3030	3360
	3330	3470	3180	3310	2900	3280
	3340	3470	3140	3200	2820	3200
28	3470	3610	3360	3500	3360	3570
	3370	3610	3270	3400	3150	3480
	3450	3660	3200	3290	2990	3450
29	3590	3760	3400	3630	2880	3280
	3590	3720	3310	3660	2800	3250
	3620	3670	3290	3600	2900	3310

Anexo II – Ação do tratamento consolidante

Registo de massa e de teor em água antes do tratamento

Provet e	1º dia	2º dia (após 17 horas em câmara húmida)		3º dia (após 24h em película aderente)		4º dia (após 24h sem película aderente)		5º dia		8º dia		9º dia (1º dia de aplicação do consolidante)		10º dia (2º dia aplicação do consolidante)	
	Massa seca (g)	Massa (g)	teor em água (%)	Massa (g)	teor em água (%)	Massa (g)	teor em água (%)	Massa (g)	teor em água (%)	Massa (g)	teor em água (%)	Massa (g)	teor em água (%)	Massa (g)	teor em água (%)
1.3	305,76	306,47	0,232	306,33	0,186	306,14	0,124	306,13	0,121	306,16	0,131	306,17	0,134	-	-
4.3	288,24	289,22	0,340	289,05	0,281	288,85	0,212	288,83	0,205	288,84	0,208	288,86	0,215	-	-
9.3	311,09	312,3	0,389	312,15	0,341	311,95	0,276	311,93	0,270	311,94	0,273	311,96	0,280	311,97	0,283
12.3	304,17	305,24	0,352	305,06	0,293	304,86	0,227	304,85	0,224	304,85	0,224	304,87	0,230	304,87	0,230
13.3	292,26	293,33	0,366	293,2	0,322	293,01	0,257	293	0,253	293,01	0,257	293,03	0,263	293,03	0,263
20.3	276,19	277,12	0,337	276,93	0,268	276,76	0,206	276,74	0,199	276,75	0,203	276,77	0,210	276,78	0,214

Porosidade e teor em água máximo

Provetes não tratados		
Provet e	Porosidade P[%]	Teor em água máximo $W_{máx}$ [%]
1.1	20,7	10,0
1.2	20,6	9,9
4.1	20,9	10,1
4.2	20,7	9,9
9.1	20,7	10,0
9.2	20,7	10,0
12.1	20,7	10,0
12.2	20,4	9,8
13.1	21,3	10,3
13.2	20,5	9,8
20.1	20,3	9,7
20.2	20,6	9,9
Provetes tratados		
Provet e	Porosidade P[%]	Teor em água máximo $W_{máx}$ [%]
1.3.1	18,4	8,7
1.3.2	18,3	8,7
4.3.1	18,5	8,7
4.3.2	18,6	8,8
9.3.1	19,0	9,0
9.3.2	19,2	9,2
12.3.1	18,4	8,7
12.3.2	18,8	8,9
13.3.1	18,3	8,6
13.3.2	18,5	8,7
20.3.1	19,0	9,0
20.3.2	18,8	8,9

Ensaio de absorção de água por capilaridade – Registo de massa e franja líquida

<i>Provetes tratados</i>												
Tempo (\sqrt{s})	1.3.1		1.3.2		4.3.1		4.3.2		9.3.1		9.3.2	
	m (g)	h franja liq (cm)	m (g)	h franja liq (cm)	m (g)	h franja liq (cm)	m (g)	h franja liq (cm)	m (g)	h franja liq (cm)	m (g)	h franja liq (cm)
0	145,4	0	153,14	0	143,96	0	137,78	0	165,17	0	139,25	0
8	145,75	0,2	153,41	0,2	144,21	0,2	138,06	0,2	165,58	0,2	139,53	0,2
13	146,01	0,35	153,57	0,3	144,34	0,3	138,21	0,33	165,82	0,3	139,68	0,3
17	146,12	0,4	153,67	0,35	144,53	0,43	138,35	0,38	166,05	0,4	139,82	0,4
24	146,27	0,55	153,87	0,43	144,84	0,6	138,6	0,73	166,33	0,75	139,99	0,58
30	146,46	0,73	154,06	0,73	145,11	0,78	138,8	0,93	166,58	0,98	140,16	0,68
42	146,72	0,83	154,55	0,78	145,65	1,05	139,14	1,13	167,02	1,08	140,51	0,83
60	147,14	1,15	155,2	1,05	146,42	1,56	139,65	1,36	167,65	1,66	141	1,18
85	147,75	1,45	155,89	1,3	147,48	1,75	140,75	1,75	168,66	1,75	141,74	1,43
104	148,21	1,73	156,37	1,48	148,55	2,08	141,64	2,18	169,46	2,18	142,33	1,75
134	148,99	1,98	157,11	1,8	150,37	2,73	143,52	2,73	170,86	2,73	143,4	2,2
159	150,03	2,73	157,97	2,48	152,17	3,93	145,27	3,8	172,28	3,8	144,51	2,8
294	154,71	4,95	162,42	4,95	153,54	4,95	146,96	4,93	176,56	5,18	148,95	5,18
416	155,27	4,95	162,92	4,95	154,08	4,95	147,43	4,93	177,04	5,18	149,32	5,18
509	155,58	4,95	163,24	4,95	154,26	4,95	147,64	4,93	177,32	5,18	149,54	5,18
588	155,65	4,95	163,38	4,95	154,36	4,95	147,75	4,93	177,55	5,18	149,72	5,18
720	155,89	4,95	163,73	4,95	154,55	4,95	147,96	4,93	177,87	5,18	150,03	5,18
778	155,95	4,95	163,81	4,95	154,6	4,95	148	4,93	177,92	5,18	150,08	5,18
831	156,01	4,95	163,89	4,95	154,63	4,95	148,03	4,93	177,96	5,18	150,12	5,18
Tempo (\sqrt{s})	12.3.1		12.3.2		13.3.1		13.3.2		20.3.1		20.3.2	
	m (g)	h franja liq (cm)	m (g)	h franja liq (cm)	m (g)	h franja liq (cm)	m (g)	h franja liq (cm)	m (g)	h franja liq (cm)	m (g)	h franja liq (cm)
0	151,59	0	146,19	0	142,21	0	140,98	0	134,56	0	134,99	0
8	152,06	0,2	146,62	0,2	142,52	0,2	141,69	0,25	135,38	0,28	135,4	0,2
13	152,32	0,35	146,87	0,35	142,66	0,3	142,11	0,4	135,76	0,48	135,64	0,3
17	152,6	0,45	147,09	0,4	142,78	0,4	142,5	0,5	136,12	0,6	135,87	0,4
24	152,91	0,83	147,34	0,65	142,93	0,55	142,94	0,7	136,64	0,75	136,16	0,6
30	153,2	1,03	147,55	0,88	143,096	0,75	143,41	1,45	137,18	1,55	136,53	1,03
42	153,7	1,18	147,87	0,93	143,43	1,05	144,13	1,68	138,01	1,95	137,1	1,35
60	155,01	1,7	148,37	1,35	143,99	1,48	145,24	2,28	139,06	2,83	137,9	1,75
85	156,47	2,16	149,07	1,55	144,86	1,58	146,9	2,88	140,51	3,3	138,91	2,23
104	157,57	3,23	149,67	2	145,86	2,05	148,46	3,85	141,78	4,23	139,68	2,58
134	159,31	3,58	150,76	2,38	147,33	2,53	149,59	5	142,69	4,48	141,04	4,9
159	160,77	4,9	151,89	4,83	148,74	3,3	149,65	5,1	142,77	4,93	142,32	5
294	161,51	4,9	155,99	4,98	151,65	5,07	150,28	5,1	143,38	4,95	143,38	5
416	161,98	4,9	156,42	4,98	152,05	5,07	150,72	5,1	143,91	4,95	144,14	5
509	162,19	4,9	156,66	4,98	152,25	5,07	150,87	5,1	144,1	4,95	144,36	5
588	162,37	4,9	156,93	4,98	152,44	5,07	151,05	5,1	144,29	4,95	144,58	5
720	162,58	4,9	157,18	4,98	152,63	5,07	151,23	5,1	144,48	4,95	144,79	5
778	162,64	4,9	157,24	4,98	152,67	5,07	151,28	5,1	144,56	4,95	144,84	5
831	162,67	4,9	157,26	4,98	152,7	5,07	151,34	5,1	144,61	4,95	144,87	5

Provetes não tratados												
Tempo (\sqrt{s})	1.1		1.2		4.1		4.2		9.1		9.2	
	m (g)	h franja liq (cm)	m (g)	h franja liq (cm)	m (g)	h franja liq (cm)	m (g)	h franja liq (cm)	m (g)	h franja liq (cm)	m (g)	h franja liq (cm)
0	143,31	0	148,39	0	134,73	0	135,08	0	150,16	0	161,1	0
8	144,5	0,73	149,51	0,68	136	0,9	135,81	0,65	151,75	0,98	162,34	0,8
13	145,39	1,25	150,1	1,03	136,97	1,4	136,33	0,9	152,79	1,5	163,1	1,2
17	146,2	1,63	150,67	1,33	137,9	1,83	136,85	1,2	153,67	1,9	163,78	1,45
24	147,45	2,2	151,58	1,75	139,44	2,53	137,61	1,55	154,85	2,63	164,75	1,8
30	148,64	2,7	152,41	2,13	140,74	3,28	138,31	1,83	155,96	3,13	165,69	2,3
42	150,58	3,7	153,84	2,8	142,96	4,43	139,68	2,6	157,83	3,95	167,26	2,88
60	153,24	4,83	155,93	3,8	144,18	4,87	141,6	3,63	160,27	4,98	169,62	4,08
85	153,51	4,83	158,21	4,93	144,38	4,87	143,92	4,8	160,55	5	172,23	5
104	153,71	4,83	158,6	4,93	144,55	4,87	144,51	4,87	160,76	5	172,53	5,1
134	153,93	4,83	158,82	4,93	144,79	4,87	144,74	4,87	161,02	5	172,79	5,1
294	154,64	4,83	159,76	4,93	145,47	4,87	145,49	4,87	161,81	5	173,66	5,1
416	154,94	4,83	160,36	4,93	145,72	4,87	146,08	4,87	162,25	5	174,29	5,1
509	155,1	4,83	160,82	4,93	145,9	4,87	146,37	4,87	162,47	5	174,7	5,1
588	155,26	4,83	160,9	4,93	146,01	4,87	146,47	4,87	162,59	5	174,84	5,1
720	155,4	4,83	161,15	4,93	146,19	4,87	146,71	4,87	162,83	5	175,12	5,1
778	155,45	4,83	161,23	4,93	146,21	4,87	146,76	4,87	162,94	5	175,22	5,1
831	155,5	4,83	161,24	4,93	146,27	4,87	146,82	4,87	162,98	5	175,28	5,1
Tempo (\sqrt{s})	12.1		12.2		13.1		13.2		20.1		20.2	
	m (g)	h franja liq (cm)	m (g)	h franja liq (cm)	m (g)	h franja liq (cm)	m (g)	h franja liq (cm)	m (g)	h franja liq (cm)	m (g)	h franja liq (cm)
0	153,37	0	146,26	0	141,31	0	143,3	0	142,43	0	136,61	0
8	154,57	0,78	147,11	0,55	142,6	0,9	144,48	0,8	143,83	0,85	138,65	1,03
13	155,48	1,3	147,61	0,83	143,49	1,43	145,14	1,13	144,58	1,33	140,02	1,58
17	156,31	1,63	148,04	1,03	144,27	1,75	145,74	1,38	145,18	1,6	141,15	2,2
24	157,56	2,2	148,77	1,35	145,31	2,3	146,63	1,88	146,11	2,15	142,72	2,83
30	158,7	2,7	149,44	1,73	146,38	2,78	147,44	2,23	146,94	2,58	144,08	3,45
42	160,61	3,6	150,73	2,43	148,15	3,7	148,8	3	148,31	3,28	145,63	4,03
60	163,23	4,83	152,7	3,33	150,81	4,93	150,93	3,9	150,19	4,18	145,9	4,83
85	164,25	4,9	155,28	4,55	152,29	5,08	153,39	4,95	151,91	4,98	146,16	4,93
104	164,45	4,9	156,32	4,93	152,39	5,08	153,77	5,03	152	4,98	146,35	4,93
134	164,73	4,9	156,56	4,93	152,49	5,08	153,95	5,03	152,27	4,98	146,54	4,93
294	165,59	4,9	157,45	4,93	153,04	5,08	154,56	5,03	153,09	4,98	147,22	4,93
416	166,01	4,9	158,08	4,93	153,31	5,08	155,01	5,03	153,63	4,98	147,48	4,93
509	166,27	4,9	158,47	4,93	153,38	5,08	155,31	5,03	153,95	4,98	147,61	4,93
588	166,32	4,9	158,48	4,93	153,48	5,08	155,45	5,03	154,05	4,98	147,68	4,93
720	166,54	4,9	158,76	4,93	153,65	5,08	155,65	5,03	154,27	4,98	147,86	4,93
778	166,65	4,9	158,83	4,93	153,72	5,08	155,71	5,03	154,36	4,98	147,95	4,93
831	166,68	4,9	158,9	4,93	153,78	5,08	155,74	5,03	154,41	4,98	147,97	4,93

Ensaio de absorção de água por capilaridade - Coeficiente de capilaridade e valores assintóticos

Provetes não tratados			
Provete	Área de contacto do provete com água [cm²]	CC [kg/m².s^{0.5}]	VA [kg/m²]
1.1	14,1	0,120	8,7
1.2	13,9	0,090	9,2
4.1	13,0	0,154	8,9
4.2	13,1	0,082	9,0
9.1	13,7	0,133	9,4
9.2	14,8	0,089	9,6
12.1	14,4	0,116	9,2
12.2	14,4	0,074	8,8
13.1	13,0	0,123	9,6
13.2	13,1	0,091	9,5
20.1	14,1	0,091	8,5
20.2	13,7	0,181	8,3
Provetes tratados			
Provete	Área de contacto do provete com água [cm²]	CC [kg/m².s^{0.5}]	VA [kg/m²]
1.3.1	13,1	0,020	8,1
1.3.2	14,4	0,021	7,4
4.3.1	13,7	0,037	7,8
4.3.2	13,6	0,033	7,6
9.3.1	15,2	0,028	8,4
9.3.2	13,1	0,024	8,3
12.3.1	15,1	0,039	7,4
12.3.2	13,7	0,024	8,1
13.3.1	12,8	0,031	8,2
13.3.2	13,3	0,052	7,8
20.3.1	12,9	0,052	7,8
20.3.2	13,0	0,035	7,6

Cinética de secagem – Registo de massa

Tempo (dias)	Provetes Tratados											
	m (g)											
	1.3.1	1.3.2	4.3.1	4.3.2	9.3.1	9.3.2	12.3.1	12.3.2	13.3.1	13.3.2	20.3.1	20.3.2
0,00	162,31	171,01	160,61	154,16	184,51	156,23	168,9	163,8	158,48	157,64	151	151,21
0,04	162,15	170,82	160,43	153,95	184,32	156,08	168,72	163,59	158,32	157,46	150,83	151,02
0,13	161,86	170,49	160,11	153,65	183,95	155,78	168,44	163,3	158,06	157,13	150,56	150,76
0,25	161,44	170,08	159,7	153,28	183,45	155,34	168,05	162,92	157,69	156,7	150,16	150,37
1	159,02	167,51	157,29	150,96	180,5	152,91	165,6	160,53	155,55	154,18	147,94	148,14
2	156,89	165,14	155,87	149,43	178,26	151,14	163,46	158,72	153,91	152,53	145,73	146,07
3	156,43	164,6	155,5	149,04	177,77	150,75	162,94	158,27	153,44	152,15	145,11	145,59
4	156,17	164,32	155,26	148,8	177,47	150,51	162,64	158	153,16	151,9	144,83	145,34
7	155,62	163,77	154,73	148,27	176,83	149,96	161,97	157,42	152,59	151,33	144,25	144,83
8	155,48	163,62	154,59	148,13	176,66	149,8	161,79	157,27	152,43	151,18	144,1	144,69
9	155,39	163,53	154,5	148,04	176,56	149,71	161,68	157,17	152,34	151,09	144,02	144,61
10	155,29	163,44	154,41	147,95	176,45	149,6	161,55	157,07	152,24	150,99	143,92	144,52
11	155,22	163,36	154,32	147,87	176,35	149,51	161,45	156,98	152,15	150,91	143,84	144,46
14	155,02	163,16	154,13	147,67	176,12	149,3	161,2	156,77	151,95	150,71	143,65	144,27
16	154,83	162,97	153,94	147,48	175,9	149,09	160,96	156,56	151,76	150,51	143,46	144,09
18	154,69	162,83	153,8	147,34	175,74	148,94	160,79	156,41	151,61	150,36	143,33	143,95
21	154,53	162,67	153,66	147,19	175,57	148,78	160,61	156,26	151,47	150,21	143,19	143,82
23	154,4	162,53	153,53	147,06	175,43	148,64	160,45	156,13	151,34	150,08	143,07	143,7
25	154,3	162,43	153,43	146,96	175,31	148,52	160,32	156,02	151,24	149,98	142,97	143,6
28	154,18	162,29	153,3	146,83	175,17	148,39	160,18	155,88	151,11	149,85	142,86	143,48
30	154,09	162,21	153,22	146,76	175,08	148,31	160,1	155,8	151,03	149,77	142,78	143,41
32	154,03	162,15	153,17	146,7	175,02	148,25	160,03	155,75	150,98	149,71	142,75	143,37
35	153,96	162,07	153,09	146,62	174,95	148,17	159,95	155,67	150,91	149,64	142,67	143,29
37	153,86	161,97	153	146,53	174,84	148,07	159,85	155,57	150,8	149,54	142,57	143,18
39	153,79	161,9	152,92	146,45	174,77	147,99	159,76	155,5	150,74	149,47	142,5	143,12
42	153,7	161,79	152,82	146,35	174,64	147,87	159,63	155,37	150,63	149,36	142,41	143,03
44	153,61	161,69	152,74	146,28	174,57	147,8	159,57	155,32	150,57	149,29	142,34	142,97
46	153,53	161,61	152,66	146,19	174,48	147,71	159,47	155,22	150,48	149,19	142,26	142,87
49	153,37	161,44	152,5	146,03	174,3	147,55	159,3	155,06	150,34	149,04	142,12	142,73
51	153,29	161,35	152,42	145,95	174,22	147,47	159,22	154,98	150,26	148,96	142,04	142,65
53	153,21	161,26	152,35	145,87	174,14	147,39	159,13	154,9	150,18	148,88	141,96	142,56
57	153,06	161,09	152,19	145,71	173,97	147,23	158,96	154,74	150,03	148,71	141,81	142,42
60	152,94	160,97	152,08	145,59	173,85	147,11	158,85	154,62	149,92	148,61	141,71	142,33
64	152,85	160,87	151,99	145,5	173,75	147,01	158,76	154,54	149,83	148,53	141,64	142,24
67	152,77	160,77	151,9	145,41	173,65	146,92	158,67	154,44	149,75	148,43	141,55	142,16
71	152,6	160,6	151,75	145,25	173,48	146,76	158,51	154,28	149,61	148,28	141,41	142
74	152,5	160,49	151,65	145,16	173,38	146,67	158,42	154,19	149,52	148,19	141,32	141,91
78	152,33	160,31	151,49	144,99	173,19	146,49	158,23	153,99	149,36	148,02	141,16	141,75
81	152,2	160,17	151,36	144,85	173,03	146,34	158,08	153,85	149,22	147,88	141,02	141,62
85	152,08	160,05	151,23	144,73	172,91	146,24	157,98	153,73	149,12	147,78	140,93	141,53
88	152,05	160	151,15	144,7	172,86	146,18	157,95	153,67	149,08	147,73	140,89	141,49
93	151,94	159,87	151,01	144,59	172,75	146,09	157,87	153,57	148,98	147,64	140,81	141,4
100	151,75	159,65	150,83	144,4	172,53	145,89	157,73	153,37	148,86	147,52	140,66	141,25
108	151,59	159,47	150,64	144,22	172,34	145,73	157,62	153,19	148,69	147,38	140,55	141,09
112	151,48	159,35	150,54	144,12	172,22	145,63	157,53	153,08	148,6	147,29	140,46	140,99

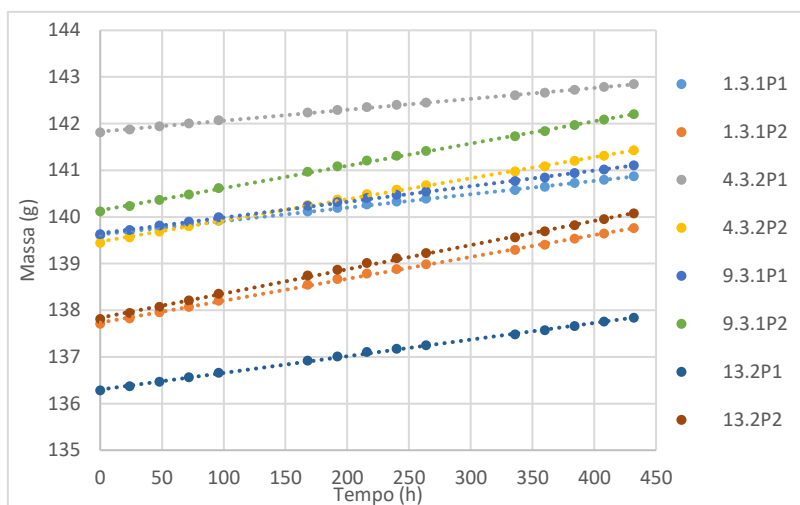
Tempo (dias)	<i>Provetes não tratados</i>											
	<i>m (g)</i>											
	<i>1.1</i>	<i>1.2</i>	<i>4.1</i>	<i>4.2</i>	<i>9.1</i>	<i>9.2</i>	<i>12.1</i>	<i>12.2</i>	<i>13.1</i>	<i>13.2</i>	<i>20.1</i>	<i>20.2</i>
0,00	161,95	167,38	152,23	152,34	169,13	181,77	172,77	165,27	160,38	161,91	160,27	154,37
0,04	161,78	167,21	152,06	152,18	168,95	181,59	172,59	165,1	160,2	161,76	160,09	154,19
0,13	161,51	166,92	151,8	151,91	168,67	181,27	172,29	164,79	159,93	161,48	159,81	153,91
0,25	161,12	166,52	151,44	151,5	168,24	180,8	171,86	164,35	159,45	161,01	159,36	153,47
1	158,76	164,17	149,36	149,28	165,9	178,25	169,45	161,93	157,11	158,65	157,04	151,18
2	156,33	161,72	147,18	146,96	163,48	175,61	166,96	159,49	154,74	156,28	154,69	148,89
3	154,7	159,94	145,48	145,51	161,89	173,78	165,49	158,32	152,88	154,76	153,46	147,36
4	154,24	159,4	145	145,08	161,36	173,22	165,05	157,87	152,28	154,26	153,04	146,87
7	153,49	158,61	144,28	144,44	160,54	172,34	164,26	157,11	151,43	153,5	152,4	146,17
8	153,31	158,42	144,1	144,28	160,34	172,12	164,07	156,91	151,23	153,31	152,23	145,98
9	153,2	158,31	144	144,18	160,22	171,99	163,95	156,79	151,12	153,2	152,14	145,88
10	153,08	158,2	143,89	144,08	160,09	171,84	163,81	156,66	150,99	153,08	152,03	145,78
11	152,99	158,1	143,8	144,01	160	171,73	163,71	156,56	150,89	152,97	151,95	145,68
14	152,77	157,88	143,58	143,8	159,74	171,44	163,44	156,32	150,64	152,73	151,74	145,46
16	152,55	157,67	143,37	143,6	159,49	171,17	163,18	156,08	150,39	152,49	151,52	145,24
18	152,38	157,49	143,19	143,45	159,31	170,97	163	155,91	150,24	152,34	151,37	145,09
21	152,22	157,33	143,02	143,29	159,12	170,76	162,8	155,72	150,07	152,17	151,19	144,93
23	152,08	157,2	142,88	143,16	158,96	170,59	162,64	155,57	149,93	152,02	151,06	144,79
25	151,96	157,08	142,76	143,06	158,84	170,46	162,51	155,46	149,81	151,91	150,95	144,68
28	151,82	156,96	142,63	142,93	158,69	170,3	162,36	155,32	149,68	151,78	150,81	144,56
30	151,73	156,87	142,53	142,85	158,58	170,19	162,25	155,21	149,58	151,69	150,72	144,46
32	151,68	156,81	142,47	142,79	158,51	170,12	162,18	155,16	149,52	151,63	150,65	144,4
35	151,6	156,73	142,39	142,72	158,43	170,02	162,09	155,06	149,44	151,55	150,57	144,33
37	151,49	156,63	142,29	142,62	158,31	169,91	161,97	154,95	149,34	151,44	150,47	144,23
39	151,41	156,56	142,22	142,55	158,23	169,82	161,88	154,88	149,27	151,38	150,4	144,16
42	151,3	156,45	142,1	142,45	158,1	169,7	161,76	154,76	149,16	151,26	150,28	144,06
44	151,23	156,38	142,04	142,39	158,04	169,62	161,68	154,69	149,11	151,21	150,22	144
46	151,13	156,28	141,94	142,29	157,93	169,5	161,57	154,59	149	151,11	150,11	143,9
49	150,98	156,14	141,78	142,15	157,76	169,33	161,4	154,43	148,85	150,96	149,96	143,75
51	150,89	156,06	141,7	142,08	157,68	169,24	161,31	154,35	148,79	150,89	149,88	143,68
53	150,79	155,97	141,62	142	157,59	169,15	161,22	154,26	148,72	150,81	149,79	143,6
57	150,62	155,8	141,44	141,82	157,4	168,94	161,02	154,08	148,54	150,64	149,61	143,44
60	150,51	155,69	141,34	141,72	157,29	168,83	160,9	153,97	148,44	150,54	149,51	143,34
64	150,4	155,59	141,23	141,63	157,18	168,72	160,79	153,86	148,35	150,45	149,41	143,23
67	150,32	155,51	141,15	141,56	157,08	168,63	160,7	153,77	148,29	150,38	149,32	143,14
71	150,16	155,34	141	141,41	156,9	168,46	160,52	153,62	148,15	150,25	149,17	142,98
74	150,06	155,25	140,92	141,32	156,8	168,36	160,41	153,51	148,05	150,15	149,06	142,87
78	149,89	155,08	140,75	141,16	156,64	168,18	160,23	153,35	147,91	150	148,91	142,75
81	149,75	154,94	140,61	141,03	156,48	168,02	160,07	153,2	147,79	149,87	148,75	142,6
85	149,64	154,83	140,51	140,92	156,38	167,9	159,94	153,09	147,7	149,78	148,65	142,5
88	149,58	154,78	140,45	140,88	156,33	167,86	159,89	153,04	147,66	149,74	148,6	142,46
93	149,48	154,66	140,35	140,79	156,24	167,75	159,77	152,92	147,58	149,67	148,5	142,39
100	149,33	154,48	140,27	140,62	156,07	167,58	159,54	152,72	147,43	149,52	148,33	142,27
108	149,21	154,36	140,16	140,51	155,97	167,44	159,38	152,56	147,33	149,4	148,18	142,15
112	149,14	154,23	140,11	140,45	155,89	167,36	159,28	152,47	147,28	149,34	148,09	142,1

Cinética de secagem – Teores em água e índice de secagem

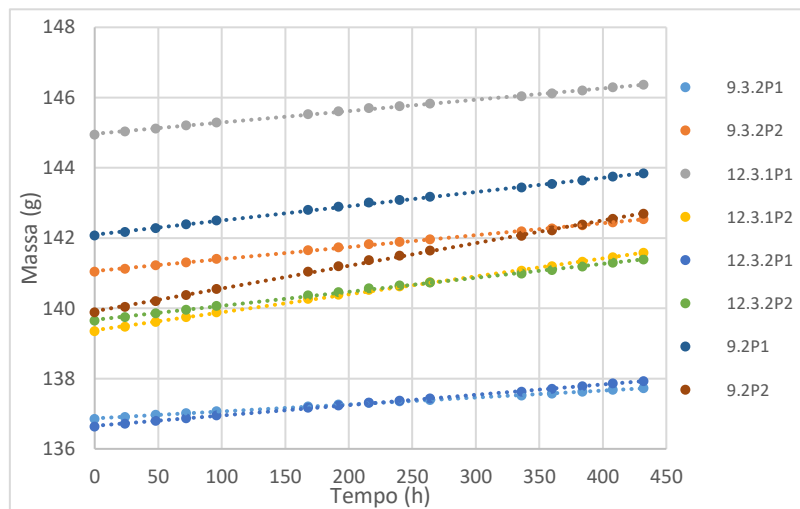
Provetes não tratados				
Provete	Teor em água no início do ensaio (%)	Teor em água no final do ensaio (%)	Teor de humidade crítico (%)	Índice de secagem
1.1	9,19	0,50	4,27	0,194
1.2	9,26	0,62	4,37	0,206
4.1	9,30	0,53	4,42	0,194
4.2	9,22	0,63	4,29	0,205
9.1	9,23	0,61	4,52	0,205
9.2	9,41	0,68	4,57	0,208
12.1	9,32	0,73	4,68	0,227
12.2	9,32	0,79	4,69	0,230
13.1	9,64	0,61	4,47	0,187
13.2	9,19	0,65	4,33	0,200
20.1	8,99	0,64	4,32	0,217
20.2	9,28	0,53	4,28	0,190
Provetes tratados				
Provete	Teor em água no início do ensaio (%)	Teor em água no final do ensaio (%)	Teor de humidade crítico (%)	Índice de secagem
1.3.1	8,05	0,78	4,41	0,254
1.3.2	8,27	0,83	4,52	0,259
4.3.1	7,95	1,14	4,74	0,307
4.3.2	8,11	1,01	4,77	0,289
9.3.1	8,40	1,13	4,70	0,281
9.3.2	8,47	1,06	4,91	0,283
12.3.1	8,00	0,68	4,50	0,233
12.3.2	8,29	1,15	4,91	0,297
13.3.1	7,85	1,08	4,72	0,290
13.3.2	8,11	0,96	4,58	0,268
20.3.1	8,43	0,80	4,62	0,239
20.3.2	8,24	0,87	4,54	0,258

Ensaio de permeabilidade ao vapor de água – Registo de massa das células de medição individual

Tempo (h)	Provetes Tratados						Provetes não tratados	
	1.3.1P1	1.3.1P2	4.3.2P1	4.3.2P2	9.3.1P1	9.3.1P2	13.2P1	13.2P2
0	139,6057	137,7077	141,811	139,4447	139,6254	140,1149	136,2788	137,8112
24	139,6778	137,8214	141,8734	139,5556	139,7151	140,2305	136,3683	137,9368
48	139,7598	137,9496	141,9421	139,6809	139,8086	140,3608	136,4624	138,0703
72	139,8294	138,068	141,9992	139,7961	139,892	140,4801	136,5564	138,2091
96	139,9122	138,2022	142,0688	139,9243	139,9892	140,616	136,6535	138,3497
168	140,1164	138,5423	142,2317	140,2536	140,2288	140,9634	136,9171	138,7384
192	140,1888	138,6637	142,2916	140,3689	140,3139	141,084	137,0034	138,8636
216	140,2633	138,7826	142,3508	140,4839	140,4002	141,2073	137,1033	139,0087
240	140,3262	138,8817	142,3969	140,5797	140,4672	141,3064	137,1687	139,1088
264	140,3858	138,9826	142,447	140,676	140,5418	141,4103	137,2482	139,2248
336	140,5747	139,2926	142,6033	140,9736	140,7633	141,7255	137,4792	139,5572
360	140,642	139,3995	142,657	141,0793	140,8424	141,8372	137,5711	139,687
384	140,7215	139,5275	142,7237	141,2007	140,9345	141,9658	137,6595	139,8182
408	140,794	139,6402	142,7842	141,3099	141,016	142,0801	137,7545	139,951
432	140,8654	139,7577	142,8436	141,4246	141,1045	142,2005	137,8390	140,0743



Tempo (h)	Provetes tratados						Provetes não tratados	
	9.3.2P1	9.3.2P2	12.3.1P1	12.3.1P2	12.3.2P1	12.3.2P2	9.2P1	9.2P2
0	136,8515	141,0398	144,9456	139,3464	136,6353	139,645	142,0739	139,8848
24	136,9035	141,1227	145,0339	139,4764	136,7128	139,7498	142,1743	140,0414
48	136,965	141,2212	145,1188	139,6065	136,7946	139,85513	142,2806	140,2064
72	137,0117	141,3063	145,2037	139,7443	136,869	139,9608	142,3876	140,3795
96	137,0715	141,4045	145,2896	139,8801	136,9503	140,0698	142,4967	140,552
168	137,2067	141,6488	145,5276	140,263	137,1649	140,3636	142,7982	141,0403
192	137,2582	141,736	145,6058	140,3857	137,2367	140,4605	142,8956	141,1967
216	137,3095	141,8244	145,6948	140,5264	137,3176	140,5688	143,0079	141,3736
240	137,3466	141,8922	145,753	140,6255	137,3714	140,6453	143,0837	141,5015
264	137,3889	141,9665	145,8265	140,7392	137,4365	140,7343	143,174	141,6464
336	137,5195	142,1885	146,0351	141,0687	137,6268	140,9912	143,4348	142,0605
360	137,5684	142,2702	146,1212	141,1965	137,7027	141,0901	143,537	142,2181
384	137,6245	142,3628	146,1995	141,3225	137,778	141,1919	143,6384	142,3796
408	137,6751	142,446	146,2866	141,4547	137,8583	141,2967	143,745	142,5431
432	137,7248	142,5323	146,3624	141,5775	137,9274	141,3923	143,8418	142,6951



Ensaio de permeabilidade ao vapor de água - Coeficiente de permeabilidade ao vapor de água e espessura da camada de difusão equivalente

	Provetes	$\Delta \times 10^{-8}$ [kg.m ⁻¹ .h ⁻¹ .Pa ⁻¹]		Sd [m]	
		P1	P2	P1	P2
Tratados	1.3.1	1,05	1,45	0,53	0,34
	4.3.2	0,95	1,61	0,64	0,33
	9.3.1	1,02	1,34	0,49	0,35
	9.3.2	0,69	1,25	0,72	0,41
	12.3.1	0,96	1,33	0,52	0,34
	12.3.2	0,91	1,28	0,53	0,39
Não Tratados	9.2	1,28	1,83	0,41	0,26
	13.2	1,09	1,70	0,43	0,30



SILRES® BS OH 100

MASONRY WATER REPELLENTS

Product description

SILRES® BS OH 100 is a solventless, ready-to-use product for the consolidation of construction materials.

Special features

- one-pack system - therefore easy processing
- low-molecular - therefore optimum penetration
- tack-free drying - therefore no dirt attraction
- no by-products that are damaging to the building material
- the binder formed is mineral - therefore resembling the building material
- the binder formed is acid-resistant-therefore resistant to rainwater
- pores are not sealed - therefore the treated building material maintains its water vapour permeability

Mode of action

SILRES® BS OH 100 is based on ethyl silicate. When applied, it penetrates through the capillaries deep into the construction material. The neutral catalyst promotes the reaction between ethyl silicate and water from atmospheric humidity or the moisture in the capillary pores. A glass-like silica gel binder ($\text{SiO}_2 \cdot \text{aq.}$) is formed. The ethanol by product evaporates. Under standard conditions ($20^\circ\text{C} / 50\% \text{ r. h.}$), final hardness is reached after two weeks, i. e. when most of the ethyl silicate has been converted to silica gel.

The product does not contain any hydrophobic additives such as silanes or siloxanes. Before the reaction is complete, the treated surface may show slight beading, though this does not mean that it is water repellent.

Application

The main application of the product is to restore weather-damaged natural stone, stucco or frescos. It may also be used to treat other construction materials such as brick or terracotta.

Any absorbent mineral construction material can be treated with SILRES® BS OH 100. By saturation with the product, their original strength and porosity can be

practically restored.

Processing

Preliminary test, test area

Due to the fact that the degree of deterioration will differ from one building material to the next, the instructions given in the following can only serve as general guidelines for successful restoration:

- Determine the exact state of the substrate which is to be consolidated (binder, salt content, porosity, etc.);
- Establish the necessary steps to be taken and likely material consumption;
- Mark out a sufficiently large test area (also used to determine the material consumption) and check the results by looking for discoloration and making relevant physical measurements;
- Check that the necessary steps are taken and monitor material consumption;
- Carry out thorough final tests.

Substrate condition

Buildings which are to be restored often have a thick, dirty surface layer (crust). The areas must be cleaned thoroughly but mildly, e. g., by spraying with cold or hot water, or by steam cleaning. In many cases, the stone is already friable, and so cleaning is not possible without a further loss of substance. It is, however, possible to consolidate the material with SILRES® BS OH 100 beforehand to prevent substance loss. Then the material can be cleaned and the main consolidation can take place.

In order to enable the SILRES® BS OH 100 to penetrate all the friable building material, it is necessary for the area to be air-dry and absorbent. The treated area should be protected against rain during the following two to three days. It is also important that the area be protected against direct sunlight prior to treatment. If the building material is allowed to absorb too much heat, the product will evaporate too quickly and therefore will not penetrate sufficiently. The optimum temperatures for application are between 10 and 20°C . The relative humidity should be $> 40\%$. In order to prevent the building material from heating up too much, awnings can be set up.

Application method

SILRES® BS OH 100 may be applied by spraying, brushing or dipping, according to the object to be consolidated. Larger areas should be treated with spraying equipment, but smaller ones can be treated with a wash bottle. Portable objects such as sculptures can be treated by dipping or by means of compresses.

Amount to be applied

One of the chief prerequisites for successful restoration is that the product penetrates to the sound core of the masonry as otherwise the possibility of flaking due to crust formation cannot be excluded.

In order to achieve the desired penetration depth, small areas of the building material (perhaps one stone or block or brick at a time) should be treated wet-on-wet with SILRES® BS OH 100 until the building material is fully saturated, i. e., it is unable to absorb any more of the product. If necessary, a second course of treatment can follow after two to three weeks at the earliest; here, too, complete saturation of the friable material must be achieved.

If a second course of treatment is carried out before the formation of active substance is complete, the masonry will not be able to absorb the stone strengthener. As a consequence, the surface will turn gray.

The amount of SILRES® BS OH 100 needed for the consolidation depends on the type of building material. The consumption may range from 0.5 to 15 l/m². Example: a stone which was weathered to depth of 6cm needed in the first course of treatment 5 l/m² of SILRES® BS OH 100 and 3.5 l/m² in the second course carried out after three weeks. In another case, 2.7 l/m² was applied and a penetration depth of 10cm demonstrated. The necessary amount of stone strengthener must be determined on a test area.

Post-treatment

Discoloration of the surface by ethyl silicate can be prevented by washing it with a solvent such as white spirit as soon as it is fully saturated.

Application of stone substitute or paint
When the SILRES® BS OH 100 course has reacted completely, stone substitute or mineral silicate paint can be applied to the treated area. The consolidated surface can also be treated with silicone paint. SILRES® BS OH 100 can also be applied to surfaces after they have been treated with stone substitute or mineral silicate paint, but only after an interval of four

weeks.

Water-repellent treatment

After restoration work, a water-repellent coat should be applied to protect against rainwater. Wacker Chemie AG will be glad to advise you about suitable products.

Storage

The containers must be protected against sunlight. If the product is allowed to react with atmospheric humidity, it will gel and be rendered unfit for use.

The "Best use before end" date of each batch is shown on the product label.

Storage beyond the date specified on the label does not necessarily mean that the product is no longer usable. In this case however, the properties required for the intended use must be checked for quality assurance reasons.

Additional information

- Before applying SILRES® BS OH 100, cover up any window panes or solvent-sensitive plastics, etc. When applying the product outdoors by spraying, take care not to splash parked cars.
- If, in application by the dipping process, a lengthy dipping time is required, ensure that the dip tank is hermetically sealed to avoid gelling of the product.
- If the treated surface has a beading effect, which may affect the application of stone substitute or mineral silicate paint, this can be remedied by wiping the surface with an ammonia solution.
- If areas treated with SILRES® BS OH 100 are to be molded, the surface should be pretreated with a wetting agent, e. g. a soap solution or PVA solution, to prevent the silicone rubber compound from sticking to the surface.

Safety notes

Comprehensive instructions are given in the corresponding Material Safety Data Sheets. They are available on request from WACKER subsidiaries or may be printed via WACKER web site

<http://www.wacker.com>.

Product data

Typical general characteristics	Inspection Method	Value
Color		colorless to yellowish
Ethyl silicate content		approx. 100 wt. %
Density at 25 °C	DIN 51757	approx. 0,997 g/cm ³
Catalyst		neutral
Flash point	ISO 2719	40 °C
Ignition temperature (liquids)	DIN 51794	230 °C

These figures are only intended as a guide and should not be used in preparing specifications.

The data presented in this medium are in accordance with the present state of our knowledge but do not absolve the user from carefully checking all supplies immediately on receipt. We reserve the right to alter product constants within the scope of technical progress or new developments. The recommendations made in this medium should be checked by preliminary trials because of conditions during processing over which we have no control, especially where other companies' raw materials are also being used. The information provided by us does not absolve the user from the obligation of investigating the possibility of infringement of third parties' rights and, if necessary, clarifying the position. Recommendations for use do not constitute a warranty, either express or implied, of the fitness or suitability of the product for a particular purpose.

The management system has been certified according to DIN EN ISO 9001 and DIN EN ISO 14001

WACKER® is a trademark of Wacker Chemie AG. SILRES® is a trademark of Wacker Chemie AG.

For technical, quality, or product safety questions, please contact:

Wacker Chemie AG
Hanns-Seidel-Platz 4
81737 München, Germany
info.silicones@wacker.com

www.wacker.com