Estudo de tratamentos de consolidação de materiais cerâmicos - Avaliação da eficácia

Luísa Alexandra Nunes Ribeiro

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil

Mestrado Integrado 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 João Pedro Ramôa Ribeiro Correia

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

Vogal: Eng.º João Manuel Bessa Pinto

Outubro 2016

Agradecimentos

À Prof.ª Doutora Ana Paula Ferreira Pinto, minha orientadora, pelos conhecimentos transmitidos, pela paciência, incentivo e toda a orientação no decurso desta dissertação.

Ao Prof. Doutor Augusto Gomes, meu orientador, pela disponibilidade e conhecimentos transmitidos no decorrer deste trabalho.

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

À Engenheira Bruna Silva pelo apoio e paciência na realização de ensaios.

Aos meus amigos mais especiais, os "Fantastic4" (Sílvia, Patrícia e Morgado) pela amizade, pelo apoio, pelo esclarecimento de dúvidas, pelo incentivo e por me terem acompanhado no meu percurso no IST, os "Tapas na cara" pela amizade, animação e incentivo que sempre demonstraram, à Raquel pela amizade e apoio, pelo esclarecimento de dúvidas e por ser a minha "coach" e à Joana pela amizade e momentos que partilhámos numa parte do nosso percurso no IST.

Ao Rodrigo, por ser o meu companheiro para todas as aventuras, pela paciência, pelo apoio e acima de tudo pelo amor e carinho demonstrados não só durante este trabalho, mas também a todos os níveis.

Aos meus avós por todo o amor, conforto, paciência e por estarem sempre presentes.

À minha mãe e ao meu pai, por todo o amor que me deram, por acreditarem sempre em mim, por me ajudarem a crescer e a ser a pessoa que sou hoje, muito obrigada.

Resumo

O tijolo cerâmico tem um papel relevante como material construtivo utilizado desde as mais antigas civilizações. Os edifícios construídos em alvenaria de tijolo, presentes até aos dias de hoje, constituem marcos históricos, culturais e têm elevado valor económico. No entanto, devido à degradação causada por agentes atmosféricos e pela ação humana, pode ocorrer a perda das propriedades que os distinguiam como um material construtivo de excelência. As soluções para a degradação do material cerâmico consistem na substituição ou na conservação através do uso de técnicas, tal como a consolidação, que restitui coesão e melhora as características físicas e mecânicas, agravadas por processos de degradação.

A escassez de estudos e pesquisa acerca da ação de consolidação levada a cabo em tijolos cerâmicos constitui a motivação para o desenvolvimento da presente dissertação.

A campanha experimental realizada incidiu sobre a caracterização da amostra de tijolos cerâmicos e, por fim, sobre a avaliação da eficácia inicial do tratamento consolidante aplicado com recurso a um silicato de etilo. A caracterização dos tijolos cerâmicos permitiu o maior conhecimento sobre a amostra e demonstrou a existência de elevada heterogeneidade e o comportamento anisotrópico dos tijolos. Na avaliação da eficácia inicial do tratamento consolidante, foi realizada a caracterização de provetes tratados e não tratados entre os quais foi feita uma comparação entre propriedades da amostra tratada e não tratada.

Verificou-se que o tratamento consolidante realizado levou a um aumento de resistência mecânica do material cerâmico e que a ação de consolidação penetrou até à profundidade de 2,5 cm. Como tal, é possível concluir que o tratamento consolidante revelou características para ser considerado um tratamento eficaz.

Palavras – Chave:

Tijolo cerâmico – Consolidação – Silicato de Etilo – Avaliação da eficácia inicial.

Abstract

Ceramic bricks have an important role as a construction material, since the beginning of ancient civilizations. Buildings built with brick masonry are still present nowadays, became historic, cultural milestones and constitute major economic value. However, due to degradation caused by atmosferic agents and human action, may occur the loss of some properties that used to distinguish ceramic bricks as an excelent construction material. The solutions for degradation problems consist on the substitution or the conservation through consolidation procedures, which restores cohesion and improves physical and mechanical characteristics, aggravated by degradation processes.

The main motivation for developing the present thesis is the lack of information about consolidant treatments performed on ceramic bricks.

The experimental program performed included a previous characterization of the ceramic material and afterwards the effectiveness assessment of a consolidation treatment performed with ethyl silicate treatment.The characterization of the ceramic material was performed to get to know better the material and it showed its heterogeneity and anisotropic behaviour. When assessing the effectiveness of the treatment, a characterization of treated and non-treated specimens was performed and a comparisson between these samples was carried-out.

The tested consolidation treatment was able to improve the mechanical resistance of the ceramic material and the consolidation action reached a depth of 2,5 cm. Thus, it is possible to conclude that the tested treatment revealed potential to give rise of an efficient treatment.

Keywords:

Ceramic Brick – Consolidation Treatment – Ethyl Silicate – Effectiveness assessment.

Índice

Agradecimentos iii

Resumo v

Abstract vii

Índice ix

1. Introdução 1

1.1 Enquadramento e justificação do tema 1
1.2 Objetivos 2
1.3 Organização do texto 2
2. Consolidação de materiais cerâmicos 5

2.1 Considerações gerais 5
2.2 Material cerâmico 5
2.3 Tratamentos consolidantes 10
2.3.1 Ação consolidante 10
2.3.2 Riscos inerentes à aplicação de tratamentos consolidantes 15
2.3.3 Tratamentos consolidantes com produtos à base de silicato de etilo 15
3. Apresentação e descrição do plano de trabalhos 17

3.1 Considerações iniciais 17
3.2 Materiais estudados 17
3.2.1 Material cerâmico 17
3.2.2 Produto consolidante 18
3.3 Plano de trabalhos 19
3.3.1 Fase 1- Caracterização do material cerâmico 19
3.3.2 Fase 2- Tratamento consolidante 22
3.3.3 Fase 3- Avaliação da eficácia inicial do tratamento consolidante 26
3.4 Métodos de ensaio 27
3.4.1 Caracterização física 28
3.4.2 Caracterização mecânica 34
4. Caracterização do material cerâmico 39

4.1 Caracterização da amostra de material cerâmico disponível 39
4.2 Caracterização do material cerâmico a ser tratado 48
5. Caracterização da ação consolidante 53

5.1 Considerações iniciais 53
5.2 Tratamento consolidante 54
5.3 Avaliação da eficácia inicial 56

6. Conclusões e Propostas de Desenvolvimentos Futuros 65
6.1 Conclusões gerais 65
6.2 Propostas para desenvolvimentos futuros 66
Referências bibliográficas 67
Anexos I.1
Anexo I- Caracterização de tijolos cerâmicos I.1
Porosidade, massas volúmicas e teor em água máximo I.1
Velocidade de propagação de ultra-sons I.2
Ensaio de absorção de água por capilaridade- Massa e franja líquida I.3
Controlo de teor em água I.8
Anexo II- Caracterização dos provetes II.1
Controlo de teor em água II.1
Controlo de massa durante tratamento de consolidação II.1
Controlo da massa após o tratamento de consolidação II.2
Porosidade, massas volúmicas e teor em água máximo II.3
Velocidade de propagação de ultra-sons II.4
Anexo III- Ficha técnica do produto consolidante III.1

Índice de figuras

Figura 2.1- Alvenaria de tijolo cerâmico: a) civilização romana Galerius Palace, Thessanloniki, séc.III; b) civilização bizantina, Hagia Sophia, Thessaloniki, séc. VIII, (Stefanidou et al. 2015). . 6
Figura 2.2- Aplicação de esforço normal de compressão em arcos, pág. 9 na tese de doutoramento de Fernandes (Fernandes, 2006). 8
Figura 2.3- Reação de hidrólise do silicato de etilo e precipitação de sílica gel (Wacker, 2014). 16
Figura 3.1- Tijolo cerâmico- aspeto visual. 17
Figura 3.2- Aparência das faces exteriores do tijolo: a) face superior mais regular e com reduzida textura e face vertical mais irregular; b) face superior mais regular. 18
Figura 3.3- Produto consolidante utilizado. 19
Figura 3.4- Identificação dos provetes para a caracterização mecânica: a) ensaio de resistência à flexão: corte 1; b) ensaio de resistência à flexão: corte 2; c) ensaio de resistência à compressão: corte 1; d) ensaio de resistência à compressão: corte de provetes com e sem retificação. 21
Figura 3.5- Plano de ensaios da fase 1 do trabalho experimental- caracterização do material cerâmico. 22
Figura 3.6- Fases do tratamento consolidante: a) aplicação do produto consolidante com pincel; b) progressão da franja líquida; c) registo da massa do conjunto recipiente, produto e pincel; d) registo da massa do provete; e) colocação de película para evitar a excessiva evaporação do produto. 24
Figura 3.7- Plano de trabalhos da fase 2 do trabalho experimental- Aplicação do produto consolidante. 25
Figura 3.8- Identificação dos provetes destinados à avaliação da eficácia: a) ensaio de resistência à flexão; b) ensaio de resistência à compressão e à perfuração controlada. 26
Figura 3.9- Esquema do plano de trabalhos dos provetes correspondente à fase 3 do trabalho experimental- Avaliação da eficácia inicial do tratamento consolidante. 27
Figura 3.10- Fases do ensaio de porosidade: a) tijolos dispostos no exsicador com vácuo; b) introdução de água e manutenção do vácuo; c) imersão em água à pressão atmosférica. 29
Figura 3.11- a) pesagem hidrostática; b) pesagem. 29
Figura 3.12- a) posicionamento dos tijolos no recipiente para imersão durante 48 horas em água; b) pesagem para obtenção da m_{sat48h}. 31
Figura 3.13- Direções estudadas no ensaio de absorção de água por capilaridade: a) direção L; b) direção T1; c) direção T2. 32
Figura 3.14- Fases do ensaio de absorção de água por capilaridade: a) medição da franja liquida do tijolo; b) medição da massa; c) proteção colocada sobre os tijolos. 33
Figura 3.15- Três direções analisadas no ensaio de ultra-sons em tijolos, método direto. 34
Figura 3.16- a) Representação esquemática das direções analisadas no ensaio de propagação de ultra-sons nos provetes, método direto; b) Leitura na direção L num provete. 35

Figura 3.17- Posição dos transdutores no ensaio de propagação de ultra-sons pelo método indireto: a) esquema de todas as posições analisada no provete; b) as 5 posições analisadas durante o ensaio de propagação de ultra-sons. 36
Figura 3.18- a) vista de frente do equipamento usado para ensaios de resistência à flexão e compressão; b) vista lateral do equipamento usado no ensaio de resistência à flexão; c) equipamento usado no ensaio de resistência à compressão. 36
Figura 3.19- Brocas utilizadas na furação, com 3mm e 5mm de diâmetro. 38
Figura 3.20- Equipamento utilizado para a realização de furos: a) DRMS da SINT Tecnology e b) Perfuradora PIRRA. 38
Figura 4.1- Distribuição dos valores de porosidade, avaliada em tijolos. 39
Figura 4.2- Curvas de absorção de água por capilaridade, nas três direções estudadas. 40
Figura 4.3- Coeficiente de capilaridade para cada direção. 42
Figura 4.4- Curvas de absorção de água na direção L, com ponto de mudança de taxa de absorção assinalado. 42
Figura 4.5- a) Medição da franja líquida, no ensaio de absorção de água por capilaridade na direção T1; b) Observação de zonas secas e molhadas na mesma face dos tijolos, no ensaio de absorção de água por capilaridade. 43
Figura 4.6- Curvas de absorção capilar e franjas líquidas, para ensaio de absorção por capilaridade. 43
Figura 4.7- Relação entre velocidade de propagação de ultra-sons para tijolos secos e saturados- método direto. 44
Figura 4.8- Relação entre porosidade e velocidade de ultra-sons, para tijolos secos e saturados e respetivas retas de tendência- método direto. 46
Figura 4.9- Curvas de absorção de água por capilaridade em função da raiz do tempo. 49
Figura 4.10- Coeficiente de capilaridade para as 3 direções estudadas. 49
Figura 4.11- Relação entre velocidade de propagação de ultra-sons para tijolos secos e saturados- método direto. 50
Figura 4.12- Perfis de força de perfuração da amostra a tratar. 51
Figura 5.1- Monitorização do teor em água dos tijolos. 53
Figura 5.2- Controlo do teor em água após colocação na câmara húmida dos provetes, antes do tratamento consolidante. 54
Figura 5.3- Relação entre a porosidade e a quantidade de produto absorvido por cada provete. 55
Figura 5.4- Evolução da variação da massa dos provetes, após o tratamento. 56
Figura 5.5- Registo de temperatura e humidade relativa na sala de colocação dos provetes. 56
Figura 5.6- Relação entre velocidade de provetes secos e saturados, para todas as direções estudadas- método direto. 57
Figura 5.7- Relação entre velocidade de ultra-sons de provetes secos e saturados, para os provetes não tratados e tratados- método indireto. 59
Figura 5.8- Relação entre resistência à compressão da amostra tratada e não tratada. 61

Figura 5.9- Perfis de força de perfuração, para amostra tratada e não tratada. 61
Figura 5.10- Resistência à perfuração do material cerâmico tratado e não tratado. 63

Índice de tabelas

Tabela 2.1- Propriedades físicas e mecânicas de tijolos cerâmicos pertencentes a monumentos portugueses de sec. XII a XVIII. 8
Tabela 2.2- Propriedades físicas e mecânicas de tijolos cerâmicos pertencentes a monumentos Europeus de sec. III a XV. 9
Tabela 2.3- Variação de propriedades físicas e mecânicas de elementos cerâmicos (tijolos e azulejos) antes e após tratamento consolidante. 14
Tabela 3.1- Informações acerca do produto consolidante e sua aplicação, retiradas da ficha técnica da Wacker (Wacker, 2014). 18
Tabela 4.1- Massa Volúmica, porosidade, teor em água e coeficiente de saturação da amostra de tijolos. 39
Tabela 4.2- Porosidade, teor em água máximo e após 48 horas de imersão em água e coeficiente de saturação. 40
Tabela 4.3- Valores do coeficiente de capilaridade e assimptóticos. 41
Tabela 4.4- Velocidade de propagação nos tijolos- método direto. 45
Tabela 4.5- Resistência à flexão e à compressão dos provetes. 47
Tabela 4.6- Coeficiente de capilaridade, para 7 tijolos. 49
Tabela 4.7- Velocidade de propagação de ultra-sons nos tijolos- método direto. 50
Tabela 5.1- Controlo do teor em água dos tijolos colocados no ambiente exterior. 53
Tabela 5.2- Quantidade de produto absorvido e consumido, por pincelagem, durante o tratamento de consolidação para os provetes. 55
Tabela 5.3- Porosidade e teor em água máximo da amostra tratada e não tratada. 57
Tabela 5.4- Velocidade de propagação de ultra-sons nos provetes tratados e não tratados- método direto. 58
Tabela 5.5- Velocidade de propagação de ultra-sons nos provetes não tratados e tratados- método indireto. 60
Tabela 5.6- Comparação de valores de resistência à flexão e compressão, entre provetes tratados e não tratados. 60

1. Introdução

1.1 Enquadramento e justificação do tema

O património construído antigo possui valores culturais, arquitetónicos e económicos inestimáveis. Estes edifícios fazem parte da identidade da sociedade e são exemplos dos materiais e técnicas utilizados no passado.

Em Portugal, o património construído é constituído por construções em alvenaria de pedra, graças à disponibilidade de material em pedreiras existentes no país, mas também, em alvenaria de tijolo, graças à facilidade de aquisição de matéria-prima e produção de material cerâmico. O tijolo cerâmico constitui-se como um dos materiais de utilização mais frequente na construção, não só em Portugal, mas em todos os locais onde é possível extrair argilas, utilizados desde as mais antigas civilizações. No entanto, a exposição prolongada dos materiais cerâmicos a agentes agressivos leva ao desenvolvimento de processos de degradação que podem desencadear perda de coesão, aumento da porosidade, diminuição de resistência mecânica entre outras formas de degradação.

A degradação de materiais de construção e dos elementos construtivos que os integram origina a necessidade de levar a cabo intervenções de conservação, as quais devem ser definidas com base no levantamento do estado de conservação da construção, das causas, processos e formas de degradação presentes, dos valores associados, entre outros aspetos. Em objetos de elevado valor, a opção de substituição dos elementos degradados não se constitui como uma prática de utilização generalizada, dado que, em muitas situações, os valores a preservar impedem ou limitam este tipo de soluções. Deste modo, a conservação de elementos cerâmicos que registam processos de perda de massa e de coesão nem sempre pode recorrer à substituição como opção de intervenção, sendo então necessário procurar reestabelecer a coesão através de tratamentos consolidantes.

A consolidação de materiais porosos antigos tem sido utilizada em intervenções de conservação e objeto de investigação, particularmente no domínio da pedra. No entanto, a consolidação continua a ser uma ação de conservação com risco de insucesso relevante (Delgado Rodrigues, 2010).

A investigação especificamente desenvolvida no domínio da consolidação dos materiais cerâmicos é claramente mais escassa do que a existente para a conservação da pedra, justificando a necessidade de estudos específicos neste domínio.

A presente dissertação intitulada “Estudo de tratamentos de consolidação de materiais cerâmicos- Avaliação da eficácia” procura contribuir para o incremento do conhecimento da consolidação de materiais cerâmicos por recurso a tratamentos realizados com silicato de etilo.

A presente dissertação aborda especificamente o estudo da eficácia inicial do tratamento consolidante, isto é, qual a ação consolidante conferida. Os aspetos relativos às alterações das características físicas e de aspeto visual promovidas pelo tratamento são analisados na dissertação intitulada “Estudo de tratamentos de consolidação de materiais cerâmicos- Avaliação da potencial nocividade”.

1.2 Objetivos

A dissertação tem como principal objetivo procurar contribuir para o incremento e aprofundamento do conhecimento relativo à ação de produtos consolidantes aplicados em materiais cerâmicos, através do estudo da ação de um consolidante utilizado no tratamento de tijolos cerâmicos. Para tal, a dissertação analisa a ação consolidante promovida por um tratamento resultante de aplicação de um silicato de etilo comercial, de utilização frequente em ações de conservação que envolvem a consolidação de materiais porosos, sobre o material cerâmico de barro vermelho.

O estudo incidiu na avaliação do incremento de coesão e resistência mecânica conferido pelo tratamento, isto é, avaliação da sua eficácia inicial, através da comparação de propriedades analisadas numa amostra tratada e numa amostra não tratada, de referência. A quantificação da variação de propriedades de uma amostra tratada e de uma amostra não tratada é confrontada com um estudo, realizado por Franzoni *et al.* (2013), no qual é estudada a aplicação de um produto consolidante, à base de silicato de etilo, sobre um substrato cerâmico.

O desenvolvimento de conhecimento acerca do material cerâmico analisado também constituiu um objetivo da dissertação. Previamente ao tratamento consolidante, foi realizado um estudo incidente sobre as propriedades físicas e mecânicas do material cerâmico disponível. A investigação acerca do material cerâmico a ser tratado é de elevada importância não só para a contribuição de conhecimento acerca deste material construtivo, como para o seguimento do estudo sobre avaliação da eficácia do tratamento consolidante. A análise das propriedades do material é confrontada com um estudo realizado por Fernandes *et al*. (2010), no qual são avaliadas propriedades de tijolos cerâmicos antigos, pertencentes a monumentos portugueses.

1.3 Organização do texto

O texto da dissertação encontra-se organizado em seis capítulos. O primeiro procede ao enquadramento da dissertação, à apresentação dos objetivos estabelecidos para o seu desenvolvimento e à organização do texto.

No segundo capítulo existe uma divisão em dois subcapítulos mais relevantes, o primeiro apresenta uma descrição acerca do material cerâmico, as utilizações dadas ao tijolo cerâmico, o método de fabrico rudimentar utilizado antigamente, bem como as suas propriedades mais conhecidas e apresentadas em diversos estudos acerca do tema. No segundo subcapítulo são introduzidos os conceitos relevantes para o tema da consolidação. É explicada a sua relevância para a manutenção do património construído. São apontados os parâmetros a ter em conta na realização de um tratamento de consolidação e na escolha do produto consolidante. De seguida, são enumerados os principais produtos consolidantes disponíveis no mercado e apresentada a influência destes produtos na alteração de características em exemplares de material cerâmico. Por fim, são explicados alguns inconvenientes inerentes à ação consolidante.

No terceiro capítulo são apresentados os tijolos cerâmicos e o produto consolidante utilizado, seguido pela descrição do plano de trabalhos realizados onde é explicada e indicada a abordagem laboratorial do presente estudo. Por fim, são descritos os procedimentos de ensaio adotados, tanto para a caracterização do material cerâmico como para a avaliação da eficácia inicial do tratamento de consolidação.

No quarto capítulo são apresentados os resultados dos ensaios realizados para a caracterização da amostra de tijolos é feita a sua análise e é apresentada a opção acerca da amostra de tijolos a considerar no seguimento do estudo.

O quinto capítulo é dedicado à caracterização da ação consolidante. É apresentada a preparação dos provetes a tratar, os valores da quantidade de produto consumido e absorvido e o controlo realizado após o tratamento. De seguida, apresenta-se a avaliação da eficácia inicial do tratamento consolidante, onde são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios realizados na amostra tratada e não tratada.

No sexto capítulo são explicadas as conclusões retiradas desta tese de investigação e são enunciadas propostas para desenvolvimentos futuros.

2. Consolidação de materiais cerâmicos

2.1 Considerações gerais

O capítulo que se segue pretende informar sobre o tema de consolidação de material cerâmico. É feita uma introdução teórica do que será investigado na dissertação, de modo a que haja maior compreensão sobre o tema.

Na introdução do material cerâmico é apresentado o seu enquadramento histórico, descrita a técnica de produção tradicional e apresentadas propriedades de tijolos portugueses e europeus, objetos de estudos de caracterização.

Por fim, é introduzido o tema de consolidação, com identificação de aspetos influenciadores da ação de consolidação, apresentação de produtos mais comuns no mercado, avaliação de alteração de propriedades do suporte, enumeração de riscos associados a ações de consolidação e de aspetos sobre a utilização de produto consolidante à base de silicato de etilo.

2.2 Material cerâmico

O material cerâmico é utilizado desde longa data como material de construção e a sua produção e características têm evoluído de forma significativa até ao presente. A utilização de tijolos cerâmicos na construção é conhecida desde antigas civilizações, como na Mesopotâmia, (terceiro milénio, a.C.). Na Grécia Antiga (1100 a.C. a 146 a.C.) também foram utilizados tijolos cerâmicos, na construção de alvenarias a partir do século 4 a.C.. A civilização romana (27 a.C. a 476 d.C.) usou o tijolo cerâmico de forma frequente na construção de arenas, aquedutos, banhos públicos e habitações, com recurso a alvenaria de tijolo cerâmico ou de tijolo cerâmico conjugado com pedra. Durante o império bizantino (395 d.C. a 1453 d.C.) os materiais cerâmicos foram utilizados na construção de alvenaria em cúpulas, arcos ou pilares (Stefanidou *et al.*, 2015).

A Figura 2.1 a) e a Figura 2.1 b) apresentam dois edifícios construídos em alvenaria de tijolo construídos durante a civilização romana e bizantina, respetivamente.

a) b)

Figura 2.1- Alvenaria de tijolo cerâmico: a) civilização romana Galerius Palace, Thessanloniki, séc.III; b) civilização bizantina, Hagia Sophia, Thessaloniki, séc. VIII, (Stefanidou *et al*. 2015).

O tijolo cerâmico constituía-se como um material construtivo de fácil, rápida e simples produção, mais leve que a pedra, de fácil moldagem e constituía uma barreira resistente e durável ao fogo. Os tijolos usados conseguiam resistir à ação de agentes atmosféricos, como a chuva, a neve, ciclos de gelo-degelo e altas temperaturas e, ainda à ação humana. Como prova da sua resistência enquanto material construtivo podem, ainda, ser observados vários edifícios e monumentos construídos em alvenaria de tijolo cerâmico que prevalecem até aos dias de hoje e que têm sido objeto de vários estudos de caracterização. A alvenaria construída com tijolos cerâmicos tem características diretamente dependentes das propriedades apresentadas pelos tijolos (Lourenço *et al*., 2010).

Muito embora o processo de produção dos tijolos tenha evoluído no tempo, a sua produção tem incluído sensivelmente as mesmas etapas. O processo tem início com a extração e homogeneização da matéria-prima (argila), ao que se segue a sua mistura com água para obter uma massa plástica para posterior conformação. Após a conformação, os tijolos são secos e, em seguida, cozidos a temperaturas que, habitualmente, não excedem os 1000ºC.

De um modo geral, tanto as características da argila como o processo de produção têm influência nas características e durabilidade dos tijolos, sendo a constituição química da matéria-prima o aspeto que menor influência tem nas suas propriedades. A diversidade de características de matéria-prima e dos processos de produção levam à existência de grande variedade de propriedades físicas e mecânicas nos tijolos cerâmicos (Fernandes *et al*., 2010).

Um dos fatores influenciados pelas características da argila, quantidade de água e temperatura de cozedura é a dimensão e distribuição dos poros dos tijolos. Foi demonstrado que a existência poros maiores e com pouca conexão entre si favorece a resistência e a durabilidade dos tijolos, contrariamente a redes de poros mais pequenos e conectados entre si, que favorecem a circulação de água, fenómenos de gelo-degelo e a ocorrência de eflorescências (Cultrone *et al*., 2004). López-Arce *et al.* (2003) estudaram a influência da temperatura de cozedura na

porosidade dos tijolos e concluíram que os tijolos cozidos a baixas temperaturas apresentavam menor porosidade e menor diâmetro de poro, cerca de 32,5% e 0,13 µm, respetivamente, do que os cozidos a temperaturas mais altas, para os quais obtiveram valores de 43,1% e 0,61µm, respetivamente (Fernandes e Lourenço, 2007).

A necessidade de intervir em elementos construtivos que integram tijolos cerâmicos tem vindo a dar origem a diversos estudos levados a cabo com o objetivo de proceder à sua caracterização, dado que a caracterização física, mecânica, química e mineralógica é relevante para a avaliação da sua suscetibilidade à degradação.

López-Arce *et al.* (2003) realizaram um estudo incidente sobre as propriedades físicas, químicas e mineralógicas de tijolos cerâmicos do século XII ao século XIV, recolhidos de edifícios históricos de Toledo, no qual as propriedades estudadas foram relacionadas com a matéria-prima usada na produção dos tijolos e os processos de fabrico utilizados na produção. Wijffels e Nijland (2004) estudaram tijolos do século XIX retirados de uma ponte na Holanda, onde foram analisadas as suas causas de degradação. Stefanidou *et al*. (2015) realizaram um estudo incidente sobre as propriedades físicas e mecânicas de tijolos cerâmicos dos períodos Romano e Bizantino. Cultrone *et al.* (2004) averiguaram a influência estabelecida pela temperatura de cozedura, de tijolos cerâmicos produzidos em laboratório, na porosidade e na mineralogia.

As tabelas 2.1 e 2.2 apresentam um conjunto de características físicas e mecânicas avaliadas em tijolos cerâmicos antigos provenientes de monumentos portugueses dos séculos XII a XVIII e de monumentos europeus dos séculos III a XVIII, respetivamente.

A porosidade constitui um parâmetro importante no estudo de tijolos cerâmicos, porque apresenta grande influência na reatividade química, resistência mecânica e durabilidade dos mesmos. A massa volúmica aparente relaciona-se diretamente com melhores características mecânicas e durabilidade dos tijolos cerâmicos. O teor em água é indicador da capacidade de absorção e circulação de fluidos por parte dos tijolos, que facilita a deterioração e redução de resistência. Em locais onde as temperaturas desçam abaixo de 0ºC, pode ocorrer desintegração ou aparecimento de fissuras devido ao congelamento de água no interior dos poros dos tijolos. A circulação de fluidos com sais solúveis pode provocar o aparecimento de eflorescências, que deterioram o aspeto do tijolo cerâmico e, devido ao aumento de volume causado pela cristalização de sais pode levar ao desenvolvimento de fissuras. O coeficiente de capilaridade avalia a facilidade que a água tem em penetrar os poros do tijolo por absorção capilar, isto é, devido a forças de tensão geradas nas paredes dos poros. A resistência mecânica à compressão é um parâmetro importante, porque o tijolo cerâmico aplicado em alvenaria de colunas, paredes, arcos e abóbadas está maioritariamente sujeito a forças de compressão (Figura 2.2) (Fernandes *et al*., 2010).

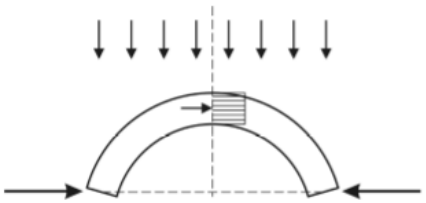


Figura 2.2- Aplicação de esforço normal de compressão em arcos, pág. 9 na tese de doutoramento de Fernandes (Fernandes, 2006).

Tabela 2.1- Propriedades físicas e mecânicas de tijolos cerâmicos pertencentes a monumentos portugueses de sec. XII a XVIII.

			Século da construção	Referência
Propriedades físicas	Porosidade (%)	10-15	XII-XVIII	(Fernandes *et al*., 2010)
		15-20	XII-XVII	
		20-25	XII-XVIII	
		25-30	XII-XVIII	
		30-35	XII-XVIII	
		35-40	XII-XVII	
		40-45	XVII	
	Teor em água máximo (%)	6-32	XII-XVIII	(Fernandes *et al*., 2010)
	Massa volúmica aparente (kg/m^3)	1600-1800	XII-XVIII	(Fernandes e Lourenço, 2007)
	Coeficiente de capilaridade ($kg\ m^{-2}s^{-0,5}$)	0,09-0,30	XII-XVIII	(Fernandes *et al*., 2010)
Propriedades mecânicas	Resistência à compressão (MPa)	6,7	XVII	(Fernandes *et al.,* 2010)
		8,5	XVII	
		8,7	XII-XVII	
		9,2	XII-XVI	
		14,5	XII-XVIII	
		21,8	XVIII	

Na Tabela 2.1 verifica-se que os valores de porosidade abrangem um intervalo alargado, mas 80% dos resultados situam-se entre a gama de porosidade entre 25 e 35%. O mesmo acontece para o teor em água máximo no qual 90% dos resultados estão entre valores de teor máximo de 10 a 25%. Relativamente aos valores médios de resistência à compressão, é apresentada elevada dispersão de resultados com desvio padrão na ordem dos 25 aos 55%.

Tabela 2.2- Propriedades físicas e mecânicas de tijolos cerâmicos pertencentes a monumentos Europeus de sec. III a XV.

			Origem	Século de construção	Referência
Propriedades físicas	Porosidade (%)	33-43	Monumentos em Toledo, Espanha	XII-XIV	(López-Arce *et al*., 2003)
	Densidade aparente (kg/m^3)	1500-1600	Monumentos em Toledo, Espanha	XII-XIV	(López-Arce *et al*., 2003)
		1400-1900	Edifícios de civilização Romana e Bizantina, Grécia	II-XIV	(Stefanidou *et al*., 2015)
	Teor em água máximo (%)	19-22	Monumentos em Toledo, Espanha	XII-XIV	(López-Arce *et al*., 2003)
		18,5-28,8	"Torrazzo" de Cremona, Itália	VIII-XIII	(Binda *et al.*, 2000)
		10-21	Hospital das cinco chagas, Espanha	XV	(Barrios *et al*., 2000)
		14-30	Edifícios de civilização Romana e Bizantina, Grécia	II-XIV	(Stefanidou *et al*., 2015)
	Coeficiente Capilaridade (kg m^{-2}s$^{-0,5}$)	0,14-0,30	Hospital das cinco chagas, Espanha	XV	(Barrios *et al*., 2000)
Propriedades mecânicas	Resistência à compressão (MPa)	33,4-33,7	Tijolos de monumentos em Toledo, Espanha	XII-XIV	(López-Arce *et al*., 2003)
		8-25,4	"Torrazzo" de Cremona, Itália	VIII-XIII	(Binda *et al.,* 2000)
		14-32,2	Hospital das cinco chagas, Espanha	XV	(Barrios *et al.,* 2000)
		4-20	Tijolos de civilização Romana e Bizantina, Grécia	II-XIV	(Stefanidou *et* al., 2015)

Fernandes e Lourenço (2007) realizaram um estudo incidente sobre as propriedades de tijolos antigos e contemporâneos, de produção tradicional, tendo concluído que as variações de

propriedades, dos antigos para os modernos, apresentavam redução da porosidade, de 29,1% para 20,7% e do valor médio de teor em água, de 17,7% para 11,2%. Tendo em atenção que os tijolos foram produzidos com matérias-primas diferentes, as propriedades avaliadas apresentaram diferenças relevantes, tendo concluído que os tijolos recentes podem não se constituir como uma alternativa possível para a substituição dos tijolos antigos (Lourenço *et al.,* 2010).

2.3 Tratamentos consolidantes

A ação de consolidação num material consiste na restituição da coesão e das suas propriedades mecânicas. Durante a aplicação de um produto consolidante existem condicionantes que influenciam a ação de consolidação.

Atualmente, no mercado, existe uma variedade de produtos consolidantes, tais como os produtos à base de silicato de etilo, resinas acrílicas ou resinas epoxídicas. Como tal, têm sido realizados estudos sobre a aplicação de vários produtos consolidantes em diferentes substratos, como a pedra ou o cerâmico, sobre os quais pode ocorrer efeitos favoráveis ou adversos.

2.3.1 Ação consolidante

A seleção da ação de conservação a levar a cabo numa dada situação obriga ao prévio e profundo conhecimento da situação em causa, que necessariamente terá de incluir a caracterização do material e do seu estado de conservação.

Quando os materiais cerâmicos registam a presença de processos de perda de massa e redução da sua coesão, a sua substituição ou consolidação são as opções que habitualmente surgem numa ação de conservação. De acordo com o princípio de intervenção mínima, a opção de uma substituição generalizada, deve ser secundarizada face à possibilidade de manutenção dos materiais originais (Aguiar *et al*., 2001).

O recurso a tratamentos consolidantes resulta da aplicação de produtos consolidantes com o objetivo de incrementar a coesão e as características mecânicas do material (Aguiar, 1999).

A ação consolidante é fortemente condicionada por diversos aspetos, como por exemplo: composição do material, dimensão e tipo de espaço poroso, tipo e propriedades de produtos de consolidação, protocolos de aplicação, condições de cura, etc. (Delgado Rodrigues, 2010). A ação consolidante é condicionada, ainda, pela metodologia de tratamento, que pode ser descrita com recurso a parâmetros, tais como: concentração do consolidante, tipo de solvente, processo de aplicação e tempo de contacto (Ferreira Pinto e Delgado Rodrigues, 2008).

A ação do tratamento consolidante pode ser avaliada recorrendo a diferentes aspetos, como sejam: a quantidade de produto absorvida, as alterações de propriedades (físicas e mecânicas) induzidas no substrato, a profundidade de penetração do consolidante e as características apresentadas na interface entre zonas tratadas e não tratadas**.** A quantidade de produto absorvida e retida no material após a polimerização consistem em bons indicadores da ação consolidante, apesar de variarem de acordo com o substrato que foi objeto de tratamento, porque dependem do espaço poroso existente e da sua configuração. Por exemplo, no caso de rochas graníticas a quantidade de produto absorvida é habitualmente reduzida devido à sua reduzida porosidade (Costa e Delgado Rodrigues, 2008).

Tendo em atenção que um tratamento consolidante tem como função principal restituir coesão e resistência ao substrato, a avaliação da sua eficácia terá de ser realizada através da análise das alterações promovidas pelo tratamento nas características do material que dependem da sua coesão e da resistência mecânica, como sejam: dureza superficial, resistência em profundidade, resistência à flexão e à compressão, velocidade de propagação de ultra-sons e módulo de elasticidade (Ferreira Pinto e Delgado Rodrigues, 2008).

Além da avaliação da eficácia inicial, o estudo de um tratamento consolidante deverá também incluir aspetos relacionados com a sua durabilidade e o seu potencial para vir a ser responsável por acelerar processos de degradação presentes ou pelo surgimento de novos processos.

O produto consolidante deve apresentar características adequadas para que a espessura tratada possua características compatíveis, em termos físicos, químicos e mecânicos com o substrato, que tenha um envelhecimento semelhante ao substrato e não inviabilize a realização de tratamentos futuros, altere de forma significativa a porosidade, o aspeto visual do substrato e as suas propriedades de transporte de água (Tavares *et al.*, 2005).

A consolidação tem sido realizada recorrendo a um conjunto relativamente vasto de produtos orgânicos e inorgânicos. Os produtos orgânicos são caracterizados por ter maior capacidade adesiva, flexibilidade e facilidade de aplicação, mas apresentam menor capacidade de penetração, instabilidade química (degradação com oxigénio, ozono, raios ultravioleta e soluções ácidas ou alcalinas), suscetibilidade ao ataque microbiológico, menor durabilidade e são desconhecidos os efeitos no comportamento do substrato. Os produtos inorgânicos são distinguidos pela maior afinidade química e física com o substrato, por não alterarem propriedades hidrófilas no substrato e por apresentarem maior estabilidade química e face a raios ultravioleta (Aguiar, 1999). Atualmente, os produtos consolidantes disponíveis e mais comuns no mercado são resinas acrílicas e epóxidas, que são produtos orgânicos, e produtos à base de silicato de etilo.

A aplicação de um produto consolidante pode ser efetuada de diversas formas, como por exemplo: pincelagem, pulverização, injeção, absorção por capilaridade, absorção por compressas ou por imersão (Tavares *et al*., 2005).

A profundidade de penetração de um produto consolidante depende das suas características e do espaço poroso do substrato. A penetração de um consolidante numa pedra granítica pode atingir profundidades superiores às atingidas num calcário, com porosidade bastante superior à do granito, devido às características do espaço poroso. Comparando o comportamento de rochas fissuradas, como por exemplo, rochas graníticas e mármores, que apresentam baixos valores de porosidade (pode chegar a 3%) a maioria dos produtos consolidantes apresentam elevada profundidade de penetração. Quanto a rochas carbonatas, a tarefa torna-se mais complicada, e, como tal, tem se vindo a tentar procurar alternativas de resolução do problema, através do uso de consolidantes inorgânicos, modificações de produtos existentes ou recorrendo a produtos usados antigamente (Delgado Rodrigues, 2010).

Ferreira Pinto (2002) estudou diversos tratamentos consolidantes que resultaram na aplicação de um silicato de etilo (TEOS), uma resina acrílica (Paraloid B-72) e uma resina epóxidica (EP 2101), por capilaridade, por pincelagem e por imersão, em três variedades carbonatadas portuguesas. Este estudo conclui que os tratamentos realizados com resina epoxídica foram aqueles que originaram maior incremento de dureza superficial, face à ação obtida com os restantes produtos. Relativamente à influência do método de aplicação na ação consolidante, o referido estudo concluiu que a dureza superficial obtida nos tratamentos realizados por pincelagem e por imersão foi semelhante, o que indicia que esta depende maioritariamente do produto consolidante, não sendo muito afetada pelo método de aplicação utilizado. As resinas promoveram maior incremento de dureza superficial do que o silicato de etilo. De uma maneira geral, neste estudo é demonstrado que o mesmo produto consolidante aplicado através de métodos diferentes origina ações consolidantes diferentes, não só porque a quantidade de produto envolvido em cada situação é diferente, mas também porque a distribuição do produto e a intensidade da ação consolidante resultante são diferentes

Note-se, também que, pode ser difícil garantir a consolidação de materiais muito porosos, muito embora a quantidade de produto absorvida possa ser elevada (Ferreira Pinto e Delgado Rodrigues, 2008)**.**

Franzoni *et al.* (2013) estudaram diversos tratamentos consolidantes que resultaram da aplicação por imersão e por pincelagem em tijolos cerâmicos. O silicato de etilo revelou facilidade em penetrar nos tijolos e promoveu limitada redução na porosidade, elevada diminuição da absorção de água e considerável aumento da resistência à compressão, tendo sido considerado uma solução promissora para a consolidação de tijolos cerâmicos. Os tratamentos por imersão promoveram maior diminuição de porosidade e de diâmetro dos poros, do que os tratamentos por pincelagem, sendo maior a influência nos poros de menor diâmetro**.**

A consolidação também tem sido estudada e aplicada a azulejos, com objetivo de aumentar a coesão. O tratamento de azulejos com uma resina acrílica (Paraloid B-72) aplicada por imersão demonstrou incremento da resistência à flexão e diminuição da porosidade (Vaz *et al*., 2008)**.**

No estudo de comparação entre três consolidantes, um contendo silicato de etilo (TEOS), outro à base de resina siloxanica (IN2210) e outro contendo resina acrílica (Paraloid B-72) aplicados sobre azulejos cerâmicos, foram estudados três métodos de aplicação: imersão, pincelagem e pulverização. Na aplicação da resina acrílica por pulverização a presença de ação consolidante é praticamente nula, ao contrário da aplicação por imersão ou por pincelagem, que apresentam resultados semelhantes. Na aplicação do consolidante à base de silicato de etilo e da resina siloxanica verificaram-se comportamentos distintos, isto é, a IN2210 demonstrou um comportamento semelhante ao Paraloid B-72, ao contrário do TEOS, que apresentou pequenas alterações no comportamento hidrofóbico (mesmo após a segunda aplicação). No estudo da resistência mecânica à flexão demonstrou-se aumento de valores face à amostra não tratada, sendo que a maior diferença foi apresentada pelo Paraloid B-72 aplicado por imersão (Constâncio *et al*., 2010).

Tendo em atenção que a presente dissertação tem como objetivo estudar a consolidação de materiais cerâmicos (tijolos cerâmicos), a Tabela 2.3 apresenta um conjunto de propriedades avaliadas em materiais cerâmicos, antes e após o seu tratamento com produtos consolidantes à base de silicato de etilo e de resina acrílica.

Tabela 2.3- Variação de propriedades físicas e mecânicas de elementos cerâmicos (tijolos e azulejos) antes e após tratamento consolidante.

Elemento	Produto consolidante	Método aplicação	Propriedades	NT	T	Referência
Tijolo cerâmico	TEOS (silicato etilo)	Pincel	Teor em água máximo (%)	30,4±0,12	23,6±0,39	(Franzoni *et al.*, 2013)
			Resistência à compressão (MPa)	13,8±0,9	21±3,5	
		Imersão	Teor em água máximo (%)	30,4±0,12	22,7±0,5	
			Resistência à compressão (MPa)	13,8±0,9	22,7±5,1	
Azulejo cerâmico	TEOS (silicato etilo)	Pincel	Porosidade (%)	27,7	22,6-27,6	(Constâncio *et al*., 2010)
			Teor em água máximo (%)	16,5	14,4-16,1	
			Resistência à flexão (MPa)	16,94±2,22	17,37-18,24	
		Pulverização	Porosidade (%)	27,7	24,8-28,7	
			Teor em água máximo (%)	16,5	14,5-17	
			Resistência à flexão (MPa)	16,94±2,22	15,93-17,67	
	IN2210 (silicato etilo)	Pulverização	Porosidade (%)	27,7	1,1-2,4	
			Teor em água máximo (%)	16,5	0,6-1,4	
			Resistência à flexão (MPa)	16,94±2,22	15,34-19,93	
	Paraloid B-72 (resina acrílica)	Pincel	Porosidade (%)	27,7	0,4-3,4	
			Teor em água máximo (%)	16,5	0,2-2,0	
			Resistência à flexão (MPa)	16,94±2,22	15,72-19,62	
		Pulverização	Porosidade (%)	27,7	26,6	
			Teor em água máximo (%)	16,5	8,9-15,7	
			Resistência à flexão (MPa)	16,94±2,22	15,98-18,01	
		Imersão	Porosidade (%)	27,7	0,7-0,8	
			Teor em água máximo (%)	16,5	0,4	
			Resistência à flexão (MPa)	16,94±2,22	23,57-25,62	
Azulejo cerâmico	Tegovakon (silicato etilo)	Pincel	Porosidade (%)	34-35	33-34	(Revez *et al*., 2008)
			Teor em água máximo (%)	19-20	18-19	
	Rhodorsil (silicato etilo)	Pincel	Porosidade (%)	34-35	28-32	
			Teor em água máximo (%)	19-20	15-18	
Azulejo cerâmico	Paraloid B-72 (resina acrílica)	Imersão	Porosidade (%)	22-28	7-28	(Vaz *et al.*, 2008)
			Teor em água máximo (%)	11-17	3-18	
			Resistência à flexão (MPa)	2-12	9-21	

NT: exemplar não tratado; T: exemplar tratado

2.3.2 Riscos inerentes à aplicação de tratamentos consolidantes

Um tratamento consolidante pode revelar um desempenho reduzido, nocivo e irreversível. A ação consolidante com este desfecho pode ter como causa a inexistência de estudos de caracterização preparatórios, uma transposição errada de resultados laboratoriais para a realidade de obra, ou mesmo, a atribuição de características a novos produtos que não correspondem à realidade. Sendo a decisão de consolidar uma ação de risco é de extrema importância que o objeto consolidado seja monitorizado e que, caso apresente sinais de degradação, seja realizada a assistência necessária.

A combinação de diferentes coeficientes de expansão térmica, entre a espessura tratada e não tratada, constitui uma causa de degradação em suportes tratados.

A consolidação de variedades carbonatadas com porosidade inferior a 15%, constitui-se como de difícil concretização.

A presença de sais no substrato constitui um aspeto condicionante para o comportamento do mesmo face à aplicação de um produto consolidante. Muito embora a existência de sais não possa impedir a absorção de produtos consolidantes, a sua presença vai influenciar o comportamento do substrato após a consolidação, na presença de água ou de variações do teor de humidade.

A seleção do produto consolidante deve ter em conta vários parâmetros condicionantes, como o substrato a ser tratado e a viscosidade do produto, no entanto, a adequabilidade do produto não é total, ou seja, não existe um produto consolidante que consiga responder a todas as necessidades da ação de consolidação (Delgado Rodrigues, 2010).

2.3.3 Tratamentos consolidantes com produtos à base de silicato de etilo

A análise de propriedades químicas, para além da caracterização física e mecânica, tem um papel preponderante na escolha do produto consolidante. De acordo com a composição química do material a ser tratado, deve ser feita a escolha entre os produtos consolidantes disponíveis no mercado.

Na presente dissertação, o substrato a tratar é o tijolo cerâmico de barro vermelho. Estudos realizados em materiais semelhantes revelaram que estes apresentam um elevado teor em sílica, cujo valor revelava reduzida variabilidade (54 a 61%) (Lourenço *et al.*, 2010). A afinidade química entre substratos ricos em sílica e respetivo produto consolidante é conseguida se a matéria ativa do produto for adequada. Deste modo, neste tipo de suportes, produtos consolidantes à base de silicato de etilo (Cultrone e Madkour, 2013) revelam afinidade química

com o suporte o que permite que o produto não só se localize no interior dos poros dos tijolos, como se ligue quimicamente aos mesmos.

A primeira reação química envolvida após a aplicação de um silicato de etilo é a sua reação com a água presente nos poros do material, sob a forma de humidade. Da hidrólise do silicato de etilo são formados o etanol e o silanol. Quando o silanol sofre desidratação, ocorre a precipitação de sílica gel, no interior dos poros dos tijolos e, nesta fase, também o etanol vai sucessivamente evaporando. A reação está apresentada na Figura 2.3.

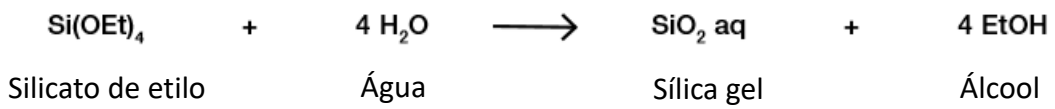


Figura 2.3- Reação de hidrólise do silicato de etilo e precipitação de sílica gel (Wacker, 2014).

A sílica gel formada é um composto inorgânico que revela potencial de compatibilidade química com o substrato e boa durabilidade, ao contrário do que acontece com pedras carbonatadas. O silicato de etilo liga-se a grupos hidroxilo presentes nos tijolos e leva, assim, ao aumento de coesão e resistência mecânica. Nas primeiras horas de aplicação, a viscosidade do consolidante aumenta, impedindo que este percole para o exterior dos tijolos. Aproximadamente ao fim de um mês, após o tratamento, toda a sílica gel foi formada e depositada no interior dos poros dos tijolos. Os consolidantes contendo silicato de etilo normalmente são aplicados por pincelagem ou por spray (Franzoni *et al*., 2013).

3. Apresentação e descrição do plano de trabalhos

3.1 Considerações iniciais

Este capítulo tem como objetivo apresentar e descrever o plano de trabalhos realizado para dar resposta aos objetivos estabelecidos para a dissertação. Primeiramente são abordados os materiais utilizados, o tijolo cerâmico e o produto consolidante. De seguida é descrito o plano de trabalhos, que pode ser dividido em três fases distintas. A primeira fase apresenta o plano de trabalhos realizado para a caracterização da amostra de tijolos cerâmicos disponibilizada para a realização do estudo. A segunda fase descreve a metodologia de tratamento utilizada e os procedimentos de preparação dos provetes antes do tratamento e monitorização realizada depois. A terceira fase apresenta o plano de ensaios utilizados na avaliação da ação consolidante. Por fim, são descritas as metodologias de ensaio utilizadas.

O trabalho experimental foi desenvolvido no Laboratório do DECivil do IST.

3.2 Materiais estudados

3.2.1 Material cerâmico

O material cerâmico utilizado no desenvolvimento do estudo foi selecionado de uma amostra de tijolos apresentando dimensões entre 4x5x20 (cm) e de 4x5x12 (cm), recolhida e transportada para as instalações do Laboratório de DECivil do IST, no âmbito de estudos de caracterização de alvenarias antigas ali realizados.

Os tijolos constituintes da amostra possuem alguma variabilidade de características, não só em termos dimensionais, como devido à presença de irregularidades, defeitos e resíduos de argamassa nas suas faces, tal como pode ser observado na Figura 3.1, características que indiciam uma produção artesanal ou pouco industrializada.

Figura 3.1- Tijolo cerâmico- aspeto visual.

A observação visual dos tijolos permite facilmente identificar a presença de uma face que se distingue das restantes, pelo facto de se encontrar mais regular, com menos textura e irregularidades, Figura 3.2, que deverá resultar do processo de compactação, isto é, deve ter sido a face submetida à prensagem para dar forma aos tijolos.

a) b)

Figura 3.2- Aparência das faces exteriores do tijolo: a) face superior mais regular e com reduzida textura e face vertical mais irregular; b) face superior mais regular.

3.2.2 Produto consolidante

O SILRES BS OH 100 foi o produto consolidante selecionado para o desenvolvimento do estudo, presente na Figura 3.3. Este produto é um silicato de etilo produzido pela empresa Wacker e na Tabela 3.1 são apresentadas as informações relativas ao produto e à sua aplicação referidas pelo fabricante na respetiva ficha técnica (Wacker, 2014).

Tabela 3.1- Informações acerca do produto consolidante e sua aplicação, retiradas da ficha técnica da Wacker (Wacker, 2014).

Características e benefícios	• Não tem solvente; • Pronto a usar; • Baixo peso molecular que leva a boa penetração; • Não tem subprodutos que levem à degradação do material de construção; • Tem um ligante mineral que é compatível com o material de construção e resiste ao ataque de ácidos.
Substratos	Pedra natural, estuque, frescos, tijolos cerâmicos e terracota.
Condições do substrato	• O substrato deve estar limpo; • 2 a 3 dias antes, o substrato não deve apanhar chuva diretamente; • Antes e durante o tratamento, o substrato não deve ter incidência direta do sol.
Condições de aplicação	• Temperatura: 10-20 ºC; • Humidade relativa ≥ 40%.
Propriedades físicas do produto	• Cor: transparente, amarelado; • Teor em silicato de etilo: aprox. 100%; • Densidade: 1g/cm^3; • Catalisador: neutro.
Métodos de aplicação	• Pulverização; • Pincelagem; • Imersão.

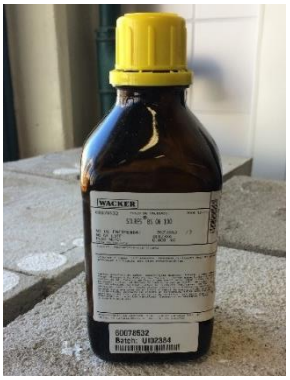


Figura 3.3- Produto consolidante utilizado.

3.3 Plano de trabalhos

O plano de trabalhos foi definido para dar resposta a três fases de trabalho experimental necessárias à concretização dos objetivos estabelecidos: caracterização do material cerâmico, aplicação do produto consolidante e preparação dos provetes antes do tratamento e, por fim, a caracterização da ação consolidante.

A primeira fase inclui a obtenção e preparação dos tijolos cerâmicos para, posteriormente, se proceder à sua caracterização física e mecânica. A segunda é respeitante ao procedimento de aplicação do produto consolidante e a obtenção de parâmetros de caracterização da ação de consolidação, bem como, aos procedimentos necessários para a aplicação atuação do produto. A terceira destina-se à avaliação de eficácia da ação consolidante através da determinação de variações em parâmetros físicos e mecânicos dos provetes cerâmicos tratados e não tratados.

3.3.1 Fase 1- Caracterização do material cerâmico

Da amostra total de tijolos disponíveis, procedeu-se à seleção de um conjunto de 56 tijolos com dimensões semelhantes, de aproximadamente 4x5x20 (cm), e com reduzida presença de vestígios de argamassa. Todos os tijolos selecionados foram lavados e os resíduos de argamassa removidos. De seguida, foram identificados e teve início a sua caracterização.

Dos 56 tijolos, 3 foram utilizados para obter informação relativamente às suas características mecânicas e apoiar o processo de decisão relativamente ao modo de preparação dos provetes para a realização dos ensaios mecânicos antes e após tratamento. Para tal, procedeu-se à sua identificação e ao corte de um tijolo em 5, com aproximadamente 3,5x4x5 (cm), e de dois tijolos em provetes prismáticos destinados, respetivamente, à avaliação da resistência mecânica à compressão e à flexão.

Nestes provetes as letras de identificação utilizadas foram “C” e “F”, para provetes destinados a ensaios de compressão e flexão, respetivamente. Os provetes marcados com a letra “C” foram de seguida marcados com o número 1, que identifica o primeiro tijolo onde foi realizado este corte. Por fim, os provetes são marcados com o número de identificação da sua posição no tijolo. Os provetes marcados com a letra “F” foram identificados com o número 1 ou 2 de acordo com o tipo de corte realizado, deste modo o número 1 destinou-se ao corte de 2 provetes iguais, com aproximadamente 2,5x4x20 (cm) cada um e o 2 ao corte de 4 provetes iguais, com aproximadamente 2x2,5x20 (cm) cada um. De seguida, cada provete é marcado com um número identificador da sua posição no tijolo.

A seleção da face a utilizar na aplicação do produto foi efetuada tendo em atenção aquela que à partida pode estar acessível em obra para receber o tratamento, ou seja uma das faces do tijolo que não corresponde à face de assentamento.

A definição da geometria dos provetes e as condições de ensaio a utilizar na avaliação da resistência à compressão e à flexão do material cerâmico, antes e após tratamento, foi realizado por forma a garantir que, no ensaio de compressão a carga era aplicada na perpendicular à face tratada e que, no ensaio de flexão a face sujeita à tração era a tratada.

Após a realização do ensaio de resistência à flexão, o provete F1.2 (originário do tijolo cortado em 2 provetes iguais) deu origem a 6 provetes cúbicos para a realização do ensaio de resistência à compressão. Dos 6 provetes cúbicos, 3 foram cortados sem retificação das faces, com aproximadamente 2,3x2,4x4 (cm), e os outros 3 foram cortados com retificação, medindo aproximadamente 2,3x2,4x3 (cm). Estes provetes foram marcados com a identificação do provete que lhes deu origem e foi lhes acrescentado mais um número, de 1 a 6, que identifica a posição do provete e o tipo de corte realizado. Os provetes com números de 1 a 3 não têm retificação das faces e provetes com números de 4 a 6 têm as suas faces retificadas.

O sistema de numeração destes provetes está apresentado na Figura 3.4.

Os restantes 53 tijolos foram identificados com a letra “T” seguida do número de identificação do tijolo, que não foi alterado durante a continuação do estudo.

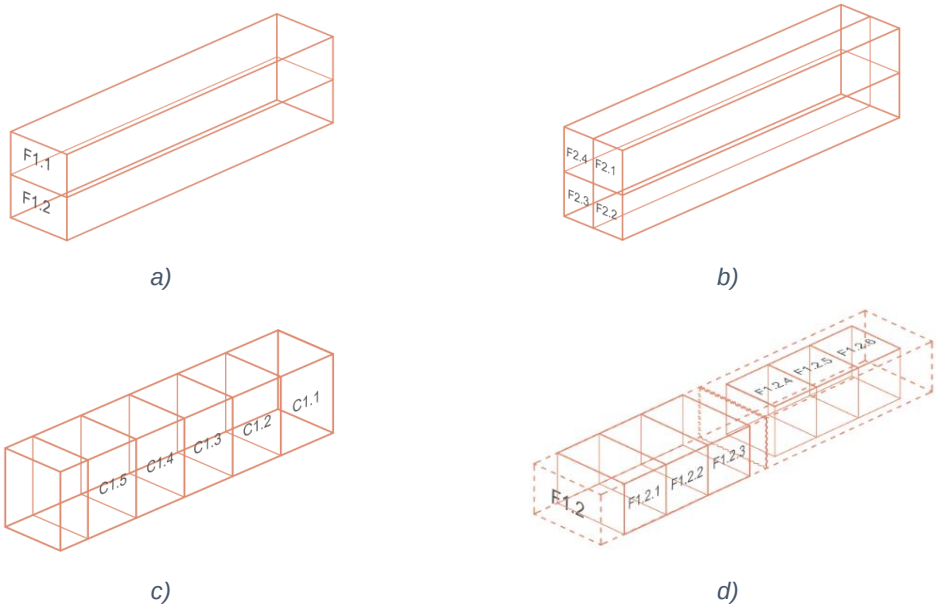


Figura 3.4- Identificação dos provetes para a caracterização mecânica: a) ensaio de resistência à flexão: corte 1; b) ensaio de resistência à flexão: corte 2; c) ensaio de resistência à compressão: corte 1; d) ensaio de resistência à compressão: corte de provetes com e sem retificação.

De seguida, é feita a escolha dos tijolos que irão ser utilizados na continuação do estudo. Após a realização dos ensaios de porosidade, teor em água após imersão de 48 horas, absorção de água por capilaridade e velocidade de propagação de ultra-sons, os 53 tijolos foram sujeitos a um processo de seleção que averigua quais devem ser utilizados na continuação do estudo. Após a análise dos valores obtidos no ensaio de porosidade, verificou-se que existe um intervalo alargado de valores, por isso, tornou-se necessário diminuir a heterogeneidade da amostra, reduzindo o número de tijolos para um conjunto que apresentasse valores de porosidade mais próximos. Para isso, foram selecionados os tijolos com valores de porosidade mais elevados, porque a porosidade é um parâmetro indicador do estado de degradação do tijolo e influenciador da penetração do produto consolidante, ou seja, da ação consolidante. Realizou-se novamente a caracterização dessa amostra, recorrendo ao ensaio de absorção de água por capilaridade, de propagação de ultra-sons e de resistência à perfuração controlada.

O plano de todos os ensaios realizados está esquematicamente representado na Figura 3.5.

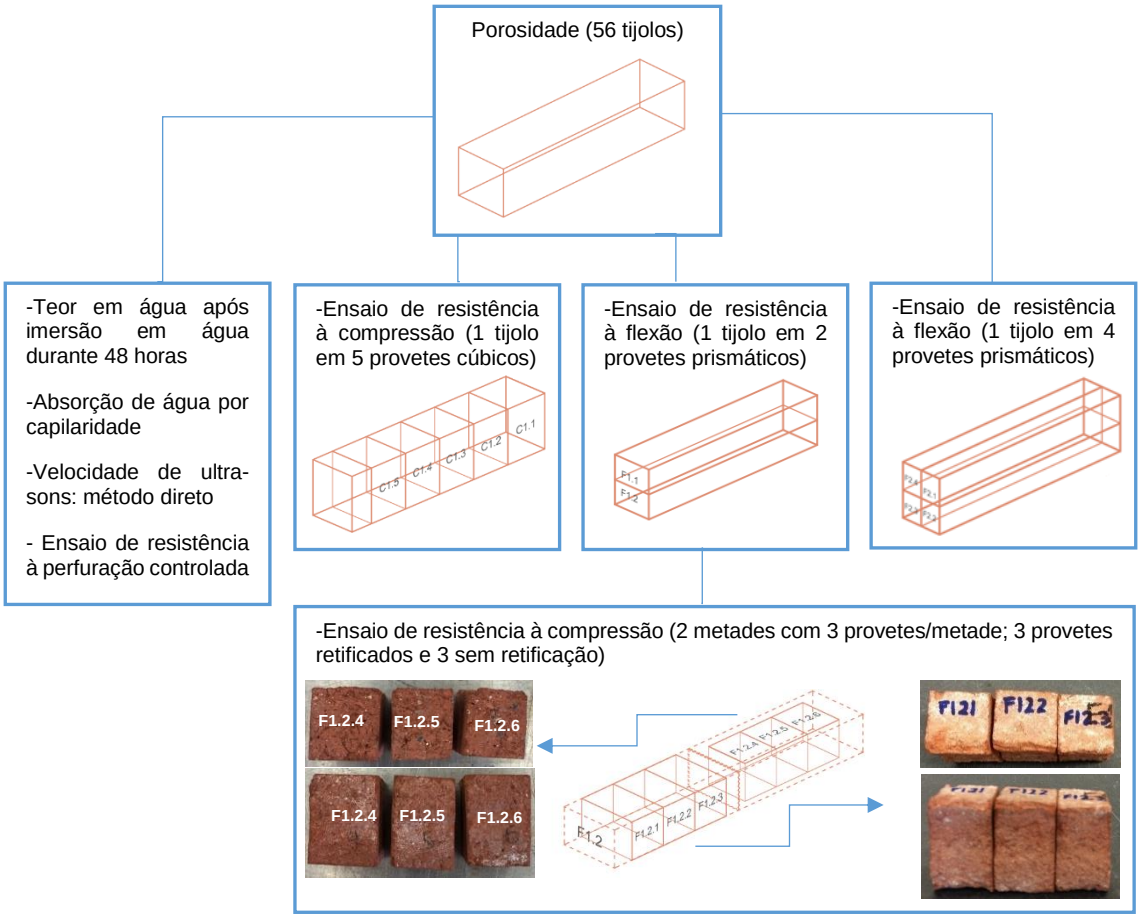


Figura 3.5- Plano de ensaios da fase 1 do trabalho experimental- caracterização do material cerâmico.

Por fim, procedeu-se à seleção de 6 tijolos, para a continuação do estudo, que aliassem valores de porosidade mais elevados com a forma mais adequada, isto é, que apresentassem o mínimo de irregularidades nas faces e dimensões mais semelhantes entre si.

Os 6 tijolos escolhidos destinam-se a um tipo de corte originando 2 provetes “F” por cada tijolo, com aproximadamente 2,5x4x20 (cm).

3.3.2 Fase 2- Tratamento consolidante

Tendo em atenção que uma das reações envolvidas no processo de ação do produto consolidante é a hidrólise, foi necessário, antes da aplicação do produto, garantir que os provetes tivessem humidade no seu interior.

Estabeleceu-se que o teor em água dos provetes no momento do seu tratamento era no mínimo o teor em água dos tijolos expostos ao ambiente do laboratório durante pelo menos 1 mês, partindo de uma situação inicial de secagem em estufa a 60º C. Deste modo, foram realizados dois controles em paralelo:

- Foi calculado o teor em água de 3 tijolos expostos no laboratório durante um mês;
- Foi controlado o teor em água de 2 tijolos colocados na camara húmida, com humidade relativa de 100%, durante 24 horas e, posteriormente, deixados em equilíbrio com o ambiente de laboratório durante12 dias.

Nas instalações do laboratório foi realizado um controlo de temperatura e humidade relativa para garantir que não ocorresse variação excessiva destas condições da sala.

Para a escolha dos provetes a tratar foram escolhidos e identificados 6 provetes de tijolos diferentes, de modo a que houvesse no mesmo tijolo um provete não tratado, para garantir uma referência, e outro para aplicação do tratamento. A identificação destes provetes começa com a atribuição da letra “F”, porque estavam destinados ao ensaio de flexão. Depois da letra, é atribuído o número do tijolo que foi cortado para dar origem aos provetes e, por fim, são marcados com o número 1 ou 2, para identificação entre provetes não tratados e tratados, respetivamente.

De seguida, os provetes destinados à aplicação do tratamento consolidante, foram colocados na câmara húmida com humidade relativa de 100%, durante 24 horas e, posteriormente deixados em equilíbrio com o ambiente de laboratório durante 6 dias. Durante este período, desde a colocação na camara húmida ate estabelecer equilíbrio com o ambiente de laboratório, o teor em água dos provetes foi controlado e, novamente, foi verificado o valor de humidade relativa e temperatura da sala de laboratório.

Para a escolha do modo de aplicação do produto consolidante, foram tidos em conta dois fatores:

- O produto consolidante necessita penetrar até à profundidade desejada;
- O modo de aplicação deve poder ser reproduzido em obra.

O modo de aplicação escolhido foi a aplicação com recurso a pincel. O produto consolidante foi aplicado por pincelagem na face do tijolo, já definida, e penetra no substrato por absorção capilar.

As condições de aplicação do produto consolidante por pincelagem foram estabelecidas com o objetivo de criar condições para procurar garantir o tratamento integral de toda a espessura dos provetes, tendo sido necessário para tal a definição do número de aplicações, a definição da duração de cada aplicação e o intervalo de tempo entre aplicações. Estas condições foram estabelecidas recorrendo ao tratamento de alguns provetes no âmbito de um estudo preliminar realizado para o efeito, com o objetivo de garantir igualdade de condições de tratamento para todos os provetes tratados utilizados na caracterização da ação consolidante.

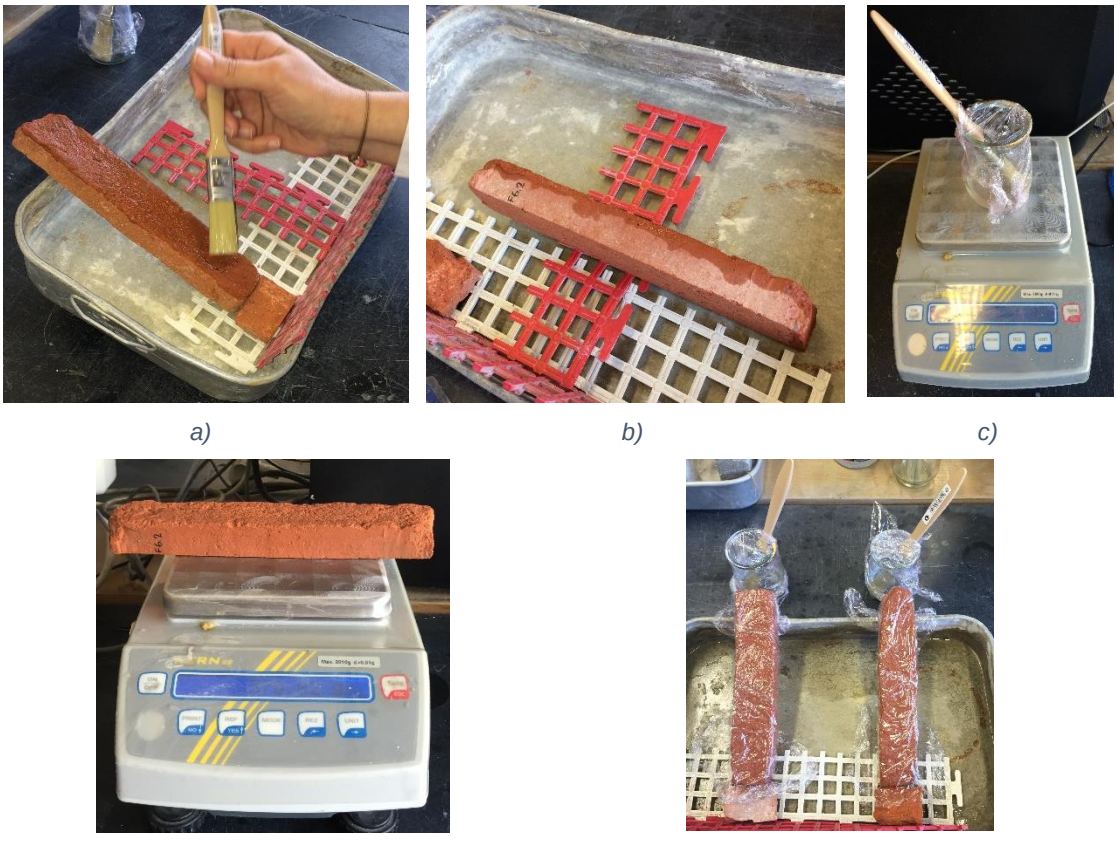
O tratamento realizado consistiu num conjunto de 6 a 10 aplicações de produto durante 5 minutos cada uma. O intervalo de tempo entre aplicações variou durante a totalidade de tempo necessário à realização do tratamento estudado (de 240 a 120 minutos) entre 5 minutos e 30 minutos. Os intervalos de tempo entre aplicações foram estabelecidos com o objetivo de garantir que a superfície de aplicação manifestava capacidade de absorção de produto e que o tempo de espera era suficientemente curto para garantir condições de aplicação de “molhado” em “molhado”. Os intervalos de tempo de espera entre a 1ª e a 2ª aplicação, a 2ª e a 3ª aplicação e

a 3ª e a 4ª aplicação foram de 5, 10 e 15 minutos, respetivamente, e os restantes foram de 30 minutos. A Figura 3.6 apresenta as fases do tratamento consolidante realizado, onde na Figura 3.6 a) se verifica que o produto consolidante foi aplicado com o provete ligeiramente inclinado, tentando recriar condições de aplicação realistas e na Figura 3.6 e) que devido à volatilidade do produto foi necessário recorrer a uma película para evitar que este evaporasse.

Procedeu-se à avaliação da quantidade de produto consumida e absorvida associada ao tratamento de todos os provetes tratados. A avaliação da quantidade de produto consumida foi realizada com base na quantidade de produto utilizada para a execução do tratamento tendo por base a variação da massa do conjunto recipiente, produto e pincel (equação *[3-1]*). A avaliação da quantidade de produto absorvida foi efetuada recorrendo à variação da massa dos provetes antes e durante cada aplicação realizada (equação *[3-2]*).

$$Quantidade\ de\ produto\ consumido = \frac{(massa\ inicial_{recipiente+produto+pincel} - massa\ final_{recipiente+produto+pincel})}{área\ da\ face\ de\ aplicação} \quad [3\text{-}1]$$

$$Quantidade\ de\ produto\ absorvido = \frac{(massa\ final_{provete} - massa\ inicial_{provete})}{área\ da\ face\ de\ aplicação} \quad [3\text{-}2]$$



a) *b)* *c)*

d) *e)*

Figura 3.6- Fases do tratamento consolidante: a) aplicação do produto consolidante com pincel; b) progressão da franja líquida; c) registo da massa do conjunto recipiente, produto e pincel; d) registo da massa do provete; e) colocação de película para evitar a excessiva evaporação do produto.

Após o tratamento, os provetes foram dispostos na sala de laboratório durante cerca de 45 dias, para que as reações necessárias à consolidação possam ocorrer. Durante esse período foram registados os valores de massa dos provetes e controlados os valores de temperatura e humidade relativa da sala.

Durante este periodo de monitorização foram avaliados não só a variação da massa de cada provete ao longo do tempo, mas também, a quantidade de produto evaporado, equação [3-3] e o teor em consolidante, equação [3-4], de cada provete.

A quantidade de produto evaporado foi calculada com base na seguinte expressão:

$$Quantidade\ de\ produto\ evaporado = \frac{m_0 - m_i}{m_0} \times 100\ [\%] \qquad [3\text{-}3]$$

onde,

m_0- massa de cada provete logo após a finalização da aplicação de produto consolidante [g];

m_i- massa de cada provete após i dias depois da finalização da aplicação do produto consolidante [g].

O valor de teor em consolidante foi obtido através da seguinte expressão:

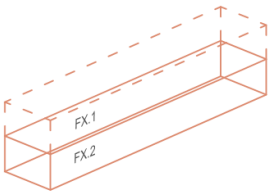
$$Teor\ em\ consolidante = -\left(\frac{m_{seca} - m_i}{m_{seca}}\right) \times 100\ [\%] \qquad [3\text{-}4]$$

onde,

m_{seca}- massa seca de cada provete [g]

m_i- massa de cada provete após i dias depois da finalização da aplicação do produto consolidante [g].

Na Figura 3.7, é apresentado esquematicamente a ordem de processos realizada nesta fase laboratorial.



-Colocados na câmara húmida por 24h e na sala do laboratório por 6 dias;

-Determinação do teor em água;

-Tratado na totalidade;

-Expostos na sala do laboratório durante 1 mês e meio.

Figura 3.7- Plano de trabalhos da fase 2 do trabalho experimental- Aplicação do produto consolidante.

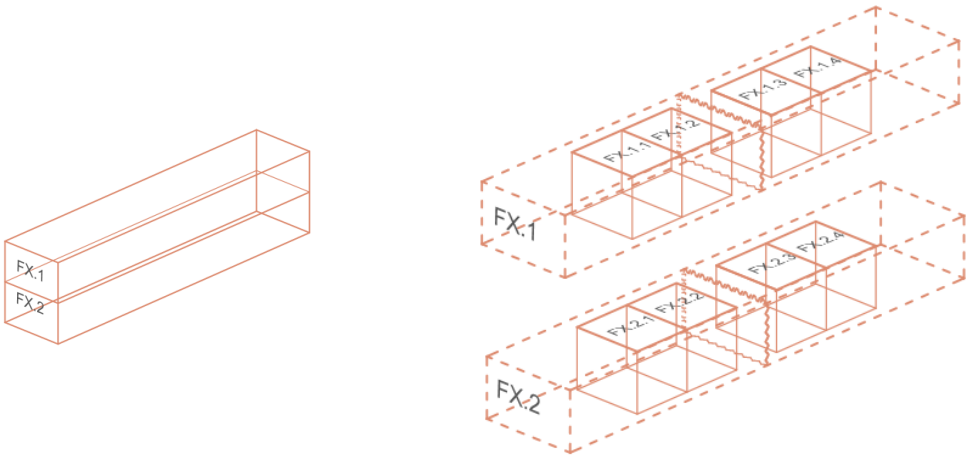
3.3.3 Fase 3- Avaliação da eficácia inicial do tratamento consolidante

Ao fim do período de estabilização no laboratório, procedeu-se à realização dos ensaios para a avaliação de eficácia do tratamento. Os ensaios realizados foram os seguintes: ensaio de porosidade, ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons (através do método direto e indireto) e ensaio de resistência à flexão. Os provetes sujeitos a estes ensaios (provetes "F") foram previamente identificados para a aplicação do produto consolidante.

Após o ensaio de resistência à flexão, cada provete foi cortado, para obtenção de 4 provetes retificados, com aproximadamente 2,3x2,4x3 (cm). Originando 24 provetes tratados e 24 provetes não tratados, dos quais 3 provetes tratados e 3 provetes não tratados foram destinados ao ensaio de resistência à perfuração controlada e os restantes ao ensaio de resistência à compressão.

Os provetes retificados provenientes dos provetes "F", depois do ensaio de resistência à flexão, utilizaram a identificação dos provetes que lhes deram origem, tendo sido adicionado mais um número de 1 a 4, para identificar a sua localização. A identificação da localização do provete retificado é necessária para a comparação de valores de resistência à compressão estabelecida entre a amostra tratada e a não tratada.

O sistema de numeração destes provetes está apresentado na Figura 3.8.



a) *b)*

Figura 3.8- Identificação dos provetes destinados à avaliação da eficácia: a) ensaio de resistência à flexão; b) ensaio de resistência à compressão e à perfuração controlada.

Nas Figura 3.9 estão apresentados esquematicamente o plano de ensaios realizado nesta fase de trabalho experimental.

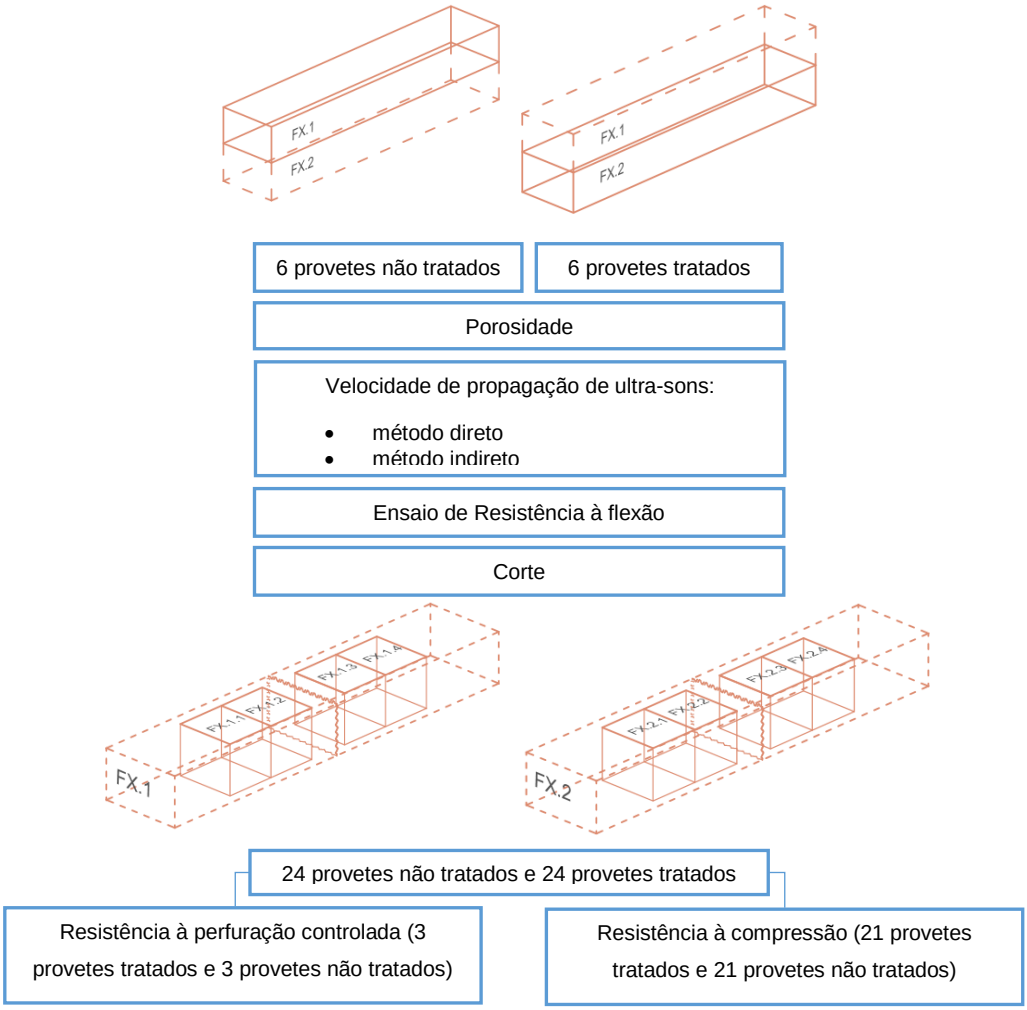


Figura 3.9- Esquema do plano de trabalhos dos provetes correspondente à fase 3 do trabalho experimental- Avaliação da eficácia inicial do tratamento consolidante.

3.4 Métodos de ensaio

Os ensaios realizados analisaram características físicas e mecânicas dos tijolos cerâmicos e dos provetes tratados e não tratados. Os ensaios realizados para a caracterização dos tijolos cerâmicos incluem:

- Ensaio de porosidade: determinação da porosidade, da massa volúmica real e aparente e do teor em água máximo (RILEM TC 25-PEM, 1980);
- Ensaio de imersão em água durante 48 horas: determinação do teor em água após imersão durante 48 horas e do coeficiente de saturação;
- Ensaio de absorção de água por capilaridade: determinação do coeficiente de capilaridade e do valor assimptótico (RILEM TC 25-PEM, 1980);
- Ensaio de propagação de ultra-sons: determinação da velocidade de propagação de ultra-sons, através do método direto (Ferreira Pinto e Gomes, 2009);

- Ensaio de resistência à flexão: determinação da resistência à flexão (Ferreira Pinto e Gomes, 2009);
- Ensaio de resistência à compressão: determinação da resistência à compressão (Ferreira Pinto e Gomes, 2009);
- Ensaio de resistência à perfuração controlada.

A caracterização física e mecânica dos provetes tratados e não tratados, para avaliação da eficácia do tratamento consolidante, inclui a realização de ensaios já realizados para a caracterização do material cerâmico, tais como: ensaio de porosidade, ensaio de propagação de ultra-sons (através do método direto) e ensaio de resistência mecânica à flexão, compressão e perfuração controlada. Para além destes ensaios foi realizado o ensaio de propagação de ultra-sons, recorrendo ao método indireto avaliado em perfis na direção T1 (Ferreira Pinto e Gomes, 2009).

Nos ensaios de porosidade, absorção de água por capilaridade, imersão em água durante 48 horas e de propagação de ultra-sons os tijolos e os provetes foram ensaiados secos. Como tal, antes de ser iniciado o ensaio, os tijolos ou os provetes foram colocados na estufa a 60± 5ºC, até atingirem o seu valor de massa seca, m_{seca}. Foi considerado que se atingiu este valor quando a variação diária da massa foi inferior ou igual a 0,1% da massa total. Concluiu-se que ao fim de 72 horas na estufa, se atingiu a massa seca. Por isso, o procedimento de secagem dos tijolos e dos provetes, ao longo do estudo, inclui a colocação na estufa durante 3 dias, e no exsicador com sílica gel durante 24 horas, para evitar o ganho de humidade no seu interior.

3.4.1 Caracterização física

1- Ensaio de porosidade acessível à água:

Depois da secagem os tijolos ou provetes foram colocados num exsicador ligado a uma bomba de vácuo, onde o ar contido no interior dos seus poros foi sucessivamente retirado. Este procedimento foi prolongado por 24 horas, a uma pressão constante de 2,667 Pa (20 mm Hg). Passado as 24 horas, abriu-se a torneira e foi introduzida água no interior do exsicador, mantendo o vácuo já existente. A água foi adicionada gradualmente e lentamente para que ao fim de 15 minutos, neste processo, não tivesse sido ultrapassada a altura de imersão dos tijolos ou provetes. De seguida, estes foram deixados, ainda em vácuo, imersos em água durante as 24 horas seguintes. Por fim, desligando a bomba e retirando a tampa do exsicador, os tijolos ou provetes imersos foram expostos à pressão atmosférica durante 24 horas. As fases do ensaio de porosidade estão apresentadas na Figura 3.10.

a) *b)* *c)*

Figura 3.10- Fases do ensaio de porosidade: a) tijolos dispostos no exsicador com vácuo; b) introdução de água e manutenção do vácuo; c) imersão em água à pressão atmosférica.

Depois deste processo, foi obtida a massa do tijolo ou provete imerso (m_{imersa}), decorrente de uma pesagem hidrostática, e a massa do tijolo ou provete saturado ($m_{saturada}$), decorrente da sua pesagem depois de retirado o excesso de água das suas faces com um pano. As pesagens estão apresentadas na Figura 3.11.

a) *b)*

Figura 3.11- a) pesagem hidrostática; b) pesagem.

Depois da obtenção destes parâmetros foi possível o cálculo de valores de porosidade, massa volúmica real e aparente e teor em água máximo. O valor de porosidade quantifica o espaço poroso dos tijolos e é uma propriedade que influencia valores de resistência mecânica e a durabilidade do tijolo. O valor de massa volúmica real influencia o comportamento mecânico do tijolo e a sua durabilidade, sendo diretamente proporcionais. O valor de teor máximo em água indica a capacidade para os tijolos armazenarem água e influencia a sua deterioração, porque reduzem a sua resistência mecânica (Fernandes *et al*., 2010).

Para o cálculo do valor de porosidade (P), utilizou-se a seguinte expressão:

$$P = \frac{m_{saturada} - m_{seca}}{m_{saturada} - m_{imersa}} \times 100\ [\%] \qquad [3\text{-}5]$$

onde:

P- Porosidade [%];

$m_{saturada}$- massa resultante da pesagem de cada tijolo ou provete saturado [g];

m_{seca}- massa seca de cada tijolo ou provete [g];

m_{imersa}- massa resultante da pesagem hidrostática [g].

Para o cálculo do teor máximo em água ($W_{máx}$), utilizou-se a seguinte expressão:

$$W_{máx} = \frac{m_{saturada} - m_{seca}}{m_{seca}} \times 100\ [\%] \qquad [3\text{-}6]$$

onde:

$W_{máx}$- teor em água máximo [%];

$m_{saturada}$- massa resultante da pesagem de cada tijolo ou provete saturado [g];

m_{seca}- massa seca de cada tijolo ou provete [g].

Para o cálculo das massas volúmicas real e aparente ($M_{vol.real}$ e $M_{vol.aparente}$), foram usadas as seguintes expressões [3-7] e [3-8], respetivamente:

$$M_{vol.real} = \frac{m_{seca}}{m_{seca} - m_{imersa}} \times 10^3\ [kg/m^3] \qquad [3\text{-}7]$$

$$M_{vol.aparente} = \frac{m_{seca}}{m_{saturada} - m_{imersa}} \times 10^3\ [kg/m^3] \qquad [3\text{-}8]$$

onde:

$M_{Vol.real}$- massa volúmica real [kg/m^3];

m_{seca}- massa seca de cada tijolo ou provete [g];

m_{imersa}- massa resultante da pesagem hidrostática [g];

$M_{Vol.aparente}$- massa volúmica real [kg/m^3];

$m_{saturada}$- massa resultante da pesagem de cada tijolo ou provete saturado [g].

2- Teor em água após as 48 horas de imersão em água:

Este ensaio consistiu na determinação do teor em água dos tijolos imersos durante 48 horas em água à pressão atmosférica.

Depois da secagem os tijolos foram colocados, à pressão atmosférica, num recipiente cheio de água, ficando imersos durante 48 horas. Os tijolos foram colocados no interior do recipiente com uma ligeira inclinação para evitar o aprisionamento de bolhas de ar no seu interior, tal como pode ser observado na Figura 3.12**.**

Ao fim de um período de 48 horas, foram realizadas medições de massa dos tijolos saturados por 48h (m_{sat48h}), decorrente da pesagem dos tijolos depois de retirado o excesso de água das suas faces.

a) *b)*

Figura 3.12- a) posicionamento dos tijolos no recipiente para imersão durante 48 horas em água; b) pesagem para obtenção da m_{sat48h}.

Para o cálculo do teor em água, ao fim de 48 horas de imersão em água, foi utilizada a seguinte expressão:

$$W_{48h} = \frac{m_{sat48h} - m_{seca}}{m_{seca}} \times 100\ [\%] \qquad [3\text{-}9]$$

onde:

W_{48h}- teor em água após imersão em água durante 48 horas [%];

m_{sat48h}- massa resultante da pesagem de cada tijolo saturado após imersão durante 48 horas em água [g];

m_{seca}- massa seca de cada tijolo [g].

Após calcular o teor em água após imersão de 48 horas foi possível calcular o coeficiente de saturação, recorrendo à seguinte expressão:

$$CS = \frac{W_{48h}}{W_{máx}} \times 100\ [\%] \qquad [3\text{-}10]$$

onde:

CS- coeficiente de saturação [%];

W_{48h}- teor em água após imersão em água durante 48 horas [%];

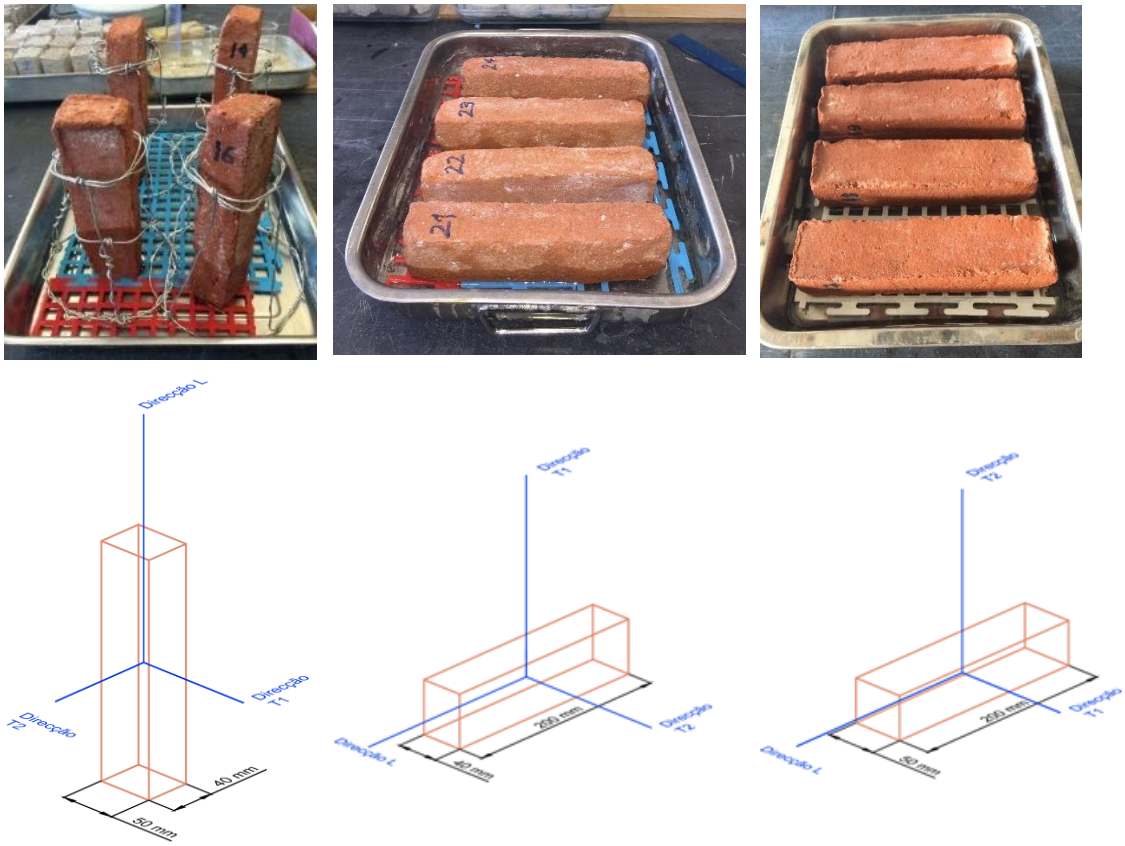
$W_{máx}$- teor em água máximo [%].

A quantificação do coeficiente de saturação permitiu obter informação da facilidade de saturação dos tijolos, por imersão durante 48 horas em água.

3- Absorção de água por capilaridade:

A absorção de água por capilaridade permitiu saber qual a facilidade que um tijolo apresenta em saturar por subida de água por absorção capilar e qual a ligação entre os espaços porosos do

mesmo. No trabalho experimental realizado, a absorção de água por capilaridade foi estudada em 3 direções, apresentadas na Figura 3.13.



a) *b)* *c)*

Figura 3.13- Direções estudadas no ensaio de absorção de água por capilaridade: a) direção L; b) direção T1; c) direção T2.

Após o processo de secagem dos tijolos, iniciou-se a preparação dos tabuleiros onde estes foram dispostos. Foi inserida água até uma altura de cerca de 2mm ± 1mm. Este nível foi sempre reposto ao longo do ensaio, para que os tijolos estivessem sempre com essa altura de imersão em água. Durante a disposição dos tijolos em cada tabuleiro, houve o cuidado de disposição de uma malha de borracha interposta entre os dois, para que não houvesse contacto direto entre os dois materiais. Foi sobre esta malha de borracha que foi medida a altura de água. Depois da colocação dos tijolos nos tabuleiros, foi posta sobre a montagem uma caixa de plástico, evitando que a água evaporasse.

Para a avaliação da absorção por capilaridade foram pré-estabelecidos intervalos de tempo ao fim dos quais, depois de removido o excesso de água nas faces dos tijolos, foram medidas a massa (m_i) e a altura da franja capilar (h_i). Os intervalos de tempo, decorridos a partir do momento em que o ensaio é iniciado, foram: 1, 3, 5, 10, 15, 30 minutos e 1, 3 5, 7 (apenas para a capilaridade medida na direção L), 24, 48, 72 e 144 horas (apenas para a capilaridade medida na direção L). A medição para a capilaridade na direção T1 e T2 foi realizada até as 72 horas, porque a partir desse momento a massa manteve-se constante, ao contrário da capilaridade na direção L, na qual ainda teve que ser analisado mais um intervalo de tempo, após 144 horas.

Na Figura 3.14, são apresentadas as fases do ensaio de absorção de água por capilaridade descritas.

Por fim, foi traçada uma curva, com a evolução da absorção de água por unidade de área em função da raiz quadrada do tempo.

A absorção de água por unidade de área foi calculada através da seguinte expressão:

$$M_i = \frac{m_i - m_0}{S} = \frac{\Delta M}{S} \qquad [3\text{-}11]$$

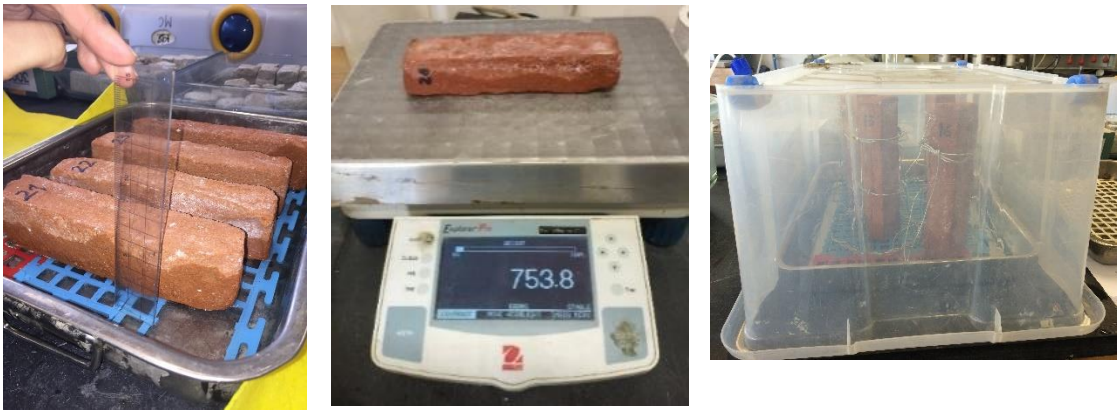
onde:

M_i- quantidade de água absorvida por absorção capilar ao fim do tempo i [kg/m^2];

m_i- massa do tijolo após decorrido o tempo i do ensaio de absorção capilar [kg];

m_0- massa seca do tijolo, no início do ensaio de absorção capilar [kg];

S- área da face de contacto com a água [m^2].



a) *b)* *c)*

Figura 3.14- Fases do ensaio de absorção de água por capilaridade: a) medição da franja liquida do tijolo; b) medição da massa; c) proteção colocada sobre os tijolos.

Através da curva anteriormente referida foi possível calcular o valor do coeficiente de capilaridade (C.C.). Para obter este valor, foi traçada uma reta que acompanhasse o desenvolvimento inicial do troço da curva e de seguida calculado o declive da mesma, sendo este o valor do coeficiente de capilaridade, com as unidades kg/(m^2.s^{0,5}). Quando a curva de absorção estabiliza, foi possível obter, através da leitura do valor no eixo das ordenadas, o valor assimptótico (V.A.), com as unidades kg/m^2.

3.4.2 Caracterização mecânica

1- Velocidade de propagação de ultra-sons:

No ensaio em questão, foi utilizado equipamento que quantifica o tempo necessário para que os ultra-sons percorram as distâncias entre transdutores. A velocidade de propagação dos ultra-sons foi avaliada através do método direto e do método indireto em tijolos ou provetes secos e saturados. A velocidade de ultra-sons obtida permitiu ter conhecimento da distribuição do espaço poroso no interior dos tijolos ou provetes.

O ensaio iniciou-se com a calibração do equipamento, que consistiu em assegurar que o tempo de propagação de ultra-sons na barra de calibração era 25µs. Começou-se por aplicar pasta de dentes nas extremidades da barra de calibração e encostou-se o emissor e o recetor nos topos da barra e, de seguida, o aparelho foi regulado até atingir os 25µs.

Depois foram efetuadas as medições, através do método direto, em três direções dos tijolos ou provetes. Para a realização do ensaio foi aplicada novamente pasta de dentes no local onde se encostou os transdutores (centrados na face de leitura) e registou-se o tempo de propagação, com 3 leituras realizadas em cada posição. A Figura 3.15 apresenta as medições realizadas nas 3 direções nos tijolos cerâmicos e a Figura 3.16 apresenta as medições realizadas em 2 direções nos provetes.

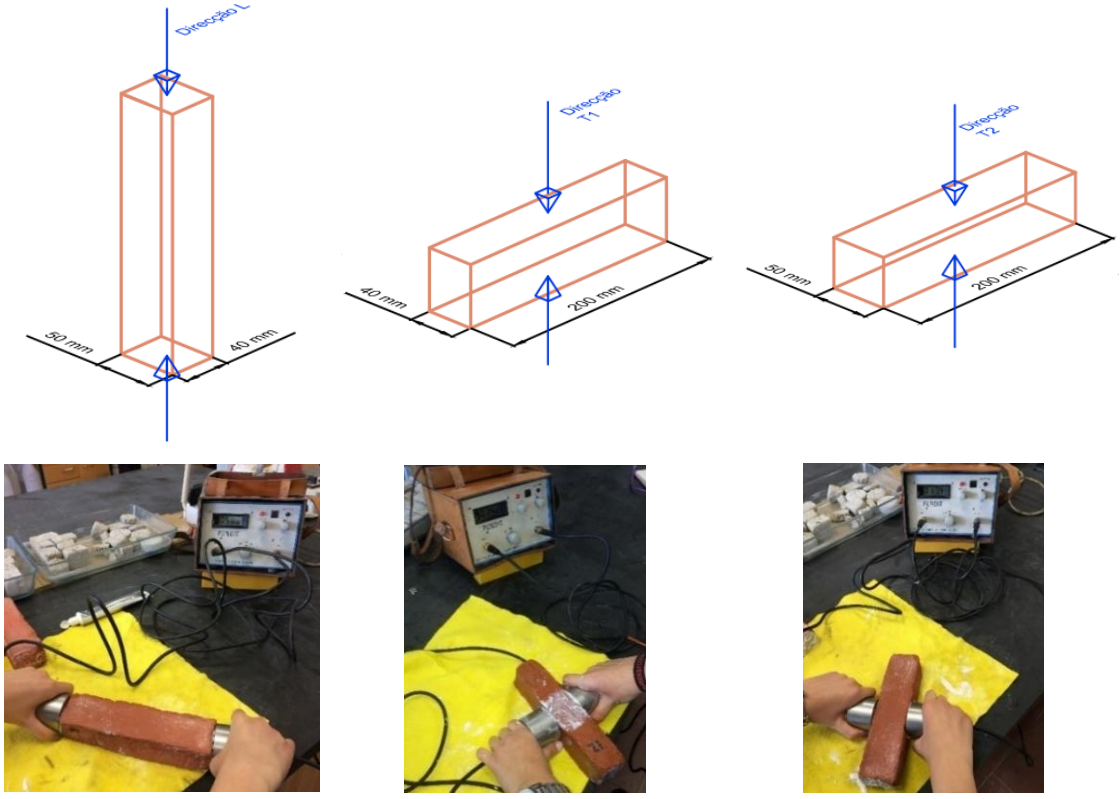
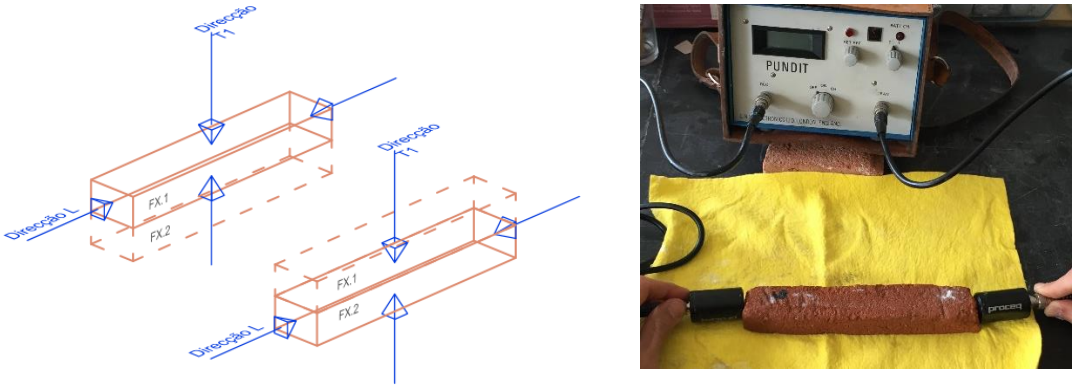


Figura 3.15- Três direções analisadas no ensaio de ultra-sons em tijolos, método direto.



a) b)

Figura 3.16- a) Representação esquemática das direções analisadas no ensaio de propagação de ultra-sons nos provetes, método direto; b) Leitura na direção L num provete.

Depois de ter sido registado o tempo de propagação dos ultra-sons, foi calculada a velocidade de propagação. Para o cálculo da velocidade de propagação (v_i) no método direto, foi aplicada a seguinte fórmula:

$$v_i = \frac{l_i}{t_i} \times 10^6 [m/s] \qquad [3\text{-}12]$$

onde:

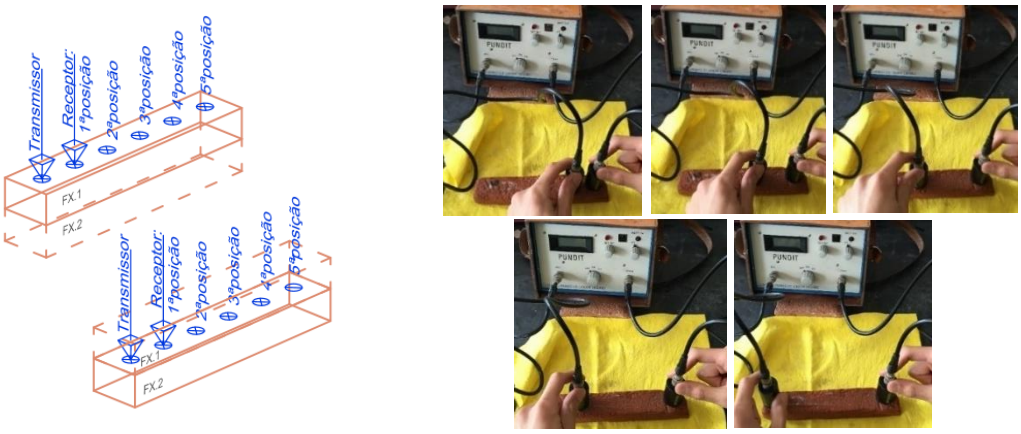
v_i- velocidade de propagação de ultra-sons [m/s];

l_i- distância percorrida [m];

t_i- tempo de percurso [s].

Para a análise da velocidade de propagação de ultra-sons recorrendo ao método indireto, o ensaio iniciou-se com a marcação dos pontos onde foram colocados o transdutor emissor e recetor. Estabeleceu-se que o transdutor emissor estaria fixo e o transdutor recetor iria variar a sua posição nas seguintes distâncias, relativamente ao emissor: 33 mm, 66 mm, 99 mm, 122 mm e 155 mm, apresentadas na Figura 3.17 a).

Por fim, foram efetuadas as medições com os transdutores colocados nos pontos já marcados e com a aplicação da pasta de dentes para uniformização da superfície de contato. Por cada posição analisada foram realizadas 3 medições. As etapas do ensaio estão apresentadas na Figura 3.17 b). A obtenção da velocidade de propagação dos ultra-sons foi feita através da determinação do declive da reta de tendência do gráfico de dispersão analisando nas ordenadas o tempo e nas abcissas a distância da propagação dos ultra-sons.



a) b)

Figura 3.17- Posição dos transdutores no ensaio de propagação de ultra-sons pelo método indireto: a) esquema de todas as posições analisada no provete; b) as 5 posições analisadas durante o ensaio de propagação de ultra-sons.

2- Ensaio de determinação da resistência mecânica à flexão e à compressão

O equipamento utilizado foi o modelo D-7940 Form+Test Seidner, apresentado na Figura 3.18 a).

No ensaio de resistência à flexão a distância entre apoios cilíndricos foi de 10 centímetros. Cada provete foi posicionado de modo a ficar centrado longitudinal e transversalmente. De seguida foi aplicada uma força gradualmente crescente até ser atingida a rotura do provete. O equipamento destinado a este ensaio está apresentado na Figura 3.18 b).

Para a realização do ensaio de resistência à compressão, cada provete foi centrado, longitudinal e transversalmente, e foram colocados dois cartões prensados nas faces de contacto entre o provete e o equipamento. Foi aplicada uma força gradualmente crescente até ser atingida a rotura do provete. O equipamento usado neste ensaio é apresentado na Figura 3.18 c).

a) b) c)

Figura 3.18- a) vista de frente do equipamento usado para ensaios de resistência à flexão e compressão; b) vista lateral do equipamento usado no ensaio de resistência à flexão; c) equipamento usado no ensaio de resistência à compressão.

O equipamento registou o valor da força de rotura.

Para o cálculo da tensão de rotura à flexão foi utilizada a seguinte expressão:

$$Tensão\ de\ rotura\ à\ flexão = \frac{3 \times F_R \times L}{2 \times b \times h^2}\ [MPa] \qquad [3\text{-}13]$$

onde:

F_R: força de rotura à flexão [N];

L: distância entre apoios inferiores [mm];

b: dimensão da base do provete [mm];

h: altura do provete [mm].

Para o cálculo da tensão de rotura à compressão a expressão utilizada foi a seguinte:

$$Tensão\ de\ rotura\ à\ compressão = \frac{F_R}{a \times b}\ [MPa] \qquad [3\text{-}14]$$

onde:

F_R: Força de rotura à compressão [N];

$a \times b$: área de aplicação da força de compressão [mm^2].

3- Ensaio de perfuração controlada (DRMS)

A realização do ensaio de resistência à perfuração controlada utilizou o equipamento portátil DRMS (Drilling Resistance Measurement System), desenvolvido pela SINT Tecnology. O equipamento incluiu dois motores de precisão, que controlaram a velocidade de rotação da broca e o avanço da amostra ensaiada e dois pratos de aço onde foi colocada e fixa a amostra. Antes da realização da furação foi necessário estabelecer dois parâmetros condicionantes: a velocidade de rotação e a taxa de penetração da broca. A velocidade de rotação pode ser estabelecida entre 0 e 1200 rpm e a taxa de penetração entre 0 e 20 mm/min.

Foram utilizadas duas brocas Granite Joran da IRWIN: de 3 mm de diâmetro para a realização de furos guia e de 5 mm de diâmetro para a obtenção dos perfis de perfuração, ambas em cromo, vanádio e alto teor em carbono, apresentadas na Figura 3.19.

Figura 3.19- Brocas utilizadas na furação, com 3mm e 5mm de diâmetro.

O ensaio iniciou-se com a realização de todos os furos guia necessários. Para isso foi utilizada a broca de 3 mm com uma velocidade de rotação entre 400 e 300 rpm e taxa de penetração entre 8mm/min e 6 mm/min. No entanto, não foi possível a realização dos furos guia, com o equipamento DMRS, porque a força de perfuração do material cerâmico excedeu o limite de força suportável pelo equipamento DRMS, por isso os furos guia foram feitos com a perfuradora PIRRA. Depois da perfuração dos furos guia, foram realizados os furos com a broca de 5mm, centrando a broca com o furo guia. Foi estabelecido que a velocidade de rotação seria 400 rpm e a taxa de penetração 10mm/min. Os comprimentos de furação obtidos estão entre 20 e 26 mm. O equipamento utilizado é apresentado na Figura 3.20.

O estabelecimento de uma taxa de penetração e velocidade de rotação inferiores ao máximo permitido pelo equipamento, deve-se ao facto de o material cerâmico apresentar uma rigidez considerável e ter na sua matriz grãos de areia ou quartzo, que dificultam o processo de furação.

a) *b)*

Figura 3.20- Equipamento utilizado para a realização de furos: a) DRMS da SINT Tecnology e b) Perfuradora PIRRA.

4. Caracterização do material cerâmico

4.1 Caracterização da amostra de material cerâmico disponível

A caracterização da amostra de 56 tijolos cerâmicos é apresentada neste subcapítulo, onde são descritos os resultados obtidos nos ensaios realizados sobre este conjunto de tijolos recolhidos. A análise apresentada pretende demonstrar uma caracterização física e mecânica representativa da amostra total de material cerâmico.

A Tabela 4.1 apresenta o valor médio e desvio padrão da massa volúmica (real e aparente), porosidade e teor em água máximo da amostra constituída por 53 tijolos. Os valores individuais relativos a cada tijolo da amostra estudada estão disponíveis no Anexo I.

Tabela 4.1- Massa Volúmica, porosidade, teor em água e coeficiente de saturação da amostra de tijolos.

n	Massa volúmica (kg/m^3)		Porosidade P (%)	Teor em água máximo (%)
	Real	Aparente		
53	2590 (± 26)	2090 (± 28)	19,1 (± 1,8)	9,1 (± 1,0)

A porosidade apresenta valores elevados, assim como o teor em água máximo, uma vez que são propriedades diretamente relacionáveis. Os valores de porosidade e de teor em água máximo encontram-se dentro dos intervalos de valores apresentados por Fernandes *et al.* (2010), no seu estudo relativo à caracterização de tijolos antigos usados na construção de monumentos portugueses. Nos quais foi demonstrado valores de porosidade entre 12% e 43% e valores de teor em água máximo entre 6% e 32%. Os valores de massa volúmica aparente obtidos são superiores aos apresentados no estudo de Fernandes e Lourenço (2007), onde os resultados se situavam entre 1600 kg/m^3 e 1800 kg/m^3.

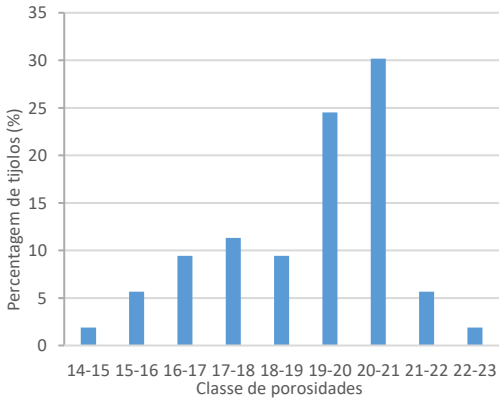


Figura 4.1- Distribuição dos valores de porosidade, avaliada em tijolos.

A Figura 4.1 apresenta os valores de porosidade obtidos para toda a amostra ensaiada, onde se pode confirmar que a gama de porosidade com maior número de tijolos é dos 20% aos 21%,

seguida pela gama dos 19% aos 20%. Verifica-se que a amostra de tijolos cerâmicos analisada apresenta uma gama de valores de porosidade muito alargada, demonstrando a heterogeneidade da amostra.

Os valores de teor em água após 48 horas de imersão e de coeficiente de saturação, bem como, porosidade e teor em água máximo, são apresentados na Tabela 4.2

Tabela 4.2- Porosidade, teor em água máximo e após 48 horas de imersão em água e coeficiente de saturação.

n	Porosidade (%)	Teor em água (%)		Coeficiente de Saturação CS (%)
		Máximo	48 h	
8	19,6 (± 1,0)	9,4 (± 0,5)	7,5 (± 0,6)	80 (± 2)

Os valores do coeficiente de saturação obtidos são elevados o que indicia que os tijolos revelam facilidade em saturar por imersão em água durante 48 horas, devido à presença de uma rede porosa constituída por poros interligados entre si.

A Figura 4.2 apresenta as curvas de absorção de água por capilaridade de uma amostra de 12 tijolos.

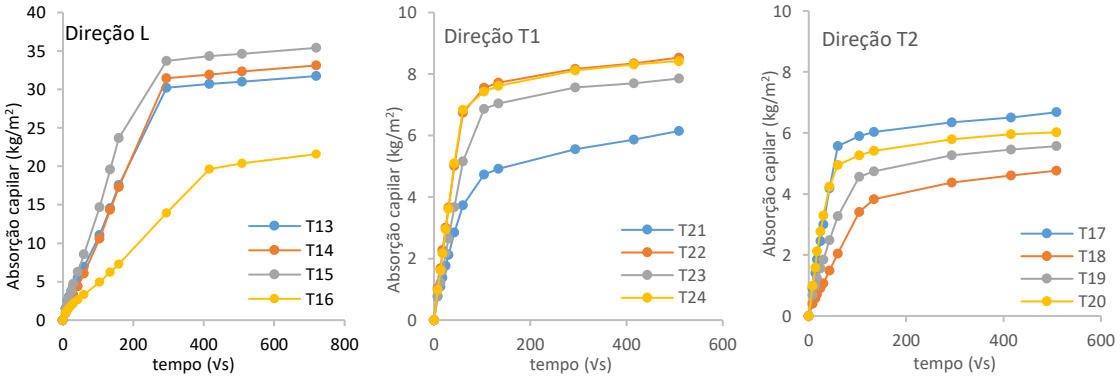


Figura 4.2- Curvas de absorção de água por capilaridade, nas três direções estudadas.

Os valores de coeficientes de capilaridade, valores assimptóticos e porosidade são apresentados na Tabela 4.3**.** As medições de massa e franja líquida realizadas estão disponíveis no Anexo I.

De acordo com os valores apresentados na Tabela 4.3 e na Figura 4.2, é possível afirmar que os valores obtidos de coeficiente de capilaridade e valor assimptótico apresentam elevada variabilidade.

Tabela 4.3- Valores do coeficiente de capilaridade e assimptóticos.

Direção	Tijolo	Porosidade (%)	C.C. (kg/(m^2.s^{0,5}))	V.A. (kg/m^2)
L	T13	20,4	0,100	31,7
	T14	20,6	0,107	33,1
	T15	22,1	0,145	35,4
	T16	15,6	0,044	21,6
T2	T17	20,5	0,093	6,7
	T18	16,8	0,032	4,8
	T19	18,3	0,053	5,6
	T20	20,4	0,109	6,0
T1	T21	17,1	0,061	6,1
	T22	21,2	0,112	8,5
	T23	19,9	0,085	7,9
	T24	21,1	0,115	8,4

C.C.- Coeficiente de capilaridade; V.A.- Valor assimptótico. L- área de contacto com a água 19,6 cm^2; T2- área de contacto com a água 97,0 cm^2; T1- área de contacto com a água 79,2 cm^2.

Os valores assimptóticos obtidos apresentam uma variação influenciada pela direção em que está a ser estudada a capilaridade. Ou seja, a direção L que tem maior altura de absorção, apresenta valores assimptóticos superiores, seguida pela T1 e, por fim a T2. Como tal, a curva de absorção, para cada direção estabiliza em momentos diferentes. Na Figura 4.2, pode observar-se que depois de decorrido um certo tempo no ensaio as curvas atingem um patamar de estagnação, porque os tijolos tendem a atingir a saturação por capilaridade, o que demonstra a existência uma rede porosa aberta (Fernandes *et al.*, 2003).

Os valores de coeficiente de capilaridade apresentam uma variação influenciada pelo valor de porosidade do tijolo analisado. Como tal, os valores de coeficiente de capilaridade representam, tal como a porosidade, a heterogeneidade da amostra. Relacionando os valores de coeficiente de capilaridade com a porosidade, verifica-se que, os tijolos com valores de porosidade entre 20% e 22% apresentam valores de coeficiente de capilaridade entre 0,1 kg/(m^2.s^{0,5}) e 0,15 kg/(m^2.s^{0,5}), e os tijolos com porosidade entre 15% e 17% apresentam valores de coeficiente de capilaridade entre 0,03 kg/(m^2.s^{0,5}) e 0,06 kg/(m^2.s^{0,5}). Deste modo, verifica-se uma tendência para que tijolos com valores de porosidade mais elevados tenham também valores de coeficiente de capilaridade mais elevados. A influência da porosidade no ensaio de absorção de água por capilaridade, pode ser verificada analisando as curvas de absorção de água. Na Figura 4.2, os tijolos T16, T21 e T18 (analisados nas direções L, T1 e T2, respetivamente) apresentam curvas de absorção de água inferiores às dos restantes tijolos analisados nas mesmas direções e, decorrente da análise da Tabela 4.3, verifica-se que os valores de porosidade destes tijolos são os três menores da amostra analisada. Adicionalmente, os tijolos T15 e T17 que apresentam curvas superiores demonstram valores de porosidade maiores e os tijolos T22 e T24, cujas curvas de absorção são praticamente coincidentes, revelam valores de porosidade muito semelhantes.

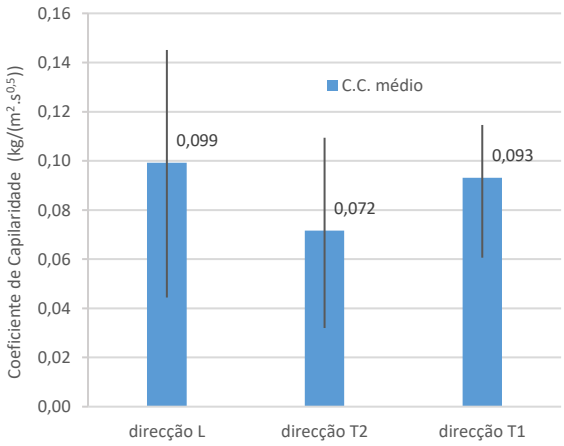


Figura 4.3- Coeficiente de capilaridade para cada direção.

A Figura 4.3 apresenta, sob outro formato, os valores obtidos para coeficiente de capilaridade e o respetivo desvio máximo e mínimo obtido, onde podemos comprovar a existência de um comportamento anisotrópico pouco pronunciado, uma vez que de acordo com a direção estudada o valor de coeficiente de capilaridade não varia substancialmente.

Na Figura 4.4 é possível verificar que as curvas de absorção evoluem ao longo do tempo com maior ou menor inclinação, porque o espaço poroso dos tijolos é bastante heterogéneo, o que provoca uma variação das taxas de absorção de água por capilaridade. Como exemplo pode tomar-se o tijolo T15, na capilaridade avaliada segundo L. Este fenómeno ocorre, porque a água, durante a subida por capilaridade, vai sucessivamente preenchendo o espaço poroso dos tijolos, que é muito heterogéneo e não se encontra interligado sempre da mesma forma, como tal podem existir zonas porosas em que é mais fácil o seu preenchimento por água do que outras, por isso, dentro do mesmo tijolo, a taxa de absorção de água varia.

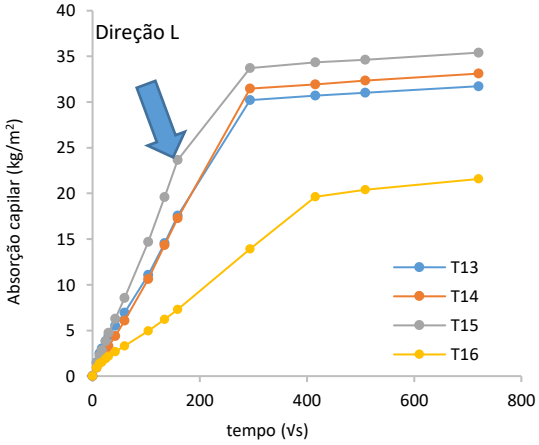


Figura 4.4- Curvas de absorção de água na direção L, com ponto de mudança de taxa de absorção assinalado.

Ao longo da realização deste ensaio observou-se que a sucessiva subida da franja líquida não foi uniforme ao longo das faces dos tijolos, tal como é possível verificar na Figura 4.5 a), o que levou inclusivamente a que faces dos tijolos pudessem estar simultaneamente molhadas e secas, de acordo com o observado na Figura 4.5 b). Estes fenómenos podem ser justificados

pela existência de uma rede porosa muito heterogénea, que provoca a variação da taxa de absorção de água dos tijolos.

a) b)

Figura 4.5- a) Medição da franja líquida, no ensaio de absorção de água por capilaridade na direção T1; b) Observação de zonas secas e molhadas na mesma face dos tijolos, no ensaio de absorção de água por capilaridade.

A Figura 4.6 analisa a absorção capilar com a franja líquida da mesma amostra de tijolos.

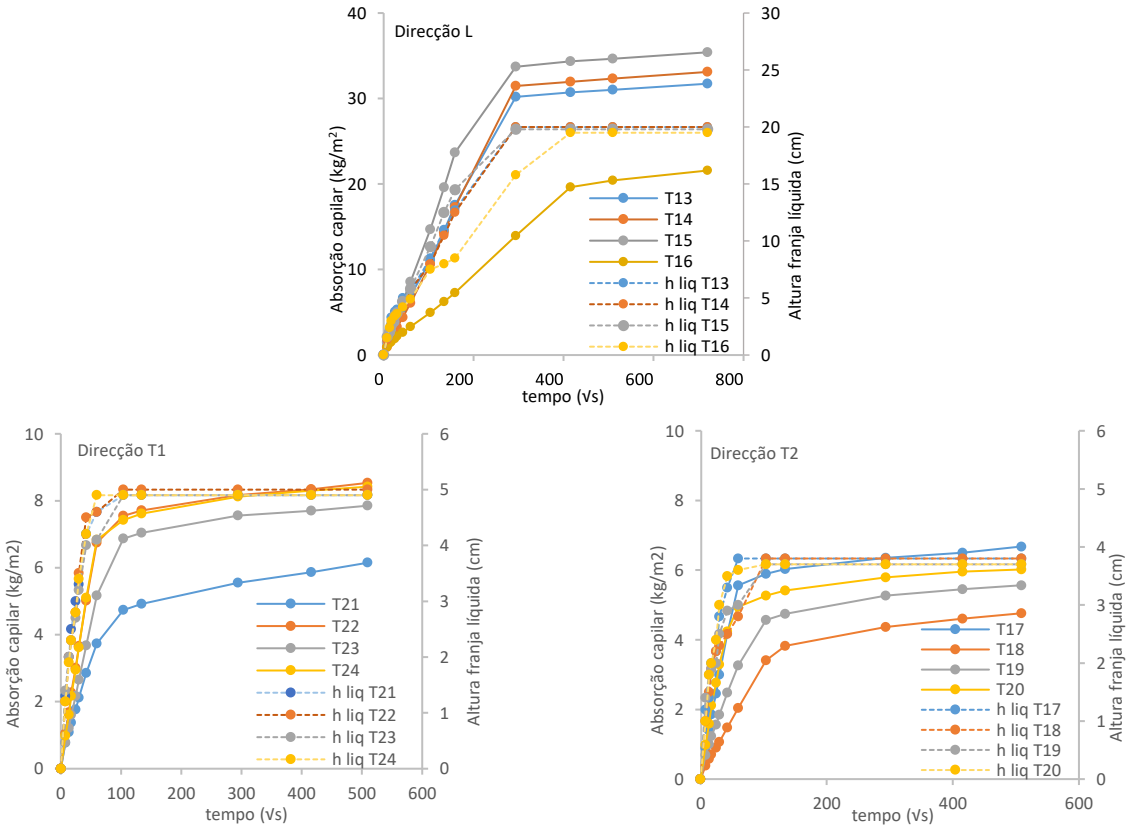


Figura 4.6- Curvas de absorção capilar e franjas líquidas, para ensaio de absorção por capilaridade.

Na Figura 4.7 estão apresentados os valores de velocidade de propagação obtidos, onde se relaciona as velocidades dos tijolos secos e saturados.

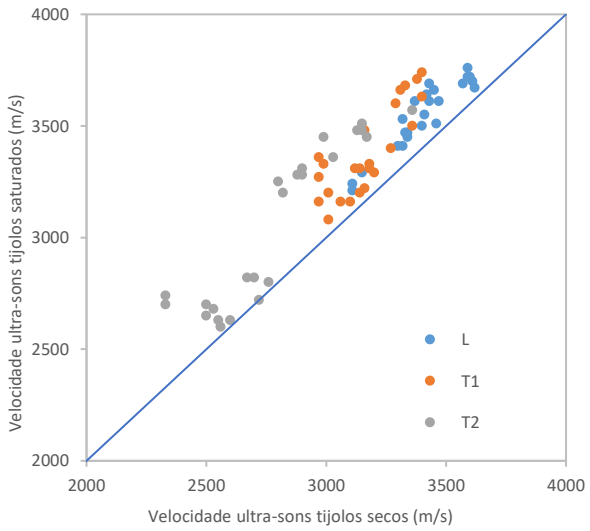


Figura 4.7- Relação entre velocidade de propagação de ultra-sons para tijolos secos e saturados- método direto.

Na Figura 4.7 estão representadas as velocidades obtidas na direção L, na direção T1 e na direção T2, verifica-se que as manchas de valores se sobrepõem, mas que os valores de velocidades mais elevados correspondem à direção L e os valores de velocidades menores correspondem à direção T2, sendo que à direção T1 correspondem valores intermédios. Pode concluir-se que os valores de velocidade obtidos variam de acordo com a direção estudada no ensaio de propagação de ultra-sons, demonstrando, novamente, a anisotropia dos tijolos.

É possível verificar que a mancha de resultados obtida não coincide com a reta de declive unitário, o que significa que a valores de velocidade para tijolos secos correspondem valores diferentes de velocidades para tijolos saturados, neste caso mais elevados, porque os pontos obtidos situam-se acima da respetiva reta, comprovando que o espaço poroso existente na amostra é constituído por uma rede porosa aberta, parcialmente constituída por fissuras. Uma vez que, a velocidade de propagação de ultra-sons difere de acordo com o material onde foi feito o ensaio, a velocidade adquire valores maiores para meios sólidos contínuos, relativamente a meios gasosos (Ferreira Pinto e Gomes, 2009). Deste modo, quando o espaço poroso dos tijolos se encontra preenchido por água, os ultra-sons propagam-se com maior facilidade e rapidez, porque se trata de um meio líquido.

Os valores das velocidades registadas para cada tijolo, analisadas nas 3 direções, estão apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4- Velocidade de propagação nos tijolos- método direto.

Tijolo	Velocidade (m/s)					
	Direção L		Direção T1		Direção T2	
	Seco	Saturado	Seco	Saturado	Seco	Saturado
T9	3460	3510	2990	3330	2720	2720
	3430	3610	2970	3360	2600	2630
	3400	3500	2970	3270	2550	2630
T10	3150	3290	3010	3200	2530	2680
	3110	3240	2970	3160	2500	2700
	3110	3210	3010	3080	2560	2600
T11	3600	3720	3400	3740	3170	3450
	3610	3700	3380	3710	3130	3480
	3570	3690	3330	3680	3150	3510
T12	3340	3450	3180	3330	2700	2820
	3320	3410	3140	3310	2760	2800
	3300	3410	3120	3310	2670	2820
T16	3430	3690	3160	3220	2500	2650
	3420	3640	3100	3160	2330	2700
	3410	3550	3060	3160	2330	2740
T27	3320	3530	3160	3480	3030	3360
	3330	3470	3180	3310	2900	3280
	3340	3470	3140	3200	2820	3200
T28	3470	3610	3360	3500	3360	3570
	3370	3610	3270	3400	3150	3480
	3450	3660	3200	3290	2990	3450
T29	3590	3760	3400	3630	2880	3280
	3590	3720	3310	3660	2800	3250
	3620	3670	3290	3600	2900	3310

A velocidade de propagação dos ultra-sons nos tijolos secos, na direção L apresenta valores entre 3100 m/s e 3600 m/s, na direção T1 apresenta valores entre 3000 m/s e 3400 m/s, e, por fim, na direção T2 apresenta valores entre 2500 m/s e 3200 m/s. A análise referente aos tijolos saturados, apresenta na direção L valores entre 3200 m/s e 3800 m/s, na direção T1 valores entre 3200 m/s e 3700 m/s e na direção T2 valores entre 2600 m/s e 3600 m/s.

A variação de valores de velocidade entre as direções L e T1, para tijolos secos situa-se entre 100 m/s e 200 m/s e entre as direções T1 e T2 situa-se entre 200 m/s e 500 m/s. Quando os tijolos estão saturados a diferença de valores de velocidade entre as direções L e T1 situa-se entre 0 m/s e 100 m/s e entre as direções T1 e T2 situa-se entre 100 m/s e 600 m/s. A variação de valores das velocidades entre tijolos secos e saturados, na direção L situam-se entre aproximadamente 100 m/s e 200 m/s, na direção T1 entre 200 m/s e 300 m/s e na direção T2 estão entre 100 m/s e 400 m/s.

Verificou-se a existência de intervalos de variação de velocidades com relativa variabilidade, devido à heterogeneidade da amostra analisada, causada pelo processo de produção rudimentar do material cerâmico. A heterogeneidade da amostra demonstra que os tijolos apresentam diferentes variações de velocidade entre as direções em estudo, assim como, diferentes variações entre velocidades de tijolos secos e saturados. A variabilidade das velocidades registadas entre diferentes direções ocorre, porque o processo de produção envolve a colocação da matéria-prima numa forma onde esta é conformada e prensada segundo uma direção, pelo que o espaço poroso do material não é uniformemente distribuído. A variabilidade entre velocidades de tijolos secos e saturados é influenciada pela capacidade de absorção de maior ou menor quantidade de água, apresentada pelos tijolos. Como tal, a porosidade dos tijolos é um indicador a ter em conta na comparação de velocidades entre tijolos secos e saturados.

Na Figura 4.8, é apresentada a relação entre a porosidade de cada tijolo ensaiado e os valores de velocidade de ultra-sons, secos e saturados.

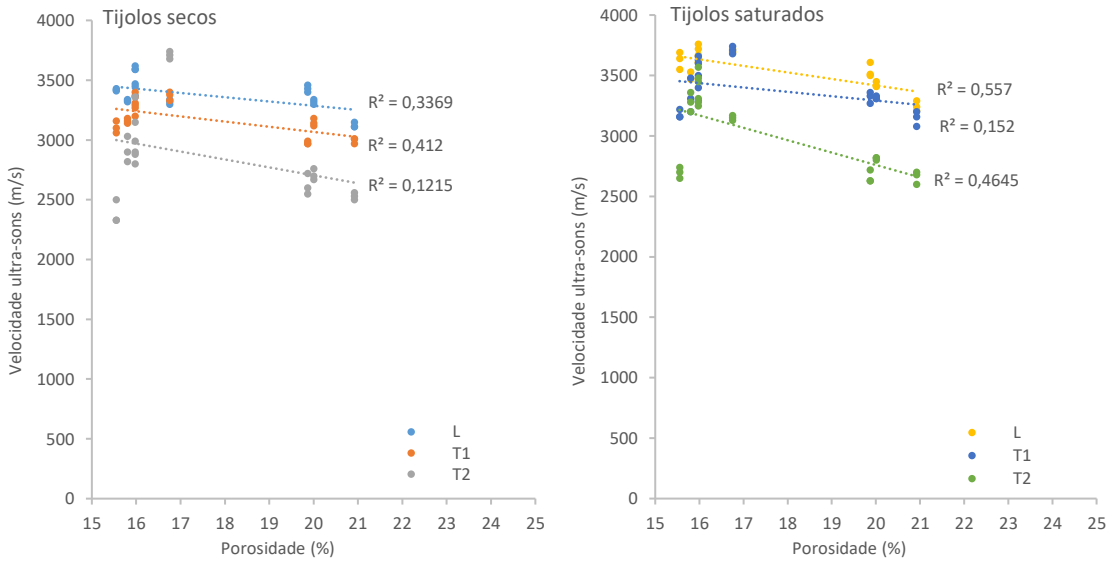


Figura 4.8- Relação entre porosidade e velocidade de ultra-sons, para tijolos secos e saturados e respetivas retas de tendência- método direto.

Verifica-se a existência de uma distinção de valores de porosidade, ou seja, a amostra analisada apresenta 4 tijolos com valores de porosidade entre 15% e 17% e 3 tijolos com valores de porosidade entre 20 % e 21 %. Tanto na análise de tijolos secos, como na análise de tijolos saturados, os valores de velocidade registados para os tijolos com a porosidade menor são superiores, pois esta amostra apresenta menor volume de vazios percorrido pelos ultra-sons, causando o aumento de velocidade, tendo-se verificado esta disposição para a diminuição do valor de velocidade com o aumento da porosidade através das retas de tendência traçadas.

Na Tabela 4.5 são apresentados valores de resistência à flexão e à compressão obtidos para cada provete.

Tabela 4.5- Resistência à flexão e à compressão dos provetes.

Provete 2,5x4x20 (cm)	Resistência flexão (MPa)
F1.1	0,9
F1.2	0,9
Provete 2x2,5x20 (cm)	Resistência flexão (MPa)
F2.1	0,9
F2.2	0,9
F2.3	0,5
F2.4	0,8
n 3,5x4x5 (cm)	Resistência compressão (MPa)
5	24 (± 6)
Provete 2,3x2,4x4 (cm)	Resistência compressão (MPa)
F1.2.1	21
F1.2.2	15
F1.2.3	17
Provete retificado 2,3x2,4x3 (cm)	Resistência compressão (MPa)
F1.2.4	21
F1.2.5	20
F1.2.6	21

Os valores de resistência à flexão dos provetes F1.1 e F1.2 não apresentam variabilidade, no entanto, os valores dos provetes F2.1, F2.2, F2.3 e F2.4 já apresentam esta característica. Os provetes demonstraram variabilidade de valores de resistência à flexão, porque a rotura ocorreu pelas irregularidades de cada provete, influenciada pela configuração por este tipo de corte.

Deste modo, o corte adotado para a obtenção de provetes sujeitos a ensaios de resistência mecânica à flexão, realizados na continuação do estudo experimental, foi a conversão de um tijolo em dois provetes com, aproximadamente, 2,5x4x20 (cm) cada um.

Os valores de resistência mecânica à compressão registados, associados a um tipo de provete, apresentam ou não elevada variabilidade. Os provetes F1.2.4, F1.2.5 e F1.2.6, cujas faces foram retificadas, apresentam a menor variabilidade de valores, ao contrário dos restantes provetes que demonstram elevada variabilidade, devido à presença de irregularidades nas suas faces não retificadas, que levaram a que a rotura ocorresse antes de monopolizar a resistência do cerâmico.

Os valores de resistência mecânica à compressão obtidos estão dentro do intervalo de valores (6,7 Mpa a 21,8 MPa) estudado por Fernandes *et al.* (2010), na caraterização realizada em tijolos antigos usados na construção de monumentos portugueses.

A realização do estudo sobre a amostra total de tijolos permitiu o conhecimento mais profundo sobre o material, o que tornou possível a obtenção da informação necessária para a escolha da gama de porosidades dos tijolos que foram tratados. A gama escolhida é representada por tijolos com os valores de porosidade mais elevados, para que a heterogeneidade fosse reduzida, os tijolos a tratar fossem os mais degradados e os que apresentassem a maior capacidade de absorção do produto consolidante.

A observação dos tijolos permitiu saber qual era a face exposta quando estes ainda estavam inseridos na alvenaria. Esta informação juntamente com a determinação dos valores de coeficiente de capilaridade obtidos na absorção de água, por capilaridade, nessa mesma face que demonstraram a facilidade que os tijolos cerâmicos tinham em absorver água, apoiaram a decisão acerca da face de tratamento.

Os ensaios de resistência mecânica à compressão e à flexão realizados possibilitaram a escolha dos tipos de corte a realizar de modo a que seja evitada a variabilidade de resultados diretamente influenciada pelo corte adotado. A decisão da configuração destes provetes teve em conta também a face escolhida para a aplicação do tratamento, tal como já foi anteriormente afirmado na descrição de plano de trabalhos, porque na realização de ensaios mecânicos à compressão e flexão foi necessário que a face de tratamento fosse a face perpendicular à prensa e a face tracionada, respetivamente.

4.2 Caracterização do material cerâmico a ser tratado

A elevada heterogeneidade apresentada pela amostra de 53 tijolos levou à necessidade de estabelecer um intervalo de valores de porosidade que tornasse a amostra mais homogénea. O intervalo estabelecido considerou valores de porosidade acima dos 20 % e os respetivos tijolos pertencentes a este intervalo foram incluídos na amostra de tijolos cerâmicos a ser tratados. Como tal, realizou-se a caracterização seguinte sobre a amostra de tijolos com elevados valores de porosidade.

Na Figura 4.9 estão apresentadas as curvas de absorção de água por capilaridade de 7 tijolos com valores de porosidade compreendidos entre 20% e 22%. O registo dos valores de massa e franja líquida realizado ao longo do ensaio está disponível no Anexo I.

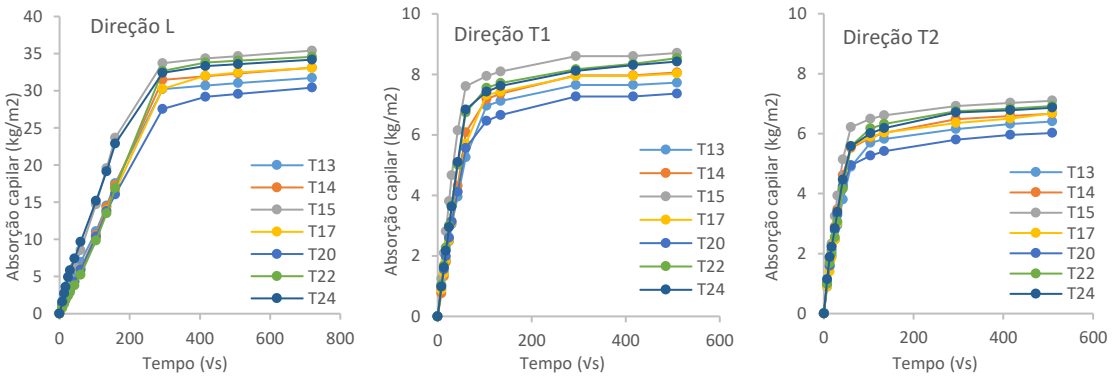


Figura 4.9- Curvas de absorção de água por capilaridade em função da raiz do tempo.

A Tabela 4.6**,** apresenta o valor médio de coeficiente de capilaridade e respetivo desvio padrão, para os 7 tijolos, de acordo com a direção estudada.

Tabela 4.6- Coeficiente de capilaridade, para 7 tijolos.

n	Direção	C.C. (kg/(m^2.s^{0,5}))
7	L	0,114 (± 0,018)
	T1	0,104 (± 0,014)
	T2	0,093 (± 0,013)

C.C.- Coeficiente de capilaridade.

L- área de contacto com a água 19,6 cm^2; T2- área de contacto com a água 97,0 cm^2; T1- área de contacto com a água 79,2 cm^2.

De acordo com a Tabela 4.6, o valor médio de coeficiente de capilaridade maior foi obtido na direção L e o menor na direção T2. No entanto, nas 3 direções obteve-se valores médios de coeficiente superiores aos obtidos anteriormente e muito próximos entre si, com uma diferença entre valores de cerca de 0,010 kg/(m^2.s^{0,5}), como tal, verifica-se novamente a existência de comportamento anisotrópico nos tijolos, mas não acentuado. Na Figura 4.10, é apresentado o valor médio de coeficiente de capilaridade e respetivo desvio máximo e mínimo, para a amostra de 7 tijolos, avaliados nas 3 direções.

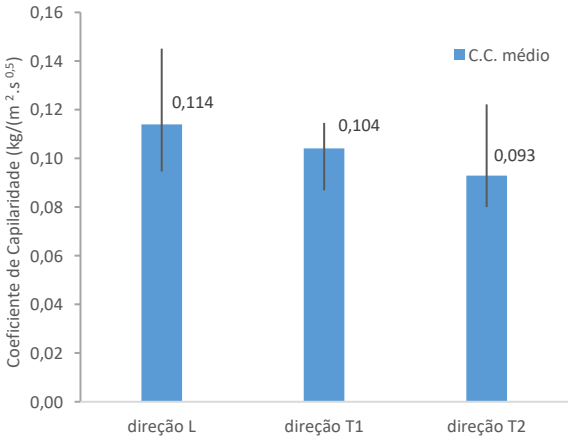


Figura 4.10- Coeficiente de capilaridade para as 3 direções estudadas.

Na Figura 4.11 estão apresentados os valores de velocidade de propagação obtidos, onde se relaciona as velocidades dos tijolos secos e saturados. O registo das velocidades está apresentado na Tabela 4.7 e no Anexo I, juntamente com a porosidade dos tijolos.

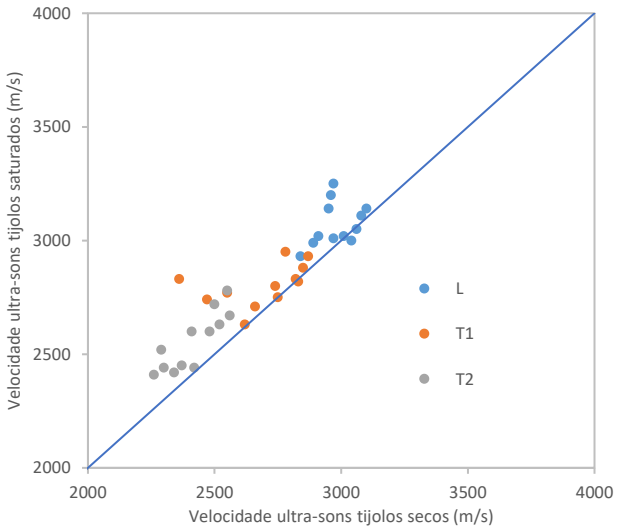


Figura 4.11- Relação entre velocidade de propagação de ultra-sons para tijolos secos e saturados- método direto.

Observa-se que estão representadas as velocidades obtidas na direção L, na direção T1 e na direção T2, verifica-se que as manchas de valores se sobrepõem, mas que novamente, de um modo geral, os valores de velocidades mais elevados correspondem à direção L e os valores de velocidades menores correspondem à direção T2, sendo que à direção T1 correspondem valores intermédios, comprovando novamente a anisotropia da amostra. Existe a tendência para que os tijolos saturados apresentem valores de velocidade de propagação de ultra-sons superiores. O aumento do valor de velocidade para os tijolos saturados ocorre, porque o espaço poroso dos tijolos encontra-se preenchido por água e os ultra-sons percorrem com maior rapidez meios líquidos do que meios gasosos.

Tabela 4.7- Velocidade de propagação de ultra-sons nos tijolos- método direto.

Tijolo	Velocidade (m/s)					
	Direção L		Direção T1		Direção T2	
	Seco	Saturado	Seco	Saturado	Seco	Saturado
T15	2910	3020	2750	2750	2420	2440
	2890	2990	2660	2710	2370	2450
	2840	2930	2620	2630	2340	2420
T22	3100	3140	2850	2880	2500	2720
	3080	3110	2820	2830	2560	2670
	3060	3050	2740	2800	2410	2600
T24	2970	3010	2780	2950	2290	2520
	3010	3020	2870	2930	2300	2440
	3040	3000	2830	2820	2260	2410
T52	2970	3250	2360	2830	2550	2780
	2960	3200	2550	2770	2520	2630
	2950	3140	2470	2740	2480	2600

Na Tabela 4.7, a velocidade de propagação dos ultra-sons nos tijolos secos, na direção L apresenta valores entre 2800 m/s e 3100 m/s, na direção T1 apresenta valores entre 2300 m/s e 2900 m/s, e, por fim, na direção T2 apresenta valores entre 2200 m/s e 2600 m/s. A análise referente aos tijolos saturados, apresenta na direção L valores entre 2900 m/s e 3300 m/s, na direção T1 valores entre 2700 m/s e 3000 m/s e na direção T2 valores entre 2400 m/s e 2800 m/s. É possível verificar que a mancha de resultados obtida se situa numa gama de valores inferior à anteriormente estudada na amostra de 53 tijolos, porque a presente amostra apresenta apenas tijolos com valores de porosidade superiores.

Quando os tijolos estão secos a diferença de valores de velocidade entre as direções L e T1 situa-se entre 200 m/s e 500 m/s e entre as direções T1 e T2 situa-se entre 100 m/s e 300 m/s. Quando os tijolos estão saturados a diferença de valores de velocidade entre as direções L e T1 e as direções T1 e T2 situa-se entre 200 m/s e 300 m/s. A diferença entre velocidades quando os tijolos estão secos e saturados, na direção L situam-se entre 100 m/s e 200 m/s, na direção T1 situam-se entre 100 m/s e 400 m/s e na direção T2 é aproximadamente 200 m/s. Como tal, verifica-se que mesmo tratando-se de uma amostra mais homogénea, a heterogeneidade do espaço poroso dos tijolos provoca novamente variabilidade nas variações de velocidade, estudada nas 3 direções, entre tijolos secos e saturados.

Na Figura 4.12 é apresentado o perfil de força médio e desvio padrão obtidos no ensaio de perfuração controlada. Verifica-se que o valor médio da força de perfuração é cerca de 20 N e o desvio padrão aproximadamente 5 N. Observa-se que os valores de força de perfuração não são constantes ao longo da profundidade, devido à heterogeneidade do material analisado. A constituição do cerâmico apresenta grãos de elevada rigidez que provocam o aumento da força de perfuração, causando a formação de picos elevados no perfil, assim como vazios que provocam a diminuição do valor de força de penetração.

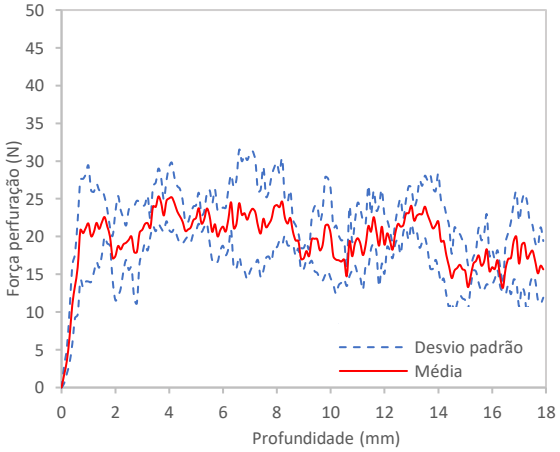


Figura 4.12- Perfis de força de perfuração da amostra a tratar.

Da amostra de tijolos com valores de porosidade mais elevados, analisados neste subcapítulo, foram posteriormente selecionados 6 tijolos que apresentassem dimensões semelhantes e cujas faces tivessem o mínimo de irregularidades para a continuação do estudo.

5. Caracterização da ação consolidante

5.1 Considerações iniciais

Num tratamento consolidante é necessário que ocorram reações de hidrólise do produto consolidante, sendo indispensável a existência de humidade no interior dos poros do material a ser tratado. Deste modo, foi necessário garantir que os provetes apresentassem teor em água equivalente ao dos tijolos expostos ao ambiente de laboratório durante pelo menos um mês.

Foram selecionados 3 tijolos dispostos na sala do laboratório durante um mês, previamente secos em estufa, e foi calculado o seu teor em água. De seguida, foi feito o controlo do teor em água de dois tijolos, anteriormente secos em estufa, colocados na câmara húmida durante 24 horas e expostos ao ambiente de laboratório durante 6 dias.

Na Tabela 5.1 estão apresentados os valores de teor em água dos tijolos que estavam no laboratório há cerca de um mês. O registo de medições de massa realizados está disponível no Anexo I.

Tabela 5.1- Controlo do teor em água dos tijolos colocados no ambiente exterior.

Tempo na estufa	Teor em água (%)		
	T26	T27	T28
0 h	0,17	0,17	0,23
72 h			

A variação do teor em água dos tijolos colocados na câmara húmida está apresentada na Figura 5.1, onde se verifica que o valor do teor em água mais elevado, cerca de cerca de 0,3%, tem tendência a estabilizar em 0,25% quando os tijolos são retirados da câmara húmida e dispostos na sala do laboratório. O registo de medições de massa está disponível no Anexo I.

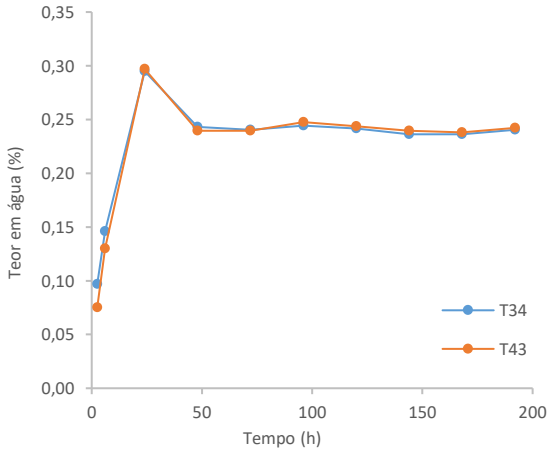


Figura 5.1- Monitorização do teor em água dos tijolos.

Na Tabela 5.1 verifica-se que o teor em água dos tijolos é aproximadamente 0,20%. Este valor é semelhante ao obtido pelos tijolos sujeitos ao procedimento de colocação na câmara húmida. Deste modo, na sequência do estudo o procedimento adotado para condicionamento do teor em água dos provetes, realizado antes da aplicação do produto consolidante, foi a colocação na câmara húmida durante 24 horas e exposição ao ambiente de laboratório durante 6 dias.

O controlo do teor em água dos provetes está apresentado na Figura 5.2. Os valores de teor em água registados estão disponíveis no Anexo II.

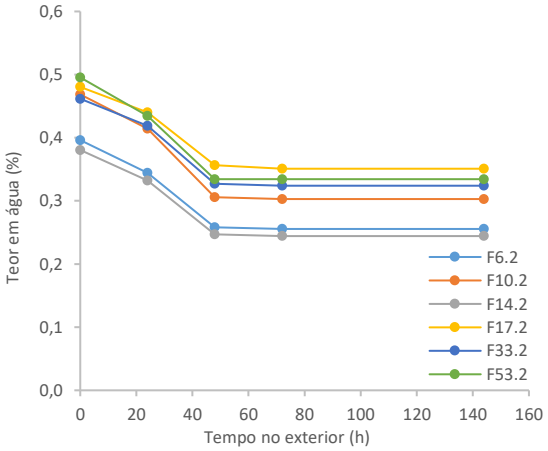


Figura 5.2- Controlo do teor em água após colocação na câmara húmida dos provetes, antes do tratamento consolidante.

Na Figura 5.2, é apresentada a evolução do teor em água desde a sua retirada da câmara húmida até a sua estabilização. Os valores de teor em água após a estabilização nas instalações do laboratório foram aproximadamente de 0,25% a 0,4%.

5.2 Tratamento consolidante

A caracterização do tratamento consolidante estudado incluiu a avaliação de quantidades de produto absorvido e consumido e o controlo da evolução da massa dos provetes tratados. Os valores obtidos são muito influenciados pela operação de pincelagem, porque se trata da aplicação do produto consolidante recorrendo a um pincel, em provetes de pequena dimensão, o que pode gerar uma grande dispersão de quantidade de produto aplicado e de resultados da consolidação (Costa e Delgado Rodrigues, 2008).

Na Tabela 5.2, está apresentada a quantidade média, e respetivo desvio padrão, de produto absorvido e consumido, durante o tratamento de consolidação. No Anexo II estão apresentadas as pesagens, inicial e final, dos provetes e dos respetivos conjuntos, recipiente, produto e pincel, bem como, a quantidade de produto consumido e absorvido por cada provete.

É verificado que a quantidade de produto consumido é superior à quantidade de produto absorvido pelo provete, porque este evapora durante todo o processo de tratamento e escorre pelas faces dos provetes durante a aplicação.

Tabela 5.2- Quantidade de produto absorvido e consumido, por pincelagem, durante o tratamento de consolidação para os provetes.

n 2,5x4x20 (cm)	Quantidade de produto absorvido (kg/m^2)	Quantidade de produto consumido (kg/m^2)
6	3,3 (± 0,13)	4,4 (± 0,39)

A Figura 5.3 relaciona a porosidade dos provetes com a quantidade de produto absorvido. Apesar da variação de porosidade entre os provetes ser pouco expressiva, verifica-se que existe a tendência para que os provetes com valores de porosidade mais elevados apresentem maior quantidade de produto absorvido.

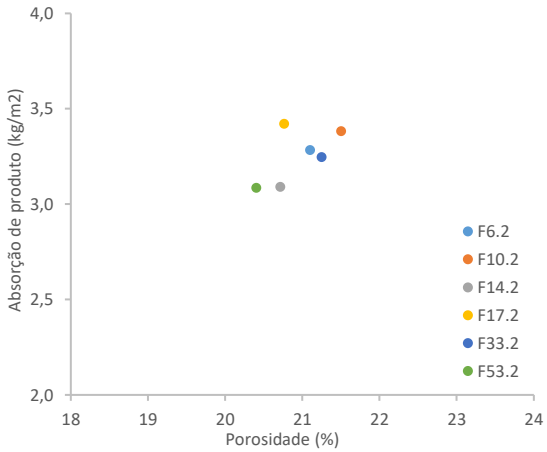


Figura 5.3- Relação entre a porosidade e a quantidade de produto absorvido por cada provete.

A Figura 5.4 apresenta a evolução da variação da massa registada nos provetes tratados, expressa em termos percentuais. Os valores de massa, humidade relativa e temperatura registados durante a monitorização estão disponíveis no Anexo II. Verifica-se que após a aplicação do tratamento consolidante, os valores de massa registados tendem a estabilizar 20 dias após a aplicação do tratamento.

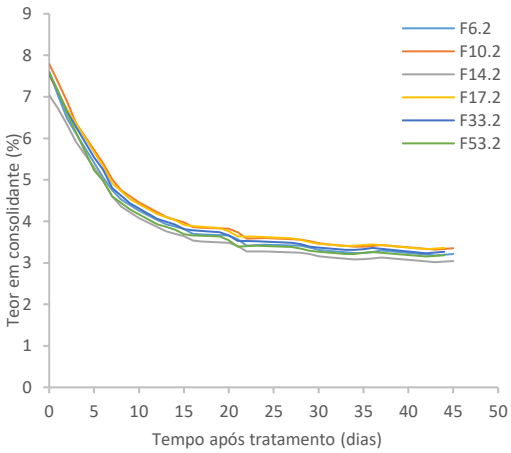


Figura 5.4- Evolução da variação da massa dos provetes, após o tratamento.

O registo da temperatura e da humidade relativa realizado está apresentado na Figura 5.5.

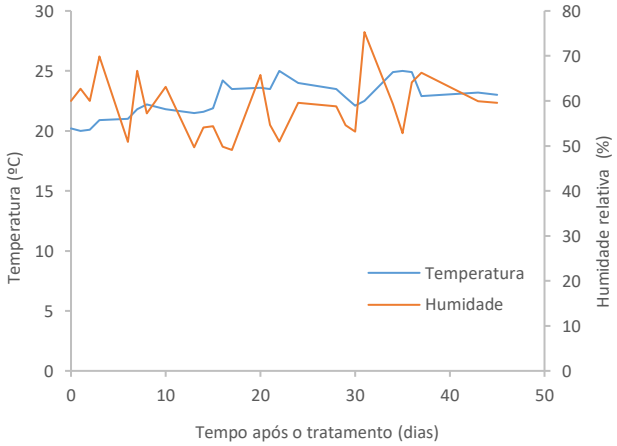


Figura 5.5- Registo de temperatura e humidade relativa na sala de colocação dos provetes.

De acordo com a Figura 5.5 verifica-se que a valores mais elevados de temperatura correspondem valores menores de humidade relativa. A temperatura durante o período de estabilização dos provetes variou entre 20 ºC e 25 ºC e a humidade relativa situou-se entre 50% a 75%, verificando-se que ocorreram condições ideais para aplicação do produto consolidante e estabilização dos provetes.

5.3 Avaliação da eficácia inicial

A avaliação da eficácia inicial de um tratamento consolidante analisa variações de propriedades físicas e mecânicas do substrato, antes e após tratamento.

De seguida, a Tabela 5.3, apresenta os valores de porosidade e teor em água máximo, para provetes não tratados e tratados, respetivamente. Os valores de porosidade e teor em água máximo, de cada provete estão disponíveis no Anexo II.

Tabela 5.3- Porosidade e teor em água máximo da amostra tratada e não tratada.

Amostra não tratada		
n	Porosidade P (%)	Teor em água máximo (%)
6	21,1 (± 0,3)	10,2 (± 0,2)
Amostra tratada		
n	Porosidade P (%)	Teor em água máximo (%)
6	17,9 (± 0,3)	8,4 (± 0,2)

A análise comparativa de provetes não tratados e tratados verifica que a porosidade dos provetes tratados é menor, cerca de 3,2%, porque a presença do produto consolidante reduziu o volume de espaço poroso dos provetes. O teor em água máximo dos provetes tratados também é inferior, pelo mesmo motivo que causou a diminuição da porosidade. Comparativamente a um estudo, apresentado por Franzoni *et al*. (2013), a aplicação de produto consolidante à base de silicato de etilo (TEOS) sobre tijolos cerâmicos, o teor em água máximo diminuiu de 30,4% para 23,6%, tendo apresentado uma variação de valores superior.

O ensaio de propagação de ultra-sons e determinação da sua velocidade é realizado recorrendo ao método direto e indireto, com provetes secos e saturados. No método direto foram avaliadas as direções L e T1 e os resultados obtidos estão apresentados na Figura 5.6, onde é apresentada a relação entre velocidade de propagação de ultra-sons secos e saturados, para os provetes não tratados e tratados. O registo da velocidade de cada provete está apresentado na Tabela 5.4.

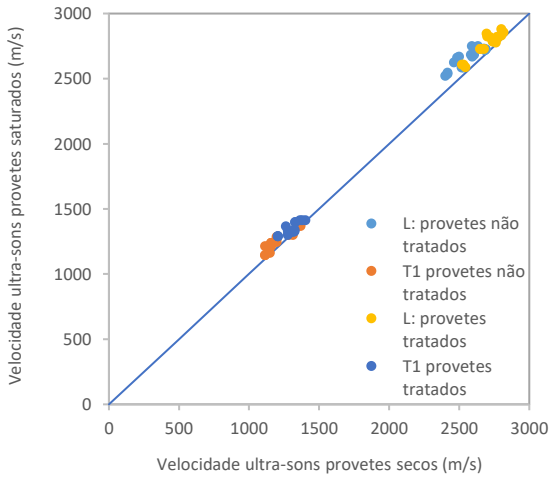


Figura 5.6- Relação entre velocidade de provetes secos e saturados, para todas as direções estudadas- método direto.

Verifica-se que a mancha de valores superiores pertence aos provetes tratados e não tratados analisados na direção L e a mancha de valores inferiores pertence aos provetes tratados e não tratados analisados na direção T1. Como tal, a distinção entre valores é influenciada primeiramente pela direção analisada, demonstrando que o comportamento anisotrópico se

manteve. Os valores registados na análise da direção L são da mesma ordem de grandeza dos obtidos na análise da amostra a tratar. No entanto, os valores registados na análise da direção T1 são consideravelmente inferiores aos obtidos anteriormente no ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons, realizado na mesma direção, na amostra a tratar. A diferença entre estes valores ocorre, porque, após o corte, a espessura na direção T1 passou a metade no caso dos provetes, provocando a diminuição da velocidade de propagação de ultra-sons.

Avaliando cada mancha de valores individualmente, verifica-se que os valores mais elevados correspondem aos provetes tratados. Deste modo, associado à aplicação do tratamento, houve um aumento de velocidade de propagação de ultra-sons causado pela precipitação do produto consolidante no interior dos poros dos provetes tratados.

Tabela 5.4- Velocidade de propagação de ultra-sons nos provetes tratados e não tratados- método direto.

Provete não tratado	Velocidade: L (m/s)		Velocidade: T1 (m/s)		Provete tratado	Velocidade: L (m/s)		Velocidade: T1 (m/s)	
	Seco	Saturado	Seco	Saturado		Seco	Saturado	Seco	Saturado
F6.1	2480	2660	1160	1230	F6.2	2760	2770	1280	1300
	2460	2620	1160	1210		2770	2800	1280	1330
	2500	2670	1120	1210		2770	2820	1260	1360
F10.1	2520	2580	1150	1160	F10.2	2680	2730	1210	1290
	2530	2580	1120	1140		2650	2730	1210	1290
	2530	2590	1120	1140		2650	2730	1210	1290
F14.1	2620	2740	1160	1240	F14.2	2700	2820	1280	1330
	2590	2750	1160	1240		2700	2850	1330	1330
	2640	2750	1160	1240		2720	2820	1330	1330
F17.1	2610	2680	1280	1310	F17.2	2740	2790	1330	1400
	2580	2680	1310	1300		2740	2780	1330	1400
	2590	2670	1280	1300		2750	2800	1320	1320
F33.1	2420	2530	1200	1280	F33.2	2530	2600	1300	1320
	2420	2540	1200	1260		2520	2600	1330	1340
	2400	2520	1200	1240		2550	2590	1280	1330
F53.1	2690	2720	1370	1370	F53.2	2820	2850	1400	1410
	2680	2720	1370	1410		2800	2880	1380	1410
	2680	2730	1370	1390		2800	2830	1360	1410

Na Tabela 5.4, conclui-se que existe novamente a tendência para a velocidade dos provetes secos ser inferior à dos provetes saturados. No entanto, a variação entre estes valores não é uniforme. Os provetes não tratados secos na direção L apresentam valores entre 2400 m/s e 2700 m/s e na direção T1 entre 1100 m/s e 1400 m/s. Os mesmos provetes saturados apresentam valores na direção L entre 2500 m/s e 2800 m/s e na direção T1 entre 1100 m/s e 1400 m/s. Os valores de provetes tratados secos na direção L estão entre 2500 m/s e 2800 m/s e na direção T1 entre 1200 m/s e 1400 m/s. Os mesmos provetes saturados apresentam valores na direção L entre 2600 m/s e 2900 m/s e na direção T1 entre 1300 m/s e 1400 m/s.

Conclui-se que, para além da elevada variação de valores de velocidade entre a direção L e T1, entre aproximadamente 1300 m/s a 1500 m/s, semelhante para todos os provetes secos e saturados da amostra tratada e não tratada, são apresentadas variações de velocidade entre provetes secos e saturados entre dos 0 m/s e 100 m/s nas duas direções, sendo que para provetes tratados e não tratados estes valores são semelhantes. Por fim, a variação de valores de velocidade entre provetes tratados e não tratados é semelhante para provetes secos e saturados, entre aproximadamente os 0 m/s e os 200 m/s.

A velocidade de propagação de ultra-sons foi analisada através do método indireto nos provetes não tratados e tratados, os resultados obtidos estão apresentados na Figura 5.7 e na Tabela 5.5. Os valores registados na medição e os gráficos que permitiram a obtenção dos valores de velocidade estão apresentados no Anexo II.

Na Figura 5.7 é apresentada a relação entre velocidade de provetes secos e saturados, não tratados e tratados. Apesar da sobreposição da mancha de valores da amostra tratada e da amostra não tratada, é verificado que os valores mais elevados correspondem a provetes tratados e os menores valores a provetes não tratados. Como tal, conclui-se que, tal como na análise através do método direto, a aplicação do produto consolidante provocou o aumento de velocidade de propagação de ultra-sons. Os valores situam-se acima da reta de declive unitário, demonstrando que provetes saturados atingem um valor de velocidade de ultra-sons superior, tal como na Figura 5.6.

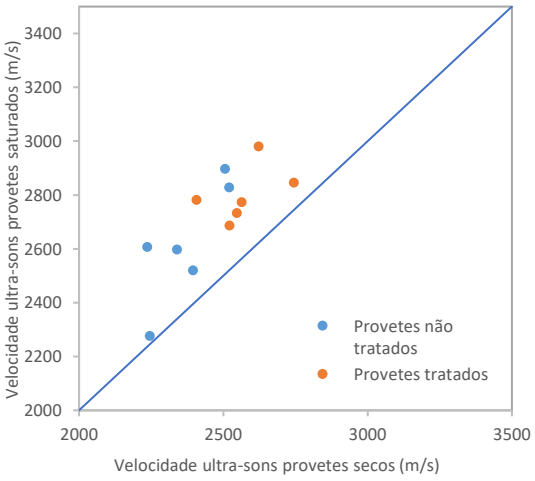


Figura 5.7- Relação entre velocidade de ultra-sons de provetes secos e saturados, para os provetes não tratados e tratados- método indireto.

Tabela 5.5- Velocidade de propagação de ultra-sons nos provetes não tratados e tratados- método indireto.

Amostra não tratada			Amostra tratada		
Provete	Velocidade U.S. (m/s)		Provete	Velocidade U.S. (m/s)	
	Provetes secos	Provetes saturados		Provetes secos	Provetes saturados
F6.1	2240	2280	F6.2	2520	2690
F10.1	2510	2660	F10.2	2550	2730
F14.1	2240	2380	F14.2	2560	2770
F17.1	2400	2880	F17.2	2740	2850
F33.1	2340	2600	F33.2	2410	2660
F53.1	2520	2830	F53.2	2620	2980

Os resultados obtidos para provetes não tratados secos estão entre 2200 m/s e 2500 m/s e saturados estão entre 2300 m/s e 2900 m/s. Para os provetes tratados secos os valores estão entre 2400 m/s e 2700 m/s e saturados estão entre 2700 m/s e 3000 m/s. Nesta análise através do método indireto verifica-se que o incremento associado à aplicação do tratamento para os provetes secos é aproximadamente 200 m/s e para os provetes saturados situa-se entre 100 m/s e 400 m/s.

A Tabela 5.6 apresenta o valor da resistência à flexão e à compressão, da amostra não tratada e tratada.

Tabela 5.6- Comparação de valores de resistência à flexão e compressão, entre provetes tratados e não tratados.

	n 2,5x4x20 (cm)	Resistência flexão (Mpa)	n 2,3x2,4x3 (cm)	Resistência compressão (Mpa)
Provetes não tratados	6	1,6 (± 0,3)	21	18,2 (± 2,4)
Provetes tratados	6	1,7 (± 0,3)	21	19,5 (± 2,6)

Os valores obtidos no ensaio de resistência à flexão para a amostra não tratada e tratada demonstram um ligeiro incremento de 0,1 MPa, pelo que não é possível identificar claramente a presença de produto consolidante.

Pelo contrário, os valores de resistência à compressão, para a amostra não tratada e tratada demonstram o aumento de resistência associado ao tratamento consolidante, apresentando um aumento de resistência de 1,3 MPa. Comparativamente ao estudo realizado por Franzoni *et al*. (2013), incidente sobre a aplicação de um produto consolidante à base de silicato de etilo (TEOS) em tijolos cerâmicos, onde a variação de resistência mecânica à compressão foi de 7,2 MPa, o incremento de resistência à compressão é muito inferior.

Na Figura 5.8, está apresentada a relação entre resistência à compressão de provetes tratados e não tratados.

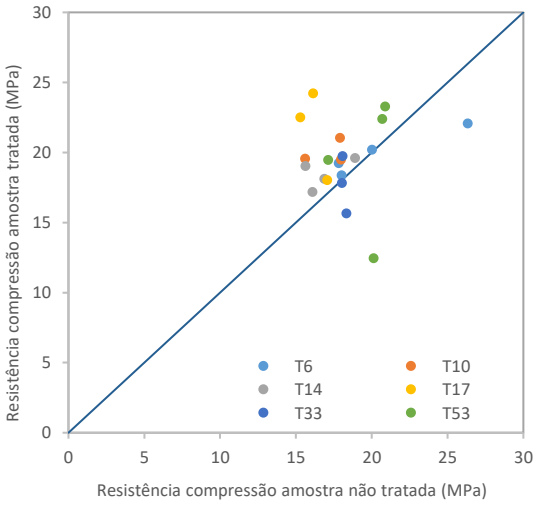


Figura 5.8- Relação entre resistência à compressão da amostra tratada e não tratada.

De acordo com a Figura 5.8 verifica-se que a maioria dos valores obtidos se localizam acima da reta de declive unitário, uma vez que a resistência da amostra tratada é superior à resistência da amostra não tratada. As exceções de valores que se localizam abaixo da reta de declive unitário, apresentados na Figura 5.8, correspondem a provetes que apresentavam fissuras no seu interior ou que, durante o processo de corte, ficaram com faces não paralelas comprometendo os valores de resistência mecânica à compressão.

Na Figura 5.9 são apresentadas as curvas dos valores médios e desvios padrão da força de perfuração atingida durante o ensaio de perfuração controlada.

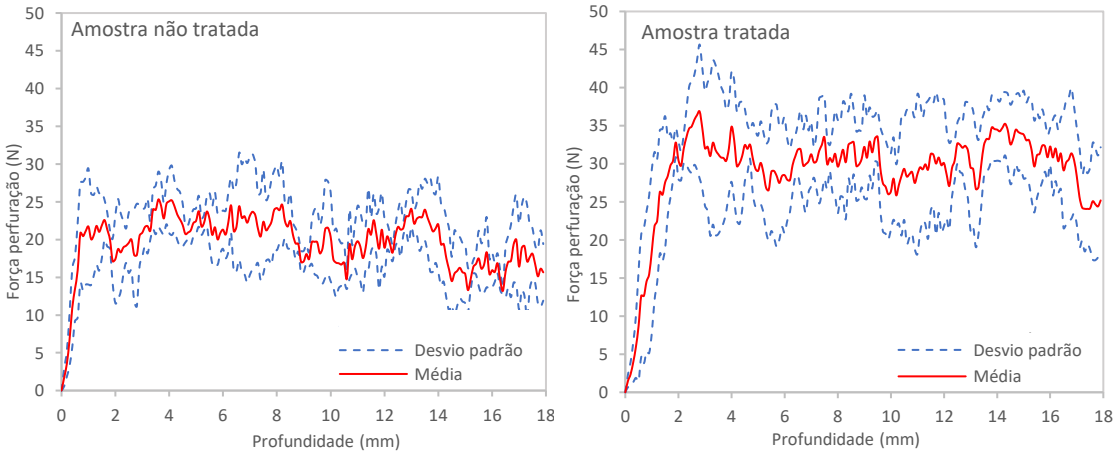


Figura 5.9- Perfis de força de perfuração, para amostra tratada e não tratada.

Verifica-se que o perfil da amostra não tratada apresenta um valor médio de 20 N, com desvio padrão de 5 N, e o perfil da amostra tratada demonstra um aumento destes valores, com valor médio de 31 N e respetivo desvio padrão de 7 N. Deste modo, é verificado o aumento da força de perfuração, associado ao tratamento consolidante.

A ação consolidante foi identificada ao longo de toda a espessura ensaiada, demonstrando que a concentração de produto existente na amostra tratada distribuiu-se uniformemente, ao longo de toda a profundidade. Consequentemente, não se verifica a existência de contraste entre zonas consolidadas e não consolidadas, provocada pela acumulação de produto consolidante à superfície dos provetes, uma vez que não se observa nenhum pico de força de perfuração próximo da superfície.

É possível observar que os perfis de perfuração não apresentam valores de força constante ao longo da profundidade, devido à heterogeneidade do material cerâmico associada à presença de pequenos grãos de areia, bem como de descontinuidades responsáveis pela redução dos valores de força.

A presença desta heterogeneidade e a potencial dificuldade em avaliar a ação consolidante de tratamentos realizados em materiais heterogéneos levou ao interesse em procurar utilizar a metodologia mais recentemente proposta por Delgado Rodrigues e Costa (2016) para avaliar a ação consolidante de tratamentos aplicados em argamassas de cal aérea recorrendo à resistência à perfuração. Esta metodologia, definida com base na caracterização à perfuração de argamassas de baixa resistência mecânica consiste num algoritmo que procura identificar a presença de valores de força que possam ser representativos da resistência da pasta de argamassa e com reduzida interferência dos agregados. A metodologia consiste na seleção de um conjunto de valores de força obtidos ao longo da profundidade ensaiada, recorrendo à segmentação dessa profundidade em intervalos iguais e à obtenção para cada um dos segmentos do valor médio associado a um dado percentil.

A referida metodologia foi aplicada para a avaliação da ação consolidante promovida pelo tratamento em todos os ensaios de furação realizados em provetes tratados e não tratados. Para tal, não se considerou os valores de força obtidos entre 0 mm e 2 mm, por serem influenciados pela configuração triangular da broca, e procedeu-se à aplicação da metodologia recorrendo à segmentação da profundidade ensaiada (de 2 mm a 18 mm e de 2 mm a 17 mm) em troços de 2 mm e de 5 mm, tendo-se optado por proceder à análise recorrendo aos segmentos de 5 mm.

Em cada segmento, os valores de força de perfuração foram ordenados de forma crescente e, para um percentil de 20%, foram selecionados os 10 valores menores. Este procedimento foi realizado ao longo de todos os segmentos de cada furo. De seguida, foi calculada a média de cada conjunto de 10 valores de todos os segmentos, obtendo-se 3 valores médios de força de perfuração para cada furo.

A decisão de optar por segmentos de 5 mm baseou-se na comparação com os resultados obtidos com segmentos de 2 mm, onde se verificava maior variabilidade no valor médio das forças obtido, demonstrando a influência dos agregados de maior rigidez.

A análise da Figura 5.10 permite verificar claramente que ocorreu ação consolidante, visto que os valores médios de força superiores foram obtidos na perfuração da amostra tratada.

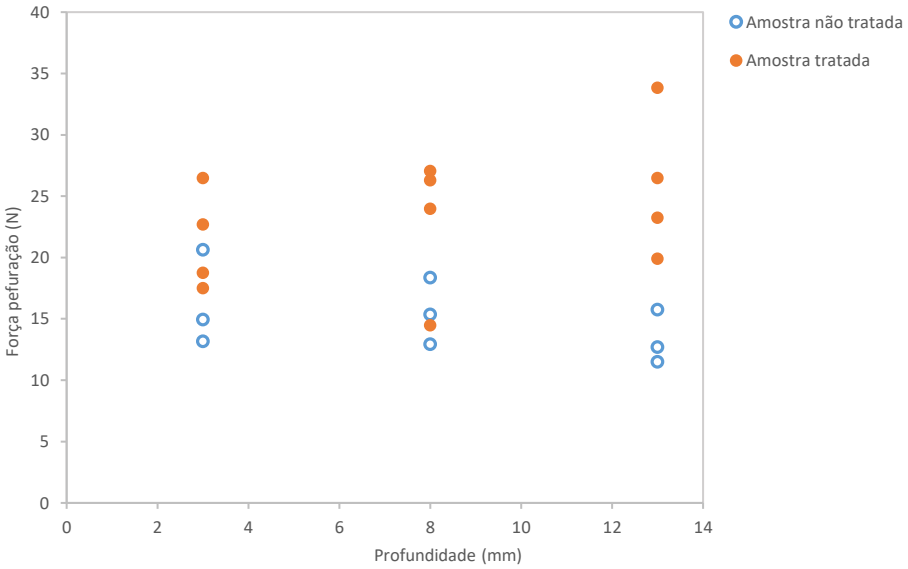


Figura 5.10- Resistência à perfuração do material cerâmico tratado e não tratado.

6. Conclusões e Propostas de Desenvolvimentos Futuros

6.1 Conclusões gerais

A caracterização física e mecânica do material cerâmico demonstrou tratar-se de uma amostra total muito heterogénea. Na caracterização física dos tijolos cerâmicos foi identificada elevada variabilidade nos valores de porosidade. O mesmo comportamento ocorreu para os valores obtidos para massa volúmica real e aparente e teor máximo em água. A elevada heterogeneidade de propriedades dos tijolos é explicada pelos métodos de produção rudimentares, que causou não só a variabilidade de formas como a existência de irregularidades à superfície, de diferentes volumes e ligação entre espaços porosos dos tijolos.

A absorção de água por capilaridade refletiu a heterogeneidade dos tijolos e a influência dos valores de porosidade nesta propriedade, dado que os tijolos mais porosos apresentaram maior capacidade para absorver água por capilaridade.

A avaliação do teor máximo em água e do teor em água por imersão durante 48 horas permitiu obter valores de coeficiente de saturação elevados, revelando que os tijolos manifestavam uma rede porosa bem interconectada.

A análise de propriedades físicas demonstrou, também, um comportamento anisotrópico por parte dos tijolos causado pelo processo de conformação inerente à sua produção, uma vez que foi realizada a prensagem na direção T2. Isto é, de acordo com a direção em que o tijolo está a ser analisado, a propriedade em questão adquire valores diferentes. A absorção de água por capilaridade e a velocidade de propagação de ultra-sons foram avaliadas segundos três direções e que indiciaram alguma anisotropia nos tijolos. Os valores de velocidade de propagação de ultra-sons avaliados no estado seco e saturado indiciaram a presença de um espaço poroso, em parte constituído por fissuras.

No processo de aplicação do produto consolidante foi utilizado o pincel, que demonstrou ser um bom método, apesar do desperdício de produto por escorrência, porque permitiu atingir facilmente a saturação dos provetes. Durante a monitorização das condições de temperatura e humidade relativa, verificou-se que estas foram as ideais e se mantiveram relativamente estáveis para o procedimento de aplicação do produto consolidante e durante o processo de estabilização dos provetes tratados em ambiente de laboratório. A estabilização da massa dos provetes ocorreu sensivelmente ao fim de 20 dias após a conclusão da aplicação do produto.

A avaliação da eficácia da ação consolidante incluiu a determinação do valor de porosidade, de velocidade de ultra-sons, de resistência mecânica à compressão, à flexão e à perfuração controlada, tendo sido possível retirar conclusões acerca das mudanças produzidas nestas propriedades físicas e mecânicas avaliadas em provetes tratados e não tratados.

A determinação de porosidade e teor em água máximo demonstraram a presença de produto consolidante. A porosidade diminuiu, porque o produto, após precipitação, localizou-se dentro do espaço poroso, diminuindo o volume de vazios. O teor em água máximo diminuiu, também graças à diminuição do volume de vazios disponível.

A velocidade de propagação de ultra-sons foi avaliada através do método direto e do método indireto, e em ambos os casos foi identificada a ação do tratamento através do aumento do valor da velocidade de propagação de ultra-sons.

Os ensaios de resistência à flexão não demonstraram a presença de produto consolidante comparativamente à amostra não tratada, mas o ensaio de resistência à compressão regista valores ligeiramente superiores para a amostra tratada.

No ensaio de perfuração controlada foi possível verificar que o produto consolidante, aplicado por pincelagem, penetrou toda a profundidade da amostra, comprovando ter elevada capacidade de penetração. A perfuração controlada foi realizada em toda a profundidade dos provetes, como tal, foi possível concluir que, em todos os furos realizados, os provetes estavam totalmente tratados e que não ocorreu acumulação de produto à superfície. Como tal, a ação de consolidação teve a penetração desejada e ocorreu de forma uniforme por todo o provete.

O recurso à metodologia recentemente proposta por Delgado Rodrigues e Costa (2016), para avaliar a ação consolidante de tratamentos aplicados em argamassas de cal aérea recorrendo à resistência à perfuração, permitiu também identificar claramente a presença da ação consolidante em toda a espessura dos provetes tratados.

6.2 Propostas para desenvolvimentos futuros

A realização do presente estudo permitiu a identificação de outras abordagens interessantes ao desenvolvimento do tema. As abordagens podem ser as seguintes:

- Abordar outros métodos de aplicação do produto, tais como: imersão, pulverização, compressas e capilaridade, de modo a averiguar qual a influência do método de aplicação do produto na eficácia do tratamento consolidante em materiais cerâmicos;
- Incluir na amostra tratada provetes de tijolos com porosidade inferior, para verificar qual a influência na absorção de produto consolidante e na ação consolidante resultante;
- Proceder à avaliação da potencial nocividade do tratamento consolidante estudado;
- Estender o estudo a uma amostra de tijolos antigos de constituição e características diversas;
- Proceder à avaliação comparativa do desempenho do tratamento estudado com tratamentos resultantes da aplicação de outros consolidantes de natureza diferente;
- Proceder à avaliação da durabilidade do tratamento consolidante estudado.

Referências bibliográficas

Aguiar, J. (1999). “Estudos cromáticos nas intervenções de conservação em centros históricos”. Tese de Doutoramento. Évora: Universidade de Évora.

Aguiar, J., Tavares M. e Veiga, M. (2001) “Consolidação de revestimentos exteriores (Rebocos e barramentos) de edifícios antigos- reflexões para um plano de estudo”. Lisboa: LNEC, Relatório 216/2001- NA.

Barrios, A., Barrios, J., Polo, J., Rodríguez, C., Padura, C. e SA Vorsevi (2000). “Estudio de Las Fábricas de Ladrillo Del Hospital de Las Cinco Llagas de Sevilla, Actual Sede Del Parlamento de Andalucía”. 12th International Brick/Block Masonry Conference, 203–14.

Binda, L., Folli, R. e Roberti, G. (2000). “Survey and Investigation for the Diagnosis of Damaged Masonry Structures: the ‘Torrazzo’ of Cremona”. In 12th International Brick/Block Masonry Conference, 237–57.

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, 2833–39.

Costa, D. e Delgado Rodrigues, J. (2008). “Evaluation of Consolidation Treatments Applied to Granitic Materials. Experience and Critical Overview of Laboratory Testing”. Stone Consolidation in Cultural Heritage. Research and Practice, 389–98.

Cultrone, G. e Madkour, F. (2013). “Evaluation of the Effectiveness of Treatment Products in Improving the Quality of Ceramics Used in New and Historical Buildings”. Journal of Cultural Heritage, 14. 304–10.

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”. Jounal of the European Ceramic Society, 24, 547–64.

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 Costa, D. (2016). “A New Interpretation Methodology for Microdrilling Data from Soft Mortars”. Journal of Cultural Heritage. (disponível online).

Fernandes, F. (2006). “Evaluation of Two Novel NDT Techniques: Microdrilling of Clay Bricks and Ground Penetrating Radar in Masonry”. Tese de Doutoramento. Guimarães: Universidade do Minho.

Fernandes, F. e Lourenço, P. (2007). “Estado Da Arte Sobre Tijolos Antigos”. Congresso Construção 2007- 3º Congresso Nacional, 1-11.

Fernandes, F., Lourenço, P. e Castro, F. (2003). “Old Clay Brick Characterization”. 3º ENCORE-Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edificios, 385-94.

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 Bosteranu Dan, Foundation ERGOROM, Richard Prikryl, e Akos Torok, (29–48). Holanda: Springer.

Ferreira Pinto, A. (2002). “Conservação de pedras carbonatadas. Estudo e seleção de tratamentos”. Tese de doutoramento. Lisboa: Instituto Superior Técnico.

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. e Gomes, A. (2009). “Caracterização de Argamassas No Estado Endurecido”. Em Sebenta Da Disciplina de Materiais de Construção I (1–7). Lisboa: Instituto Superior Técnico- Universidade Técnica de Lisboa.

Franzoni, E., Pigino, B., Leemann, A. e Lura, P. (2013). “Use of TEOS for Fired-Clay Bricks Consolidation”. Materials and Structures, 47, 1175–84.

López-arce, P., Garcia-Guinea, J., Gracia, M. e Obis, J. (2003). “Bricks in Historical Buildings of Toledo City Bricks in Historical Buildings of Toledo City: Characterization and Restoration”. Materials Characterization, 50, 59-68.

Lourenço, P., Fernandes, F. e Castro, F. (2010). “Handmade Clay Bricks: Chemical, Physical and Mechanical Properties”. International Journal of Architectural Heritage, 4, 38-58.

Revez, M., Costa, D. e Delgado Rodrigues, J. (2008). “Effects of TEOS-Based Consolidants on Ancient Paving Tiles”. Stone Consolidation in Cultural Heritage- Research and Practice, 369–78.

RILEM TC 25-PEM. (1980). “Recommended Tests to Measure the Deterioration of Stone and to Assess the Effectiveness of Treatment Methods”. Materials and Structures, 13, 177–78;179–80;209.

Stefanidou, M., Papayanni, I. e Pachta, V. (2015). “Analysis and Characterization of Roman and Byzantine Fired Bricks from Greece”. Materials and Structures, 48, 2251-60.

Tavares, M., Aguiar, J. e Veiga, R. (2005). “Uma Metodologia de Estudo Para a Conservação de Rebocos Antigos- O Restauro Através Da Técnica de Consolidação”. VI Seminário Brasileiro de Tecnologia Das Argamassas, 692-700.

Vaz, M., Pires, J. e Carvalho, A. (2008). “Effect of the Impregnation Treatment with Paraloid B-72 on the Properties of Old Portuguese Ceramic Tiles”. Jounal of Cultural Heritage 9, 269–76.

Wacker. (2014). “Technical data sheet for SILRES BS OH 100”. Wacker Chemie AG, 1-3.

Wijffels, T. e Nijland, T. (2004). “Deterioration of Historic Brick Masonry due to Combined Gypsum, Ettringite and Thaumasite: A Case of Study”. 13th International Brick and Block Masonry Conference, 1–8.

Anexos

Anexo I- Caracterização de tijolos cerâmicos

Porosidade, massas volúmicas e teor em água máximo

Tijolo	Massa volúmica (kg/m³)		Porosidade P (%)	Teor em água (%)	Tijolo	Massa volúmica (kg/m³)		Porosidade P (%)	Teor em água (%)
	Real	Aparente		Máximo		Real	Aparente		Máximo
T1	2600	2080	20,1	9,7	T27	2520	2120	15,8	7,5
T2	2590	2090	19,5	9,3	T28	2520	2120	16,0	7,5
T3	2600	2070	20,2	9,7	T29	2510	2150	14,1	6,6
T4	2600	2080	20,1	9,7	T30	2560	2090	18,5	8,9
T5	2580	2120	17,9	8,4	T31	2580	2130	17,7	8,3
T6	2610	2060	21,0	10,2	T32	2540	2130	16,1	7,6
T7	2590	2090	19,4	9,3	T33	2610	2060	21,0	10,2
T8	2570	2100	18,3	8,7	T34	2590	2090	19,3	9,3
T9	2600	2070	20,2	9,8	T35	2560	2140	16,3	7,6
T10	2600	2060	20,9	10,2	T36	2600	2090	19,5	9,3
T11	2560	2130	16,8	7,9	T37	2590	2100	18,9	9,0
T12	2600	2080	20,0	9,6	T38	2610	2070	20,8	10,1
T13	2600	2070	20,4	9,8	T39	2610	2090	20,0	9,6
T14	2600	2070	20,6	10,0	T40	2590	2110	18,5	8,8
T15	2610	2030	22,1	10,9	T41	2580	2120	17,8	8,4
T16	2550	2150	15,6	7,2	T42	2600	2080	19,7	9,5
T17	2610	2070	20,5	9,9	T43	2590	2090	19,3	9,3
T18	2560	2130	16,8	7,9	T44	2560	2130	16,7	7,8
T19	2590	2110	18,3	8,6	T45	2590	2090	19,6	9,4
T20	2600	2070	20,4	9,8	T46	2600	2070	20,3	9,8
T21	2570	2130	17,1	8,0	T47	2620	2070	21,0	10,2
T22	2610	2060	21,2	10,3	T48	2610	2070	20,6	9,9
T23	2590	2080	19,9	9,6	T49	2570	2130	17,1	8,1
T24	2600	2050	21,1	10,3	T50	2600	2090	19,6	9,4
T25	2570	2060	20,0	9,7	T51	2600	2100	19,4	9,2
T26	2540	2100	17,3	8,3	T52	2610	2060	21,1	10,2
					T53	2600	2070	20,4	9,8

Velocidade de propagação de ultra-sons

tijolo	Velocidade (m/s)						Porosidade (%)
	direção L		direção T1		direção T2		
	Seco	Saturado	Seco	Saturado	Seco	Saturado	
T9	3460	3510	2990	3330	2720	2720	20,2
	3430	3610	2970	3360	2600	2630	
	3400	3500	2970	3270	2550	2630	
T10	3150	3290	3010	3200	2530	2680	20,9
	3110	3240	2970	3160	2500	2700	
	3110	3210	3010	3080	2560	2600	
T11	3600	3720	3400	3740	3170	3450	16,8
	3610	3700	3380	3710	3130	3480	
	3570	3690	3330	3680	3150	3510	
T12	3340	3450	3180	3330	2700	2820	20,0
	3320	3410	3140	3310	2760	2800	
	3300	3410	3120	3310	2670	2820	
T15	2910	3020	2750	2750	2420	2440	22,1
	2890	2990	2660	2710	2370	2450	
	2840	2930	2620	2630	2340	2420	
T16	3430	3690	3160	3220	2500	2650	15,6
	3420	3640	3100	3160	2330	2700	
	3410	3550	3060	3160	2330	2740	
T22	3100	3140	2850	2880	2500	2720	21,2
	3080	3110	2820	2830	2560	2670	
	3060	3050	2740	2800	2410	2600	
T24	2970	3010	2780	2950	2290	2520	21,1
	3010	3020	2870	2930	2300	2440	
	3040	3000	2830	2820	2260	2410	
T27	3320	3530	3160	3480	3030	3360	15,8
	3330	3470	3180	3310	2900	3280	
	3340	3470	3140	3200	2820	3200	
T28	3470	3610	3360	3500	3360	3570	16,0
	3370	3610	3270	3400	3150	3480	
	3450	3660	3200	3290	2990	3450	
T29	3590	3760	3400	3630	2880	3280	16,0
	3590	3720	3310	3660	2800	3250	
	3620	3670	3290	3600	2900	3310	
T52	2970	3250	2360	2830	2550	2780	21,1
	2960	3200	2550	2770	2520	2630	
	2950	3140	2470	2740	2480	2600	

Ensaio de absorção de água por capilaridade- Massa e franja líquida

Direção	Tempo (s)	Tempo ($s^{0,5}$)	T13		T14		T15		T16	
			mi (g)	h franja liq (mm)	mi (g)	h franja liq (mm)	mi (g)	h franja liq (mm)	mi (g)	h franja liq (mm)
L	0	0	757,0	0	780,1	0	750,3	0	749,1	0
	60	8	760,0	15	781,9	13	753,1	16	750,9	15
	180	13	761,9	23	783,0	20	754,7	20	751,8	24
	300	17	762,9	33	783,8	25	755,9	26	752,1	30
	600	24	764,5	38	785,3	33	757,8	34	752,8	34
	900	30	765,6	40	786,5	36	759,6	37	753,4	36
	1800	42	767,8	50	788,7	45	762,6	47	754,3	42
	3600	60	770,6	56	792,0	57	767,1	58	755,6	49
	10800	104	778,7	85	800,9	80	779,1	95	758,8	75
	18000	134	785,5	110	808,2	105	788,7	125	761,3	80
	25200	159	791,4	127	814,0	125	796,7	145	763,4	85
	86400	294	816,2	200	841,8	200	816,4	198	776,4	158
	172800	416	817,2	200	842,7	200	817,6	198	787,6	195
	259200	509	817,8	200	843,5	200	818,2	198	789,1	195
	518400	720	819,2	200	845,0	200	819,7	198	791,4	195

Direção	Tempo (s)	Tempo ($s^{0,5}$)	T21		T22		T23		T24	
			mi (g)	h franja liq (mm)	mi (g)	h franja liq (mm)	mi (g)	h franja liq (mm)	mi (g)	h franja liq (mm)
T1	0	0	756,7	0	780,5	0	775,0	0	791,9	0
	60	8	762,8	13	788,8	12	781,2	14	799,7	12
	180	13	765,3	20	793,8	20	784,6	20	804,7	19
	300	17	767,6	25	798,5	23	787,7	23	809,1	23
	600	24	770,7	30	804,3	28	792,2	27	815,3	28
	900	30	773,5	33	809,5	35	796,0	32	820,6	34
	1800	42	779,3	42	820,2	45	804,1	40	832,3	42
	3600	60	786,3	46	833,9	46	815,9	41	846,0	49
	10800	104	794,2	49	840,3	50	829,4	49	850,7	49
	18000	134	795,7	49	841,6	50	830,8	49	852,2	49
	86400	294	800,7	49	845,2	50	834,9	49	856,2	49
	172800	416	803,2	49	846,6	50	836,0	49	857,7	49
	259200	509	805,4	49	848,1	50	837,2	49	858,6	49

Direção	Tempo (s)	Tempo ($s^{0,5}$)	T17		T18		T19		T20	
			mi (g)	h franja liq (mm)	mi (g)	h franja liq (mm)	mi (g)	h franja liq (mm)	mi (g)	h franja liq (mm)
T2	0	0	772,6	0	765,2	0	770,7	0	733,3	0
	60	8	781,3	12	769,0	10	777,4	14	742,9	10
	180	13	786,2	14	770,8	15	780,4	18	748,7	18
	300	17	790,6	20	772,1	19	782,7	19	753,8	20
	600	24	796,4	22	774,0	22	785,9	20	760,2	24
	900	30	801,7	28	775,6	23	788,6	25	765,2	30
	1800	42	813,2	33	779,6	25	794,8	29	774,4	35
	3600	60	826,6	38	785,0	28	802,4	30	781,3	36
	10800	104	829,8	38	798,3	38	815,0	37	784,4	37
	18000	134	831,1	38	802,3	38	816,7	37	785,8	37
	86400	294	834,2	38	807,6	38	821,8	37	789,5	37
	172800	416	835,7	38	809,9	38	823,6	37	791,1	37
	259200	509	837,4	38	811,4	38	824,7	37	791,7	37

Direção	Tempo (s)	Tempo ($s^{0,5}$)	T13		T14		T15		T17		T20		T22		T24	
			mi (g)	h franja liq (mm)	mi (g)	h franja liq (mm)	mi (g)	h franja liq (mm)	mi (g)	h franja liq (mm)	mi (g)	h franja liq (mm)	mi (g)	h franja liq (mm)	mi (g)	h franja liq (mm)
L	0	0	757,0	0	780,1	0	750,3	0	772,3	0	733,0	0	780,5	0	791,9	0
	60	8	760,0	15	781,9	13	753,1	16	774,5	10	735,4	10	782,0	14	795,1	15
	180	13	761,9	23	783,0	20	754,7	20	775,7	14	736,3	15	783,1	17	797,3	20
	300	17	762,9	33	783,8	25	755,9	26	776,4	17	736,9	19	784,0	20	798,9	25
	600	24	764,5	38	785,3	33	757,8	34	777,5	21	738,1	24	785,2	25	801,6	37
	900	30	765,6	40	786,5	36	759,6	37	778,5	25	739,1	30	786,1	27	803,4	40
	1800	42	767,8	50	788,7	45	762,6	47	780,5	30	741,4	38	787,9	30	806,5	53
	3600	60	770,6	56	792,0	57	767,1	58	783,5	39	744,7	48	790,8	40	810,9	67
	10800	104	778,7	85	800,9	80	779,1	95	792,4	67	753,3	82	799,8	65	821,6	100
	18000	134	785,5	110	808,2	105	788,7	125	799,5	94	760,1	105	807,0	90	829,4	125
	25200	159	791,4	127	814,0	125	796,7	145	804,7	107	764,5	121	813,6	110	836,8	152
	86400	294	816,2	200	841,8	200	816,4	198	831,7	198	787,0	200	844,6	197	855,5	201
	172800	416	817,2	200	842,7	200	817,6	198	835,1	198	790,2	200	846,8	197	857,2	201
	259200	509	817,8	200	843,5	200	818,2	198	836,0	198	790,9	200	847,2	197	857,7	201
	518400	720	819,2	200	845,0	200	819,7	198	837,1	198	792,6	200	848,3	197	858,9	201

Direção	Tempo (s)	Tempo ($s^{0,5}$)	T13		T14		T15		T17		T20		T22		T24	
			mi (g)	h franja liq (mm)	mi (g)	h franja liq (mm)	mi (g)	h franja liq (mm)	mi (g)	h franja liq (mm)	mi (g)	h franja liq (mm)	mi (g)	h franja liq (mm)	mi (g)	h franja liq (mm)
T1	0	0	756,2	0	779,4	0	749,3	0	772,3	0	733,0	0	780,5	0	791,9	0
	60	8	763,2	10	785,4	11	759,2	14	779,2	11	740,8	10	788,8	12	799,7	12
	180	13	767,5	14	789,9	14	765,9	18	783,5	14	745,3	14	793,8	20	804,7	19
	300	17	771,0	17	793,6	19	771,6	20	787,0	18	748,7	19	798,5	23	809,1	23
	600	24	775,9	23	799,2	25	779,4	27	792,2	23	753,6	25	804,3	28	815,3	28
	900	30	780,3	27	804,3	30	786,2	31	796,8	28	757,8	32	809,5	35	820,6	34
	1800	42	787,5	32	813,6	35	798,0	39	804,9	34	765,6	37	820,2	45	832,3	42
	3600	60	797,8	40	827,6	44	809,6	49	817,5	40	777,1	43	833,9	46	846,0	49
	10800	104	811,3	50	836,3	48	812,2	51	830,3	50	784,2	49	840,3	50	850,7	49
	18000	134	812,6	50	837,7	48	813,4	51	831,2	50	785,7	49	841,6	50	852,2	49
	86400	294	816,7	50	842,5	48	817,4	51	835,2	50	790,6	49	845,2	50	856,2	49
	172800	416	816,7	50	842,5	48	817,4	51	835,2	50	790,6	49	846,6	50	857,7	49
	259200	509	817,4	50	843,3	48	818,3	51	835,9	50	791,3	49	848,1	50	858,6	49

Direção	tempo (s)	Tempo ($s^{0,5}$)	T13		T14		T15		T17		T20		T22		T24	
			mi (g)	h franja liq (mm)	mi (g)	h franja liq (mm)	mi (g)	h franja liq (mm)	mi (g)	h franja liq (mm)	mi (g)	h franja liq (mm)	mi (g)	h franja liq (mm)	mi (g)	h franja liq (mm)
T2	0	0	756,2	0	779,4	0	749,3	0	772,6	0	733,3	0	780,5	0	791,9	0
	60	8	764,8	9	789,7	13	759,8	7	781,3	12	742,9	10	790,2	12	803,0	12
	180	13	771,4	10	797,5	16	766,6	11	786,2	14	748,7	18	796,8	15	810,1	16
	300	17	774,7	15	801,3	18	771,9	16	790,6	20	753,8	20	800,0	18	813,4	20
	600	24	780,0	20	807,5	23	780,8	22	796,4	22	760,2	24	805,2	22	819,4	24
	900	30	784,7	22	813,1	27	787,4	26	801,7	28	765,2	30	810,2	25	824,8	27
	1800	42	793,1	26	824,1	32	799,1	31	813,2	33	774,4	35	820,8	35	835,2	31
	3600	60	803,7	30	832,9	40	809,5	38	826,6	38	781,3	36	834,6	38	846,0	39
	10800	104	811,4	36	836,3	40	812,3	38	829,8	38	784,4	37	840,4	39	850,2	40
	18000	134	812,7	36	837,8	40	813,4	38	831,1	38	785,8	37	841,8	39	851,8	40
	86400	294	815,9	36	842,3	40	816,5	38	834,2	38	789,5	37	846,0	39	856,9	40
	172800	416	817,6	36	843,3	40	817,5	38	835,7	38	791,1	37	846,8	39	857,7	40
	259200	509	818,3	36	844,1	40	818,1	38	837,4	38	791,7	37	847,7	39	858,5	40

Controlo de teor em água

Tempo na câmara húmida	Massa (g)		Teor em água (%)	
	T 34	T 43	T 34	T 43
0h	752,94	730,76	-	-
2h30min	753,67	731,31	0,10	0,08
6h	754,04	731,71	0,15	0,13
24h	755,16	732,93	0,29	0,30

Tempo no Laboratório	Massa (g)		Teor em água (%)	
	T 34	T 43	T 34	T 43
0h	755,16	732,93	0,29	0,30
24h	754,77	732,51	0,24	0,24
48h	754,75	732,51	0,24	0,24
120h	754,78	732,57	0,24	0,25
144h	754,76	732,54	0,24	0,24
192h	754,72	732,51	0,24	0,24
216h	754,72	732,50	0,24	0,24
288h	754,75	732,53	0,24	0,24

Tempo no interior da estufa	Massa (g)			Teor em água (%)		
	T26	T27	T28	T26	T27	T28
0 h	756,18	749,73	742,78	0,17	0,17	0,23
72 h	754,93	748,49	741,04	-	-	-

Anexo II- Caracterização dos provetes

Controlo de teor em água

Teor em água (%)					
Provete	Período				
	7 h após C.H.	24 h após C.H.	24 h exterior	48 h exterior	120 h exterior
F6.2	0,21	0,40	0,34	0,26	0,26
F10.2	0,25	0,47	0,41	0,31	0,30
F14.2	0,20	0,38	0,33	0,25	0,24
F17.2	0,26	0,48	0,44	0,36	0,35
F33.2	0,24	0,46	0,42	0,33	0,32
F53.2	0,26	0,50	0,43	0,33	0,33

Controlo de massa durante tratamento de consolidação

Provete	Massa (g)				Quantidade de produto consumido (kg/m^2)	Quantidade de produto absorvido (kg/m^2)
	Inicial		Final			
	Provete	recipiente+ produto+pincel	Provete	recipiente+ produto+pincel		
F6.2	349,2	143,5	374,8	109,5	4,4	3,3
F10.2	350,8	153,4	377,2	125,5	3,6	3,4
F14.2	352,8	150,7	376,9	114,1	4,7	3,1
F17.2	371,6	146,3	398,3	109,7	4,7	3,4
F33.2	349,7	152,7	375,0	116,9	4,6	3,2
F53.2	329,9	148,8	353,9	112,5	4,7	3,1

Controlo da massa após o tratamento de consolidação

Data	Massa provete (g)						Humidade relativa (%)	Temperatura (ºC)
	F6.2	F10.2	F14.2	F17.2	F33.2	F53.2		
17.05	374,77	377,22	376,87	-	-	-	60,0	20,2
18.05	372,76	375,68	375,73	398,28	375,02	353,94	62,7	20,0
19.05	370,83	374,04	374,37	396,8	373,52	352,41	60,0	20,1
20.05	369,58	372,21	372,9	395,25	371,85	350,64	69,9	20,9
23.05	365,93	368,86	369,68	391,43	368,04	346,17	50,9	21,0
24.05	364,82	367,48	368,29	390,2	367	345,35	66,7	21,8
25.05	364,05	366,58	367,42	388,66	365,45	344,1	57,2	22,2
27.06	363,11	365,56	366,45	387,25	364,17	343,06	63,1	21,8
30.05	361,97	364,33	365,32	385,91	362,86	341,89	49,7	21,5
31.05	361,78	364,1	365,11	385,64	362,63	341,69	54,1	21,6
01.06	361,57	363,88	364,92	385,38	362,38	341,46	54,4	21,9
02.06	361,18	363,47	364,54	384,95	362	341,1	49,8	24,2
03.06	361,12	363,41	364,47	384,83	361,9	341,01	49,1	23,5
06.06	361,03	363,33	364,34	384,67	361,74	340,93	65,8	23,6
07.06	360,71	363,04	364,07	384,37	361,46	340,61	54,7	23,5
08.06	360,19	362,5	363,61	383,91	361,01	340,12	51,0	25,0
09.06	360,27	362,54	363,63	383,88	360,98	340,18	59,6	24,0
14.06	360,17	362,41	363,5	383,74	360,86	340,09	58,8	23,5
15.06	360,02	362,29	363,39	383,6	360,74	339,97	54,6	22,8
16.06	359,83	362,11	363,22	383,4	360,54	339,78	53,2	22,1
17.06	359,75	362,01	363,12	383,27	360,44	339,7	75,3	22,5
20.06	359,57	361,81	362,94	383,06	360,26	339,53	59,3	24,9
21.06	359,56	361,81	362,96	383,08	360,25	339,53	52,8	25,0
22.06	359,65	361,87	363,02	383,14	360,32	339,63	64,1	24,9
23.06	359,78	361,97	363,09	383,22	360,42	339,69	66,3	22,9
29.06	359,36	361,57	362,71	382,78	359,97	339,33	59,9	23,2
01.07	359,49	361,7	362,81	382,88	360,1	339,43	59,6	23,0

Porosidade, massas volúmicas e teor em água máximo

Provete	Porosidade P (%)	Teor em água máximo (%)
F6.1	21,2	10,3
F10.1	21,6	10,5
F14.1	21	10,1
F17.1	20,9	10,1
F33.1	21,3	10,3
F53.1	20,5	9,9

Provete	Porosidade P (%)	Teor em água máximo (%)
F6.2	17,6	8,2
F10.2	18,1	8,5
F14.2	17,7	8,3
F17.2	17,4	8,1
F33.2	18,3	8,6
F53.2	18,1	8,5

Velocidade de propagação de ultra-sons

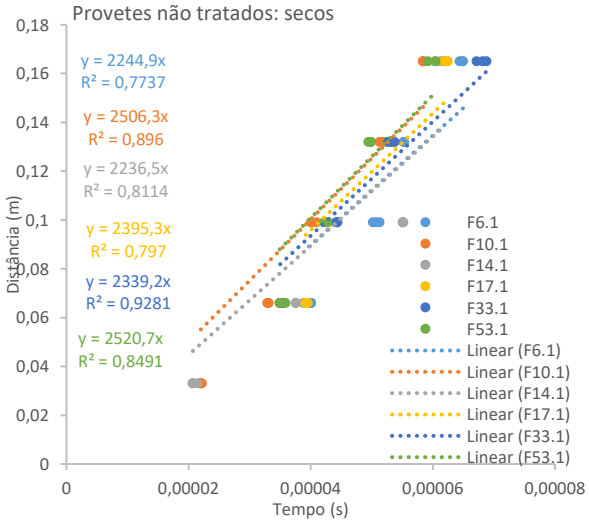
Provetes - Método direto:

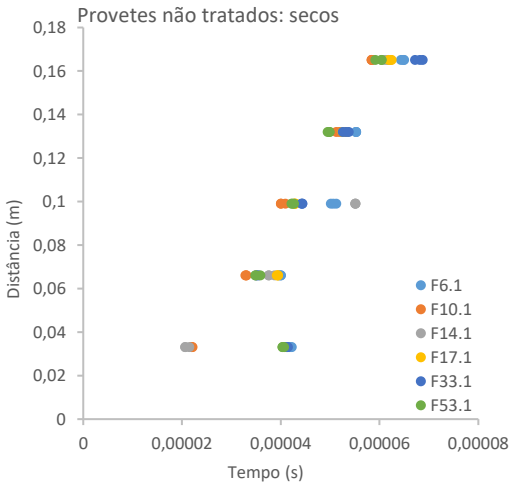
Provete	Velocidade L U.S. (m/s)		Velocidade T1 U.S. (m/s)	
	Provetes secos	Provetes saturados	Provetes secos	Provetes saturados
F6.1	2480	2660	1160	1230
	2460	2620	1160	1210
	2500	2670	1120	1210
F10.1	2520	2580	1150	1160
	2530	2580	1120	1140
	2530	2590	1120	1140
F14.1	2620	2740	1160	1240
	2590	2750	1160	1240
	2640	2750	1160	1240
F17.1	2610	2680	1280	1310
	2580	2680	1310	1300
	2590	2670	1280	1300
F33.1	2420	2530	1200	1280
	2420	2540	1200	1260
	2400	2520	1200	1240
F53.1	2690	2720	1370	1370
	2680	2720	1370	1410
	2680	2730	1370	1390
Provete	Velocidade L U.S. (m/s)		Velocidade T1 U.S. (m/s)	
	Provetes secos	Provetes saturados	Provetes secos	Provetes saturados
F6.2	2760	2770	1280	1300
	2770	2800	1280	1330
	2770	2820	1260	1360
F10.2	2680	2730	1210	1290
	2650	2730	1210	1290
	2650	2730	1210	1290
F14.2	2700	2820	1280	1330
	2700	2850	1330	1330
	2720	2820	1330	1330
F17.2	2740	2790	1330	1400
	2740	2780	1330	1400
	2750	2800	1320	1320
F33.2	2530	2600	1300	1320
	2520	2600	1330	1340
	2550	2590	1280	1330
F53.2	2820	2850	1400	1410
	2800	2880	1380	1410
	2800	2830	1360	1410

Provetes– método indireto:

provete seco	Perfis T1 5 posições				
	P1 dist=3,3cm	P2 dist=6,6 cm	P3 dist=9,9 cm	P4 dist =13,2 cm	P5 dist= 16,5 cm
	tempo µs	tempo µs	tempo µs	tempo µs	tempo µs
F6.1	41,8*	40,1	50,2	55,3	65
	42,1*	40,1	50,7	55,3	64,4
	42,3*	39,7	51,3	55,3	64,9
F10.1	22,2	33,1	40,1	51,3	58,4
	22	33,1	40,1	51,3	58,5
	22	32,9	41	51,9	58,5
F14.1	20,7	37,6	55,1	53,4	61,9
	21,5	37,6	55,2	53,2	61,2
	20,7	38,8	55,2	53,2	61,8
F17.1	40,7*	39,5	42,8	52,7	62,5
	40,8*	39,2	43	52,5	61,9
	41,1*	39,5	43	53,2	62,3
F33.1	41,3*	35,6	44,2	53,8	68,8
	41,3*	35,3	44,4	53,2	68,2
	41,5*	35	44,4	52,6	67,2
F53.1	40,7*	35	42,2	49,9	60,4
	40,4*	35,9	42,4	49,9	60,5
	40,4*	34,9	42,7	49,5	59,2

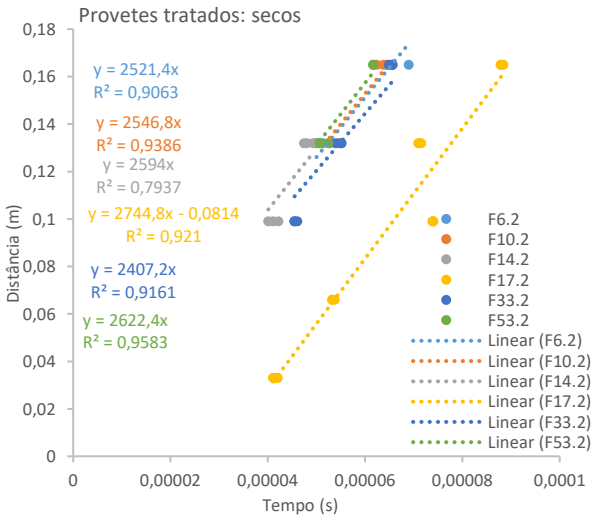
Nota: * para as medidas que não foram consideradas para obtenção do declive da reta linear

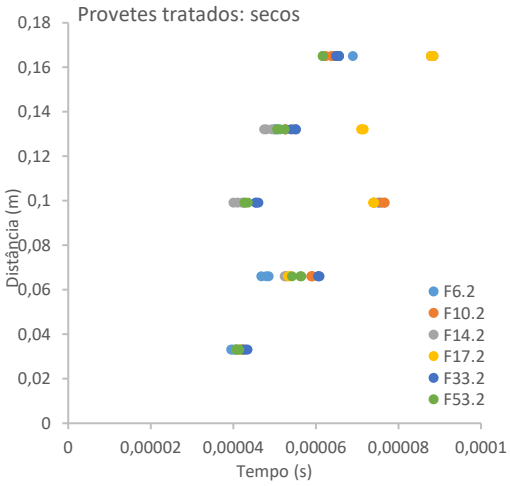




provete seco	Flexão Perfis T1 5 posições				
	P1 dist=3,3cm	P2 dist=6,6 cm	P3 dist=9,9 cm	P4 dist =13,2 cm	P5 dist= 16,5 cm
	tempo µs	tempo µs	tempo µs	tempo µs	tempo µs
F6.2	39,9*	48,6*	74,1*	50,2	69
	40,6*	48,1*	75,5*	50	65,7
	39,5*	46,8*	75,1*	51,3	65,7
F10.2	42,3*	59,2*	75,9*	52,7	64,4
	42,8*	58,9*	76,7*	54,5	62,4
	42,1*	59,1*	76,7*	52,7	63,8
F14.2	40,7*	52,8*	42,2	49,4	88*
	42,2*	52,8*	41,1	48,1	88,5*
	41,8*	52,5*	40,1	47,5	87,9*
F17.2	41,1	53,8	74,1	71,2	88
	41,8	53,3	74,1	71,6	88,5
	42,1	53,3	73,9	71	87,9
F33.2	42,4*	60,9*	45,5	55,2	65,6
	43,1*	60,6*	46,1	55,2	65,6
	43,5*	60,6*	45,5	54	64,9
F53.2	40,7*	56,3*	43,6*	52,5	61,7
	40,9*	56,5*	42,8*	50,7	61,7
	41,5*	54,3*	42,8*	50,7	59,9

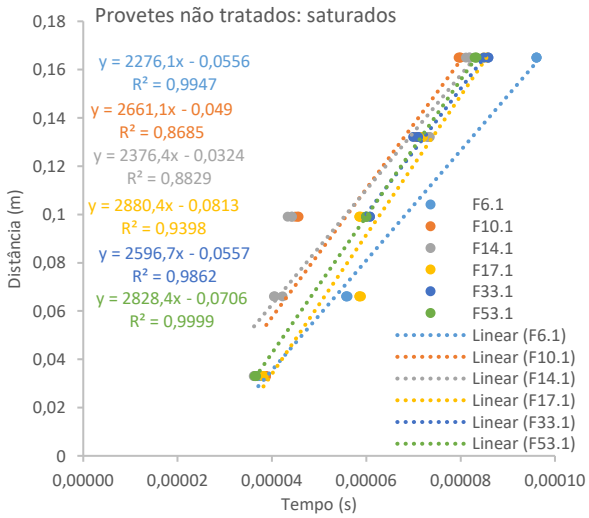
Nota: * para as medidas que não foram consideradas para obtenção do declive da reta linear

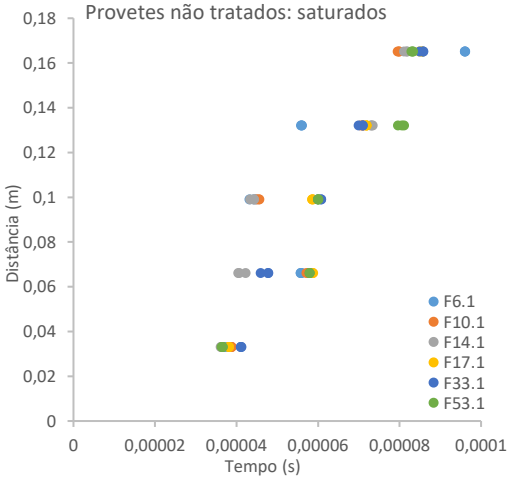




provete saturado	Flexão Perfis T1 5 posições				
	P1 dist=3,3cm	P2 dist=6,6 cm	P3 dist=9,9 cm	P4 dist =13,2 cm	P5 dist= 16,5 cm
	tempo µs	tempo µs	tempo µs	tempo µs	tempo µs
F6.1	37,5	55,8	44,9*	55,9*	96,1
	37,1	55,8	44,3*	56*	96,1
	37,1	56,1	43,2*	56,1*	96,2
F10.1	38,8	57,8*	45,7	70,5	79,6
	38,8	57,2*	45,5	71	79,9
	38,8	58*	45	71,2	80
F14.1	36,2	40,5	43,4	73	81,2
	36,6	40,7	44,3	73,5	81,9
	36,4	42,3	44,3	73,2	81,9
F17.1	38,2	42	58,9	72	85,6
	38,2	42,8	58,6	72	84,9
	38,2	42,4	58,6	71,9	85,7
F33.1	41,3*	47,8*	60,5	70,9	86
	41,1*	47,9*	60,6	70,8	85,7
	41,1*	46*	60,8	71	85,9
F53.1	36,7	58*	60	81,2*	83
	36,6	58*	60,1	80,6*	83,4
	36,4	58*	60,1	79,7*	83,3

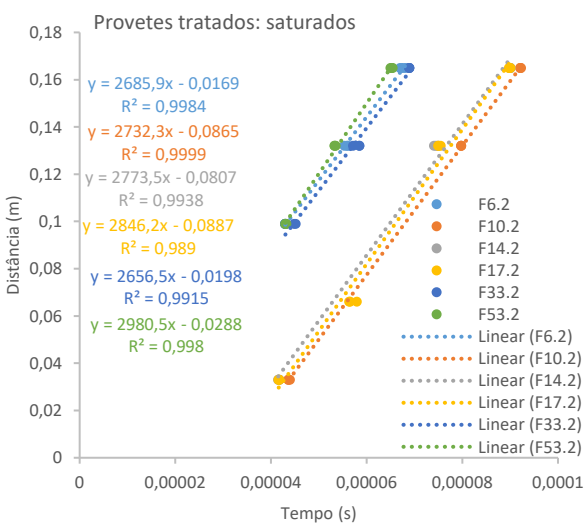
Nota: * para as medidas que não foram consideradas para obtenção do declive da reta linear

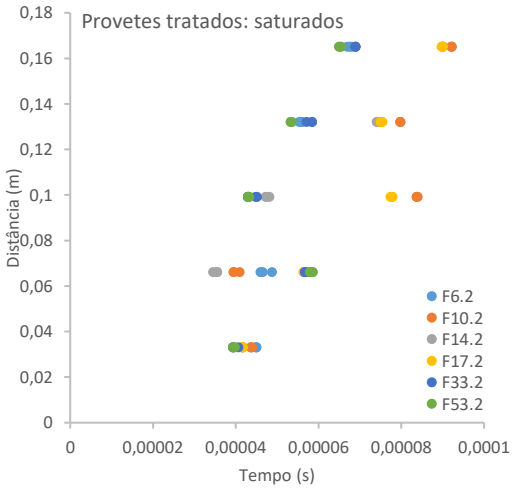




provete saturado	Flexão Perfis T1 5 posições				
	P1 dist=3,3cm	P2 dist=6,6 cm	P3 dist=9,9 cm	P4 dist =13,2 cm	P5 dist= 16,5 cm
	tempo µs	tempo µs	tempo µs	tempo µs	tempo µs
F6.2	45*	46*	43	55,9	67,5
	45*	46,6*	43	55,4	68,1
	45*	48,8*	43	56,1	67
F10.2	44	41*	84*	79,8	92,3
	43,7	39,5*	83,8*	79,8	92,2
	43,7	39,5*	83,8*	79,8	92,1
F14.2	41,5	35,5*	48,2*	74,9	90
	41,8	34,6*	47,3*	74,5	90,1
	41,8	35,6*	47,5*	74,1	90,1
F17.2	41,6	58	77,7*	75	90,1
	41,8	56,6	77,4*	75,5	89,9
	41,7	56,4	78*	75,1	89,8
F33.2	40,7*	57*	45,2	58,5	69
	39,4*	56,8*	44,9	57,2	69
	39,4*	56,8*	43	58,5	69
F53.2	39,4*	58,7*	43,2	53,3	65
	39,8*	57,9*	43,3	53,6	65,5
	39,6*	58,5*	38,8	53,4	65,3

Nota: * para as medidas que não foram consideradas para obtenção do declive da reta linear





WACKER SILRES®

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 (SiO_2·aq.) is formed. The ethanol by product evaporates. Under standard conditions (20°C / 50% 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 or 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 befoe 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/cm³
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