

# Medição Contínua do Teor de Humidade em Materiais de Construção Consolidados com a Técnica Time-Domain Reflectometry

## Continuous Measurement of Moisture Content in Consolidated Building Materials with the Time-Domain Reflectometry Technique

T.S. Freitas<sup>a†</sup>, A.S. Guimarães<sup>a</sup>, S. Roels<sup>b</sup>, V.P. de Freitas<sup>a</sup>, A. Cataldo<sup>c</sup>

<sup>a</sup> *CONSTRUCT - LFC, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal*

<sup>b</sup> *Building Physics and Sustainable Design, Department of Civil Engineering, KU Leuven, Belgium*

<sup>c</sup> *Department of Innovation Engineering, University of Salento, Italy*

<sup>†</sup> *Autor para correspondência: tsf@fe.up.pt*

### RESUMO

A medição do teor de humidade em materiais de construção é fundamental tanto ao nível da prática profissional como ao nível da investigação. Contudo, apesar da grande variedade de técnicas disponíveis para determinar o teor de humidade em materiais de construção, efetuar medições em profundidade, in situ e de forma pouco invasiva ao longo do tempo é ainda um grande desafio. A técnica Time-Domain Reflectometry (TDR) é vulgarmente utilizada para medições do teor de humidade do solo, mas a sua aplicação em materiais de construção é ainda considerada um método inovador e pouco explorado, especialmente no que diz respeito à sua implementação em materiais de baixa porosidade. Os principais obstáculos à corrente utilização da técnica em materiais de construção consolidados são: (1) a dificuldade de garantir um bom contacto entre o sensor TDR e o material; (2) a falta de expressões de calibração adequadas entre a permissividade e o teor de humidade para materiais de construção; (3) a ausência de procedimentos padronizados para obter curvas de calibração adequadas; e (4) a necessidade de desenvolver ferramentas automáticas capazes de processar os dados e fornecer a evolução do teor de humidade ao longo do tempo. Nesta comunicação, apresenta-se uma metodologia capaz de ultrapassar os referidos obstáculos e proporcionar medições bem-sucedidas do teor de humidade com o método TDR. Os resultados obtidos em amostras de pedra calcária e tijolo sólido demonstram que a técnica TDR é uma solução adequada para monitorizar o teor de humidade em materiais de construção, encorajando novos desenvolvimentos que potenciem uma utilização mais generalizada da técnica.

### ABSTRACT

Measuring moisture content in construction materials is extremely important both for professional practice as well as for research. However, despite the wide variety of techniques available for moisture content determination, performing in-depth, in-situ and long-term minor destructive measurements is still a great challenge. The Time-Domain Reflectometry (TDR) technique is commonly used for soil moisture measurements, but its application in construction materials is considered a relatively new method, especially for low-porosity building materials. The major challenges to its current use in hard construction materials are: (1) the difficulty of ensuring good contact between the TDR probe and the material; (2) the lack of appropriate calibration functions between the measured relative permittivity and

### Palavras-chave:

TDR; Teor de Humidade; Monitorização; Materiais de construção; Pedra calcária; Tijolo.

### Keywords:

TDR; Moisture Content; Monitoring; Building materials; Limestone; Brick.

the moisture content for building materials; (3) the absence of standardized procedures to obtain appropriate calibration curves for construction materials; and (4) the need to develop automatic tools capable of processing the data and providing the evolution of moisture content over time. This paper presents a methodology to overcome these obstacles in order to obtain successful moisture content measurements with the TDR technique. The proposed procedure was applied and tested on limestone and solid brick samples. The results obtained show that TDR is a suitable solution for monitoring moisture content on low-porosity building materials, encouraging further developments that may lead to a more widespread use of the technique.

## 1. Introdução

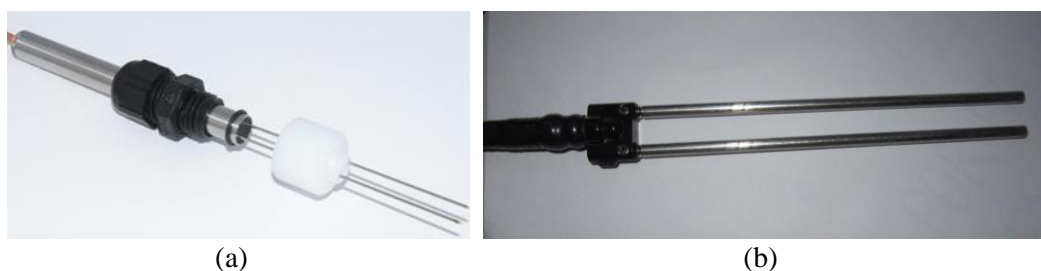
A presença de humidade nos edifícios é um problema comum, recorrente e com consequências sérias para a sua preservação. Por esses motivos, a capacidade de medir o teor de humidade em materiais de construção é extremamente importante, quer para assegurar um correto diagnóstico das patologias associadas à humidade, quer para permitir a adoção de medidas de intervenção adequadas e a avaliação da sua eficácia ao longo do tempo. Contudo, apesar da reconhecida importância deste tema e da grande variedade de técnicas disponíveis para determinar o teor de humidade em materiais de construção, efetuar medições em profundidade, in situ e de forma pouco invasiva ao longo do tempo é ainda um grande desafio. De facto, a maior parte dos métodos correntemente adotados requerem a recolha de amostras de material, o que impede a realização de medições sucessivas e contínuas do teor de humidade no mesmo local. Outra alternativa muito frequente tem por base a realização de análises assentes em medições superficiais do teor de humidade. Neste caso, apesar dos elementos construtivos serem totalmente preservados, é apenas possível obter uma informação parcial do seu teor de humidade, já que as privilegiadas condições de evaporação perto da superfície distorcem, muitas vezes, o verdadeiro estado do seu interior. Para além disso, o equipamento exigido por algumas técnicas de medição do teor de humidade, como o envolvido no método baseado na atenuação de raios  $\gamma$  ou no método de ressonância magnética (NMR), tornam estas soluções mais adequadas para medições em laboratório, dificultando, ou até mesmo impedindo, aplicações in situ [1]. Por todos estes motivos, na prática corrente e também na investigação, abordagens mais pragmáticas e que permitem medir indiretamente o teor de humidade acabam por ser adotadas. Um exemplo, ainda muito popular, passa pela utilização de sensores de humidade relativa, mesmo tendo em conta a sua maior incerteza e desadequação quando se pretende monitorizar valores do teor de humidade no domínio capilar [2]. É, portanto, claro que efetuar medições precisas do teor de humidade em materiais de construção é um assunto complexo e que até ao momento continua a ser objeto de investigação. Neste trabalho, a técnica Time-Domain Reflectometry (TDR) é explorada como uma solução para monitorizar de forma contínua, em profundidade e de modo pouco invasivo o teor de humidade em materiais de construção. O carácter inovador da técnica para este propósito, as dificuldades existentes e a falta de procedimentos padronizados impulsionaram o desenvolvimento de uma metodologia capaz de proporcionar medições bem-sucedidas do teor de humidade com o método TDR. A metodologia proposta foi testada em amostras de pedra calcária e tijolo sólido, tendo os resultados obtidos mostrado que a técnica é adequada para monitorizar o teor de humidade em materiais de construção consolidados.

## 2. A técnica Time-Domain Reflectometry (TDR)

A história da utilização da técnica TDR no domínio da engenharia e das ciências naturais é longa e conta com inúmeras aplicações que se estendem por diferentes campos. De facto, é um método comprovadamente aceite e reconhecido para medir o teor de humidade dos solos [3], para o controlo de qualidade de produtos alimentares [4], na localização de fugas em tubos subterrâneos [5] e na determinação das propriedades dielétricas de líquidos e materiais granulares [4]. Contudo, apesar do profundo conhecimento da técnica TDR como tecnologia de medição, a sua utilização na determinação do teor de humidade em materiais de construção é ainda considerada inovadora,

principalmente no que diz respeito à sua implementação em materiais consolidados e pouco porosos. Em materiais de construção granulares ou de elevada porosidade, como é o caso do betão celular [6], do silicato de cálcio [7], de diferentes tipos de cimentos e argamassas [8] e de algumas variedades de tijolos [9], a técnica TDR já mostrou ser capaz de detetar variações do teor de humidade em ensaios laboratoriais de absorção de água por capilaridade. Apesar dos trabalhos já desenvolvidos, efetuar medições quantitativas e em profundidade do teor de humidade com a técnica TDR é ainda um desafio com poucas respostas e soluções. Os principais entraves a uma utilização mais generalizada da técnica em materiais de construção podem ser resumidos em duas categorias:

- Falta de sensores adequados e dificuldades no processo de instalação: a necessidade de garantir um bom contacto (sem espaços de ar) entre os sensores TDR e o material a monitorizar é fundamental para conseguir medições precisas com a técnica. Contudo, a maioria dos sensores TDR disponíveis no mercado, como o LP/MS [10], o FP/mts [11] ou o CS616 [12], foram desenvolvidos para medições do teor de humidade dos solos e, conseqüentemente, possuem hastes muito finas e longas que dificultam ou inviabilizam a sua instalação em materiais de construção rígidos. Por outro lado, os sensores TDR superficiais, elaborados especificamente para aplicações não invasivas em materiais de construção [13], só permitem medições nas camadas superficiais dos elementos. Assim, para medir o teor de humidade em profundidade, torna-se necessário utilizar sensores, semelhantes aos dos solos, mas com hastes de maior diâmetro e mais robustas que permitam a instalação em materiais de construção consolidados (Figura 1). Alguns autores já exploraram estes sensores protótipo nos seus trabalhos [8], mas, mesmo nestes casos, o desejado contacto perfeito entre o sensor e o material continua a ser um objetivo difícil de alcançar.



**Figura 1** – Diferença entre sensores TDR: (a) sensor TDR comercial desenvolvido para medição do teor de humidade dos solos [10]; (b) sensor TDR, especialmente desenvolvido no âmbito deste trabalho, para aplicação em materiais de construção consolidados.

- Inexistência de curvas de calibração apropriadas e ausência de procedimentos padronizados para as obter: a avaliação quantitativa do teor de humidade com a técnica TDR exige a utilização de curvas de calibração que permitam converter a permissividade dielétrica relativa,  $\epsilon_{app}$ , diretamente fornecida pela técnica, no teor de humidade,  $w$ , do material em estudo, isto é,  $w(\epsilon_{app})$ . De uma forma geral, existem três abordagens para efetuar essa conversão. Uma primeira possibilidade passa pela utilização de funções empíricas de conversão desenvolvidas para os solos, como a de *Topp* (equação 1) e *Malicki* (equação 2) propostas, respetivamente, em 1980 [14] e 1996 [15]:

$$w = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \epsilon_{app} - 5.5 \times 10^{-4} \epsilon_{app}^2 + 4.3 \times 10^{-6} \epsilon_{app}^3 \quad (1)$$

$$w = \frac{\sqrt{\epsilon_{app}} - 0.819 - 0.168\rho - 0.159\rho^2}{7.18 + 1.18\rho} \quad (2)$$

onde  $w$  representa o teor de humidade do material poroso ( $m^3/m^3$ ) e  $\rho$  a massa volúmica do material seco ( $kg/m^3$ ). A fácil aplicação das funções de conversão desenvolvidas para os solos faz

com que continuem a ser frequentemente empregues para medir o teor de humidade em materiais de construção, apesar de alguns autores já terem demonstrado a sua desadequação [16, 17].

Uma segunda possibilidade envolve a utilização de funções semi-empíricas de conversão baseadas em modelos mistos dielétricos. A aplicação destes modelos requer o conhecimento da permissividade dielétrica relativa de cada constituinte que compõem os materiais, tipicamente fase sólida, líquida (água) e gasosa (ar), assim como o conhecimento de outros parâmetros, que não podem ser medidos diretamente, mas têm de ser determinados por calibração empírica do modelo. Existem algumas equações disponíveis capazes de descrever a permissividade dielétrica relativa de todo o material a partir da permissividade dos seus constituintes. Os modelos trifásicos são uma das opções mais amplamente adotadas, sendo o proposto por Roth et al [18] um dos exemplos mais consensuais (equação 3):

$$w = \frac{\varepsilon_{eff}^{\alpha} - \varepsilon_s^{\alpha} + \psi(\varepsilon_s^{\alpha} - \varepsilon_a^{\alpha})}{\varepsilon_w^{\alpha} - \varepsilon_a^{\alpha}} \quad (3)$$

onde  $\varepsilon_{eff}$  representa a permissividade dielétrica relativa de todo o material,  $\varepsilon_s$  a permissividade dielétrica da matriz sólida do material,  $\psi$  a porosidade aberta [ $m^3/m^3$ ],  $\varepsilon_a$  a permissividade dielétrica relativa do ar ( $\varepsilon_a \approx 1$ ),  $\varepsilon_w$  a permissividade dielétrica relativa da água ( $\varepsilon_w \approx 78-82$ , dependendo da temperatura da água), e  $\alpha$  é um parâmetro empírico que tem de ser determinado por uma análise de regressão resultante da comparação entre os valores medidos da permissividade e os valores do teor de humidade conhecidos. Uma desvantagem da utilização destes modelos é que negligenciam a presença de humidade higroscópica o que, ao contrário do que acontece nos solos, pode comprometer a precisão das medições em materiais de construção. Por outro lado, as funções de conversão baseadas em modelos mistos dielétricos, apesar de promissoras, só foram exploradas e testadas numa pequena gama de materiais [19].

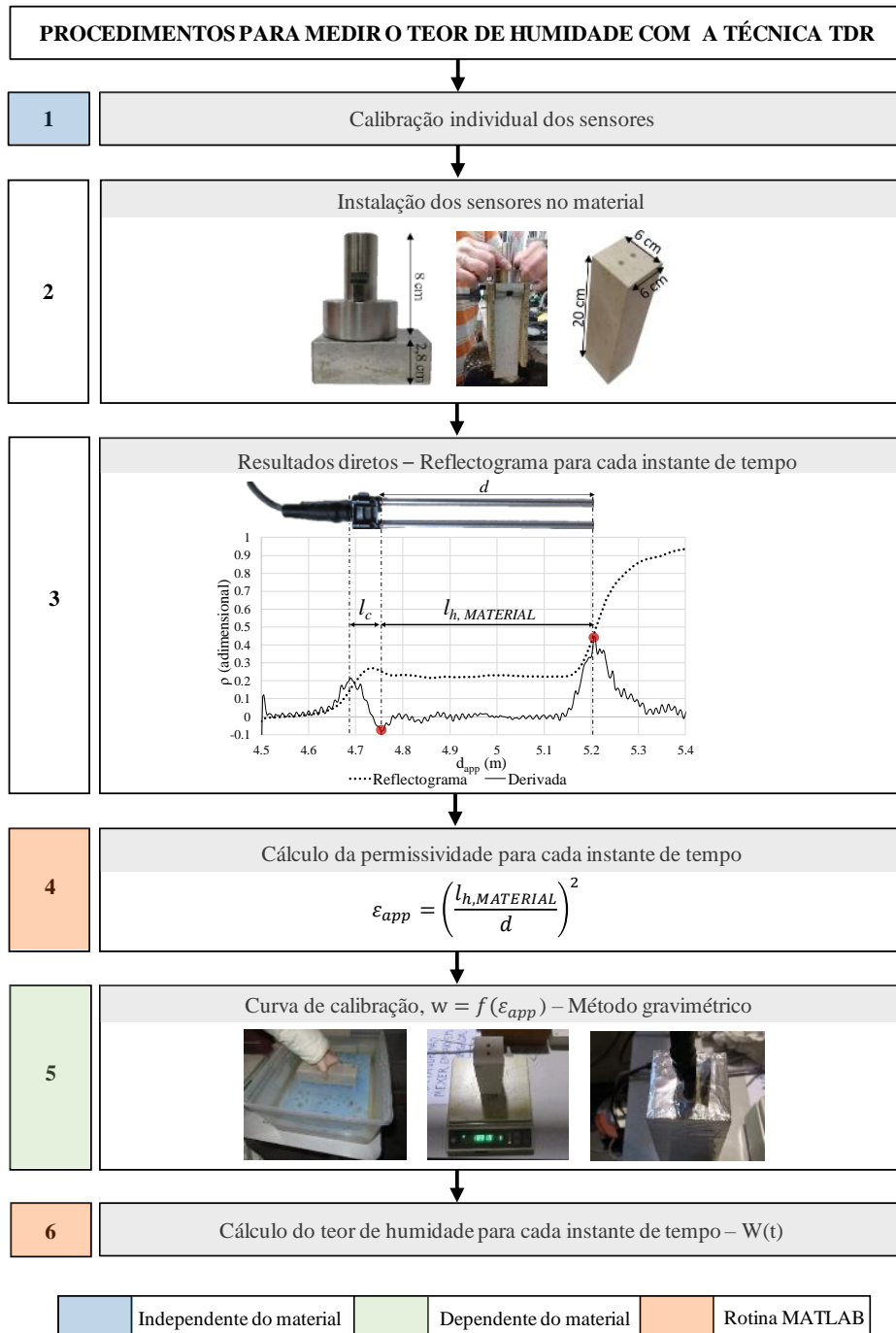
Uma terceira alternativa implica a determinação de uma curva de calibração específica para o material em estudo, através da comparação com um método de referência. O método gravimétrico é de longe o método de referência mais utilizado para obter a correlação entre a permissividade medida com a técnica TDR e o teor de humidade do material. Até ao momento, esta é a solução mais fiável, ainda que morosa para obter curvas de calibração apropriadas. Contudo, há ainda uma falta de clareza e consenso nos procedimentos envolvidos neste processo [20].

Na secção seguinte propõe-se uma forma para ultrapassar as dificuldades mencionadas, bem como se apresenta uma síntese dos procedimentos envolvidos para avaliar e quantificar o teor de humidade ao longo do tempo.

### 3. Metodologia de medição do teor de humidade com a técnica TDR

O princípio de funcionamento de qualquer medição TDR consiste no lançamento de um sinal eletromagnético e no conseqüente estudo da sua propagação ao longo de um sensor inserido no material em estudo. Os fundamentos teóricos necessários à interpretação do sinal, bem como todos os equipamentos exigidos ao funcionamento da técnica já foram detalhadamente descritos em [21]. Na Figura 2 encontra-se uma representação esquemática dos principais passos envolvidos até à obtenção do teor de humidade com a técnica TDR. O primeiro passo consiste em efetuar uma calibração individual de cada sensor utilizado, e tem como objetivo determinar o “comprimento elétrico do sensor”,  $d$ , quando este é colocado no ar, uma vez que essa distância pode ser ligeiramente diferente da medida com uma fita métrica. Esta primeira calibração envolve a realização de medições com os sensores TDR colocados em meios de permissividade dielétrica relativa conhecida e tão diferente quanto possível. Neste trabalho o ar ( $\varepsilon_a \approx 1$ ) e a água destilada a 18 °C ( $\varepsilon_w \approx 81$ ) foram os meios escolhidos para efetuar as medições. A calibração individual é portanto necessária para garantir medições precisas com a técnica, é independente do material em estudo e só precisa de ser realizada uma vez antes da utilização dos sensores. A forma detalhada de efetuar essa primeira calibração encontra-se pormenorizadamente apresentada em [22]. Numa segunda etapa torna-se necessário instalar os sensores TDR no material em estudo. Neste trabalho,

e para assegurar medições em profundidade, desenvolveram-se sensores especialmente adequados à utilização em materiais rígidos, sendo cada um constituído por duas hastes de 6 mm de diâmetro e 185 mm de comprimento. De modo a ultrapassar a dificuldade de garantir um bom contacto entre o sensor e o material, produziu-se uma peça de guia auxiliar metálica a qual permite efetuar furos com o paralelismo, dimensão e espaçamento necessários para que as hastes dos sensores sejam corretamente introduzidas sem a presença de espaços de ar que comprometam a precisão das medições (passo 2).



**Figura 2** – Sequência de procedimentos adotados para medir o teor de humidade em materiais de construção porosos consolidados com a técnica TDR.

Após a instalação dos sensores é possível obter um conjunto de gráficos (reflectogramas) para os vários instantes de tempo em análise (passo 3). A interpretação destes resultados diretos

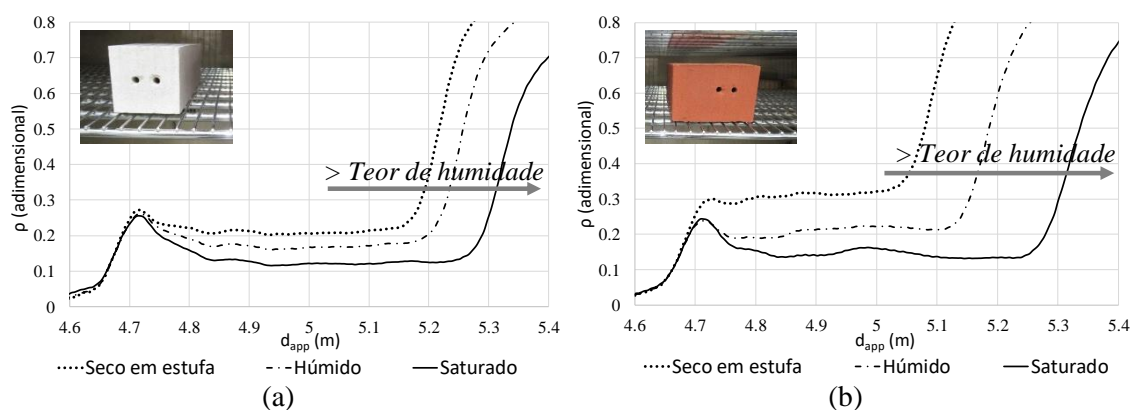
(descritos minuciosamente em [22]) permite, por meio da identificação de mínimos e máximos absolutos, calcular a permissividade dielétrica relativa do material  $\epsilon_{app}$  (passo 4). Numa das finais e mais importantes fases deste processo é recomendável estabelecer uma curva de calibração para o material em estudo (passo 5). Neste trabalho o método gravimétrico foi utilizado como referência. Para isso, várias amostras de material foram imersas em água por diferentes períodos de tempo, seguindo-se de uma medição gravimétrica do seu teor de humidade, com a posterior impermeabilização total das amostras para garantir a redistribuição uniforme do teor de humidade e a validade das medições gravimétricas efetuadas. Uma vez estabelecida a curva de calibração do material, quantificar o seu teor de humidade ao longo do tempo ainda envolve a utilização de ferramentas automáticas (como o MATLAB) que permitam um tratamento célere e em tempo útil dos resultados (passo 6).

#### 4. Resultados e discussão

A metodologia apresentada na Figura 2 é relativamente morosa, sobretudo devido à necessidade de obter uma curva de calibração específica para o material em estudo (passo 5), atendendo à desadequação das funções empíricas e semi-empíricas de conversão desenvolvidas para os solos e discutidas na secção 2. Ainda assim, o procedimento proposto pode ser dividido em duas partes, permitindo avaliar e monitorizar o teor de humidade de uma forma qualitativa ou quantitativa, em função das necessidades e propósitos do problema em estudo.

##### 4.1. Avaliação qualitativa do teor de humidade

Para uma avaliação qualitativa do teor de humidade apenas os primeiros quatro passos da metodologia proposta na Figura 2 têm de ser seguidos. Na figura 3 apresentam-se os reflectogramas obtidos numa amostra de pedra calcária e tijolo sólido, para diferentes teores de humidade, após a aplicação dos passos mencionados. Os resultados mostram que, com os sensores TDR desenvolvidos e o procedimento de instalação proposto, foi possível detetar variações do teor de humidade nos dois materiais. Contudo, a diferença entre os reflectogramas medidos com a pedra calcária seca e saturada (Figura 3 a) é menor do que a diferença registada entre os reflectogramas determinados com o tijolo seco e saturado (Figura 3 b). Este resultado é reforçado pelos valores da permissividade dielétrica relativa medidos nos dois materiais (Tabela 1).



**Figura 3** – Reflectogramas obtidos para diferentes teores de humidade com a técnica TDR em amostras de: (a) pedra calcária e (b) tijolo.

De facto, a gama de valores de permissividade recolhidos para a pedra calcária é menor do que para o tijolo sólido (isto é,  $\Delta\epsilon_{app, pedra} = \epsilon_{app, sat} - \epsilon_{app, seco} = 2,6$  e  $\Delta\epsilon_{app, tijolo} = \epsilon_{app, sat} - \epsilon_{app, seco} = 5,7$ ). Esta diferença deve-se sobretudo à baixa porosidade da pedra calcária face à do tijolo. Os resultados obtidos ajudam, assim, a compreender o motivo da maioria dos trabalhos encontrados na literatura se referirem à aplicação da técnica TDR em materiais de construção bastante porosos (como mencionado na secção 2). Adicionalmente, fundamentam a maior incerteza que existe, entre a comunidade científica, relativamente à utilização da técnica em materiais pouco porosos, por se



julgar que esta é menos sensível para detetar pequenas variações de teor de humidade nestes materiais. Apesar disso, os resultados apresentados na secção 4.2. mostram que a técnica é capaz de ultrapassar essa dificuldade.

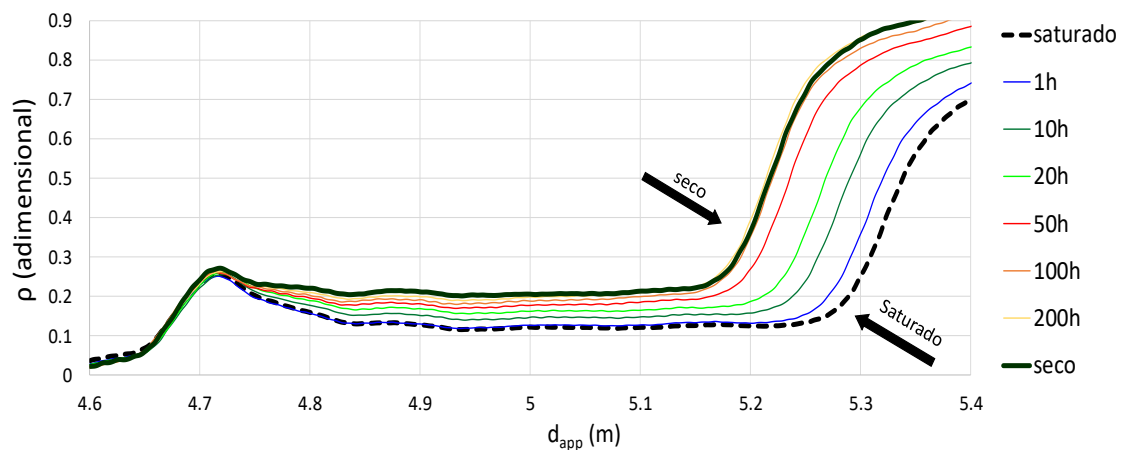
**Tabela 1** – Permissividade dielétrica relativa,  $\epsilon_{app}$ , medida em amostras de pedra calcária e tijolo para diferentes teores de humidade.

|                | Pedra calcária      | Tijolo sólido       |
|----------------|---------------------|---------------------|
|                | $\epsilon_{app}(-)$ | $\epsilon_{app}(-)$ |
| Seco em estufa | 6,1                 | 3,2                 |
| Húmido         | 7,4                 | 5,4                 |
| Saturado       | 8,7                 | 8,9                 |

Este tipo de avaliações conseguem ser efetuadas sem um grande esforço de processamento do sinal, dispensam o moroso processo de calibração, mas apenas permitem efetuar uma análise qualitativa da evolução do teor de humidade. Contudo, para muitas aplicações práticas da engenharia civil a possibilidade de monitorizar variações relativas do teor de humidade ao longo do tempo é suficiente para detetar patologias ou avaliar a eficácia de determinadas soluções de tratamento.

#### 4.2. Avaliação quantitativa do teor de humidade

A metodologia apresentada na Figura 2 foi aplicada integralmente a uma amostra de pedra calcária (20cm x 6cm x 6cm) para monitorizar (de forma quantitativa) a evolução do seu teor de humidade durante um ensaio de secagem à temperatura ambiente ( $T_{média}=21,5^{\circ}\text{C}$  e  $HR_{média}=53,8\%$ ). O ensaio começou com a amostra completamente saturada, tendo-se efetuado um registo contínuo de medições TDR até à sua secagem. Os resultados obtidos apresentam-se organizados na Figura 4 e Figura 5.

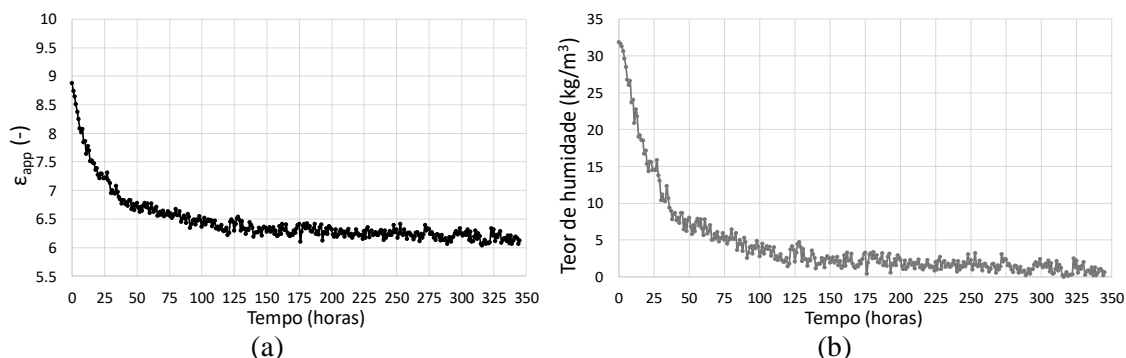


**Figura 4** – Reflectogramas medidos durante o ensaio de secagem de uma amostra de pedra calcária.

Na Figura 4 é possível observar os reflectogramas registados para alguns instantes de tempo do ensaio (passo 3 da Figura 2). As medições refletem uma clara diferença entre os reflectogramas recolhidos quando a amostra estava completamente saturada e seca, bem como uma progressão gradual (a tender para o reflectograma característico do estado seco) durante o processo de secagem. Deste modo, o ensaio efetuado demonstrou que a técnica TDR é sensível para detetar pequenas variações do teor de humidade num material muito pouco poroso como é a pedra calcária em estudo (porosidade aproximadamente igual a 3%).

Na Figura 5 a) apresenta-se a evolução dos valores da permissividade dielétrica relativa,  $\epsilon_{app}$ , calculados ao longo do ensaio. A permissividade é tanto maior quanto maior for o teor de

humidade do material em estudo. Após efetuar a calibração pelo método gravimétrico, foi possível converter os valores de  $\epsilon_{app}$  no teor de humidade da pedra calcária (Figura 5 b).



**Figura 5** – Resultados obtidos durante a secagem de uma amostra de pedra calcária: (a) evolução da permissividade dielétrica relativa,  $\epsilon_{app}$ , durante o período de secagem; (b) evolução do teor de humidade,  $w(\text{kg}/\text{m}^3)$ , durante o período de secagem.

Os resultados obtidos são compatíveis com o expectável para um processo de secagem, tendo-se, portanto, demonstrado que a metodologia descrita na Figura 2 é adequada para avaliar quantitativamente o teor de humidade ao longo do tempo em materiais de construção consolidados.

## 5. Conclusões

Monitorizar o teor de humidade em materiais de construção é uma tarefa complexa e que é ainda objeto de investigação por parte da comunidade científica. A técnica Time-Domain Reflectometry (TDR) é amplamente utilizada em diversos domínios, nomeadamente na medição do teor de humidade dos solos, mas a sua aplicação em materiais de construção consolidados é ainda pouco frequente e inovadora. A falta de sensores TDR adequados, as dificuldades na sua instalação, a inexistência de curvas de calibração apropriadas e a necessidade de desenvolver ferramentas automáticas para processamento do sinal são considerados os maiores obstáculos à utilização da técnica em materiais de construção. Neste trabalho foi proposta uma metodologia composta por seis etapas principais, com o intuito de clarificar sinteticamente como ultrapassar os referidos obstáculos e proporcionar avaliações bem-sucedidas do teor de humidade, quer de forma qualitativa quer quantitativa, com o método TDR (Figura 2). Ao contrário dos materiais altamente porosos onde a técnica já foi testada, a metodologia desenvolvida foi aplicada em amostras de pedra calcária e tijolo sólido. Os resultados obtidos mostram que, com a metodologia proposta, é possível monitorizar variações relativas do teor de humidade ao longo do tempo, de uma forma relativamente simples, e que é muitas vezes suficiente para algumas aplicações práticas da engenharia civil (Figura 3). Adicionalmente, o ensaio de secagem efetuado numa amostra de pedra calcária mostrou que a técnica é capaz de medir de forma contínua o teor de humidade neste material, apesar da sua baixa porosidade (Figura 4 e Figura 5). No futuro, pretende-se aplicar a sequência de procedimentos propostos para monitorizar o teor de humidade em paredes à escala real, bem como encorajar novos desenvolvimentos que potenciem uma utilização mais generalizada da técnica e a tornem mais apelativa para a prática profissional.

## Agradecimentos

A primeira autora agradece o apoio financeiro concedido pela FCT, por intermédio da bolsa de doutoramento SFRH/BD/121549/2016.

Este trabalho foi apoiado financeiramente por: Financiamento Base – UIDB/04708/2020 e Financiamento Programático – UIDP/04708/2020 da Unidade de Investigação CONSTRUCT – Instituto de I&D em Estruturas e Construções, financiada por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC); Projeto CLING – Orientações para o projeto de edifícios baseadas nas



alterações climáticas – financiado por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC), no âmbito do projeto PTDC/EME-REN/3460/2021.

## Referências

- [1] S. E. Pinchin, Techniques for monitoring moisture in walls, *Studies in Conservation*, 53 (2008) 33-45.
- [2] M. C. Phillipson et al., Moisture measurement in building materials: An overview of current methods and new approaches, *Building Services Engineering Research and Technology*, 28 (2007) 303-316. doi: 10.1177/0143624407084184.
- [3] A. Cataldo, G. Cannazza, E. De Benedetto, L. Tarricone, M. Cipressa, Metrological assessment of TDR performance for moisture evaluation in granular materials, *Measurement*, 42 (2009) 254-263, 2009. doi: 10.1016/j.measurement.2008.06.006.
- [4] H. He et al., A review of time domain reflectometry (TDR) applications in porous media, *Advances in Agronomy*, 168 (2021) 83-155. doi: 10.1016/bs.agron.2021.02.003.
- [5] A. Scheuermann, C. Huebner, S. Schlaeger, N. Wagner, R. Becker, A. Bieberstein, Spatial time domain reflectometry and its application for the measurement of water content distributions along flat ribbon cables in a full-scale levee model, *Water Resources Research*, 46 (2009). doi: 10.1029/2008WR007073.
- [6] L. Fiala, M. Pavlíková, Z. Pavlík, Application of TDR method for moisture profiles measurement in cellular concrete, In 1st International Doctoral Conference and Advanced Materials, 23-25 July, 11-15, 2014. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.982.11.
- [7] Z. Suchorab, Monitoring of capillary rise phenomenon in calcium silicate board using the surface TDR probes set, *Proceedings of ECOpole*, 8 (2014) 82-86. doi: 10.2429/proc.2014.8(1)010.
- [8] A. Cataldo, Egidio De Benedetto, Giuseppe Cannazza, E. Piuze, E. Pittella, Moisture content monitoring of construction materials: From in-line production through on-site applications, In 2017 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), Torino, Italy, 22-25 May, 1-5, 2017. doi: 10.1109/I2MTC.2017.7969762.
- [9] L. Mollo, R. Greco, Moisture measurements in masonry materials by time domain reflectometry, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23 (2011) 441-444. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000188.
- [10] Laboratory TDR probe. Easy-Test. <https://www.e-test.eu/laboratory-tdr-probe.html> (acesso em 04 julho 2022).
- [11] Field TDR probe. East-Test. <https://www.e-test.eu/field-tdr-probe.html> (acesso em 04 julho 2022).
- [12] CS616: 30 cm Water content reflectometer. Campbell Scientific. <https://www.campbellsci.com.br/cs616-reflectometer> (acesso em 04 julho 2022).
- [13] H. Sobczuk, Polish Patent No. 198492 B1, 30 June 2008.
- [14] G. C. Topp, J. L. Davis, A. P. Annan, Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines, *Water resources research*, 16 (1980) 574-582.
- [15] M. A. Malicki, R. Plagge, C. H. Roth, Improving the calibration of dielectric TDR soil moisture determination taking into account the solid soil, *European Journal of Soil Science*, 47 (1996) 357-366. doi: 10.1111/j.1365-2389.1996.tb01409.x.
- [16] Z. Pavlík, M. Pavlíková, L. Fiala, R. Černý, H. Sobczuk, Z. Suchorab, Application of time-domain reflectometry method for measuring moisture content in porous building materials, *Trends in Applied Sciences Research*, 2 (2007) 188-200.
- [17] M. C. Phillipson, P. H. Baker, M. Davies, Z. Ye, G. H. Galbraith, R. C. McLean, Suitability of time domain reflectometry for monitoring moisture in building materials, *Building Services Engineering Research and Technology*, 29 (2008) 261-272. doi: 10.1177/0143624408092423.
- [18] K. Roth, R. Schulin, H. Flühler, W. Attinger, Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach, *Water Resources Research*, 26 (1990) 2267-2273. doi: 10.1029/WR026i010p02267.
- [19] Z. Pavlík, L. Fiala, and R. Černý, Analysis of dielectric mixing models for the moisture

- assessment of porous building materials, *Pollack Periodica*, 4 (2009) 79-88. doi: 10.1556/Pollack.4.2009.2.8.
- [20] Z. Pavlík, J. Mihulka, L. Fiala, and R. Černý, Application of Time-Domain Reflectometry for measurement of moisture profiles in a drying experiment, *International Journal of Thermophysics*, 33 (2012) 1661-1673. doi: 10.1007/s10765-011-1020-0.
- [21] T. Stingl Freitas, A. Sofia Guimarães, S. Roels, V. Peixoto De Freitas, A. Cataldo, Time Domain Reflectometry (TDR) technique - A solution to monitor moisture content in construction materials, in *E3S Web of Conferences*, 172 (2020) doi: 10.1051/e3sconf/202017217001.
- [22] T. S. Freitas, A. S. Guimarães, S. Roels, V. P. de Freitas, A. Cataldo, Is the time-domain reflectometry (TDR) technique suitable for moisture content measurement in low-porosity building materials?, *Sustainability (Switzerland)*, 12 (2020) 7855. doi: 10.3390/SU12197855.