



FISSURAÇÃO DE ARGAMASSAS DEVIDO À RETRAÇÃO RESTRINGIDA IMPOSTA PELO SUPORTE: INFLUÊNCIA DE RESÍDUOS DE FIBRAS NATURAIS

Cinthia Maia Pederneiras^{abc}; Maria do Rosário Veiga^a; Jorge de Brito^c

^a Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, Portugal. cpederneiras@c5lab.pt; rveiga@lnec.pt

^b c5Lab - Sustainable Construction Materials Association, Rua Central Park 6, 2795-242 Linda-a-Velha, Lisboa, Portugal.

^c CERIS - Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal. jb@civil.ist.utl.pt

RESUMO

A fissuração de um reboco pode ocorrer devido a diversos fatores, sendo uma anomalia que pode afetar gravemente a sua estanqueidade e, conseqüentemente, a sua durabilidade. Uma das principais causas do aparecimento de fissuras nos revestimentos é a ocorrência de retração restringida. As argamassas de revestimento podem sofrer variações dimensionais por retração durante o seu processo de endurecimento. Como estão aderentes a um elemento em geral mais rígido, estas deformações podem ser impedidas ou limitadas pelo suporte, o que origina o desenvolvimento de tensões de tração sobre as argamassas. Caso as argamassas não sejam capazes de acomodar estas tensões, este fenómeno pode gerar fissuras no reboco.

Este estudo tem como objetivo avaliar a suscetibilidade à fissuração devida à retração restringida de argamassas de revestimento e a eficácia da incorporação de fibras recicladas no controlo desse tipo de fissuração. Para isso, foi utilizado um modelo de avaliação experimental desenvolvido e validado no Laboratório Nacional de Engenharia Civil em estudos anteriores. O método experimental adotado para essa avaliação consiste em restringir a deformação da argamassa, desde a moldagem até à estabilização, medindo e registando as tensões de tração induzidas. O ensaio permite quantificar a capacidade de relaxação da argamassa através da curva de força desenvolvida ao longo do tempo, durante o ensaio de retração restringida. Numa segunda fase, o dispositivo permite libertar a deformação da argamassa e realizar um ensaio de tração pura. Nessa fase, é analisada a energia de rotura por tração assim como as curvas de força-deslocamento durante o ensaio. Este ensaio permite avaliar a tendência à fissuração das argamassas de revestimento por retração restringida e medir as tensões induzidas em rebocos e transmitidos ao suporte.

Um dos métodos para controlar a fissuração provocada por este fenómeno consiste na incorporação de redes ou fibras disseminadas na pasta. No presente estudo, foram selecionadas argamassas à base de cimento, sem e com incorporação de fibras naturais recicladas. Os resultados obtidos mostraram que as argamassas com fibras naturais apresentaram uma menor suscetibilidade à fissuração, já que as fibras podem evitar ou retardar o crescimento das fissuras através do seu mecanismo de ponte. Esta melhoria de comportamento está também relacionada com a compatibilidade da fibra com a matriz da argamassa.

PALAVRAS-CHAVE

Argamassa; Fissuração; Retração restringida; Fibras naturais.



1 INTRODUÇÃO

As argamassas de revestimento têm como principal função proteger a parede de alvenaria e elementos de betão contra ações externas. Além da funcionalidade estética de acabamento, os revestimentos também têm de assegurar a integridade e durabilidade das estruturas construídas. Para isso, os revestimentos devem ter uma resistência à fissuração adequada para suportar as tensões de tração induzidas principalmente devido à retração restrita. Geralmente, as argamassas são aplicadas num suporte rígido o que dificulta a sua deformação, produzindo assim tensões de tração. A retração restringida das argamassas é considerada uma das principais causas de fissuração. A resistência à fissuração está correlacionada com a capacidade de deformação da argamassa e sua capacidade de absorver tensões. As argamassas devem dissipar as tensões impostas, reduzindo a suscetibilidade à fissuração.

A avaliação da suscetibilidade à fissuração é muito complexa, uma vez que depende de vários fatores que se alteram ao longo do tempo, ou seja, o desenvolvimento da retração restringida, a correlação entre o módulo de elasticidade e a resistência à tração e a capacidade da argamassa para dissipar por relaxação as tensões geradas. Existem alguns ensaios para avaliar a magnitude das forças induzidas pela retração restringida: ensaio uniaxial restringido (Hong et al., 2023; Tan et al., 2024), ensaio de laje restringida (Baloch et al., 2023; Guo & Wang, 2023), ensaio de viga restringida ou ensaio de anel restringido (Afroz et al., 2023; Beushausen & Arito, 2018; Yang et al., 2019). O ensaio de anel restringido tem sido mais amplamente adotado do que os restantes, devido ao seu custo relativamente baixo, à sua capacidade de proporcionar uma restrição final uniforme, à sua simplicidade e versatilidade. Este teste mede os efeitos das variações dimensionais nas tensões de tração induzidas, o que pode indicar o potencial de fissuração da argamassa em condições de retração. No entanto, existem algumas desvantagens relativamente a este ensaio: por ser considerado um ensaio passivo, as tensões geradas pela restrição do anel podem ser incapazes de provocar a fissuração das argamassas de reboco. Além disso, o ensaio do anel apenas mede a redução de dimensões e não é utilizado em condições de expansão (Bentz et al., 2013). Assim, com o objetivo de obter um modelo preciso e eficiente para medir a retração restringida, Veiga (Veiga, 2000; Veiga et al., 2007) desenvolveu um método experimental que permite registar as forças geradas ao longo do tempo por retração restringida e também determinar a resistência à tração da argamassa. Através deste ensaio, é possível relacionar a energia de fratura com a tendência à fissuração ao longo do tempo. O presente estudo utilizou este modelo experimental inovador para medir a retração restringida das argamassas.

Neste estudo, aplicou-se este novo modelo experimental para investigar argamassas cimentícias (1:4) reforçadas com fibras naturais com teores de incorporação de 10% do volume total da argamassa. As fibras são resíduos de diferentes indústrias portuguesas e foram adicionadas com comprimento de 30 mm. A caracterização destas fibras foi publicada em trabalhos anteriores (Pederneiras et al., 2019, 2021). As fibras de lã são provenientes da tosquia das ovelhas, da fração que não foi utilizada no fabrico têxtil. As fibras de coco são resíduos do fabrico de painéis de isolamento. As fibras de linho são resíduos agrícolas, também da fração não utilizável na indústria têxtil.

2 DADOS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

Na produção das argamassas, foi utilizado o cimento Portland (CEM II/B-L 32.5 N, de acordo com a norma EN 197-1). O agregado fino utilizado foi areia silicosa. As fibras recicladas utilizadas são apresentadas na Figura 1.



Figura 1 - Fibras recicladas utilizadas no estudo

2.2 MÉTODOS

Neste estudo, foram realizados dois ensaios para determinar a retração das argamassas. Um deles é a variação dimensional livre após o endurecimento (CSTB Cahier 2669-4), que mede a retração sem restrições. O outro ensaio é um modelo experimental para avaliar a suscetibilidade à fissuração de argamassas reforçadas com fibras por retração restringida, desenvolvido por Veiga (Veiga, 1998).

O ensaio de retração livre avalia a retração livre em diferentes idades. O ensaio consiste em medir o comprimento inicial do provete prismático, logo a seguir à desmoldagem, pelo defletómetro com o eixo longitudinal na posição vertical, e depois repetir a medição periodicamente, para determinar as variações. Estas medições foram registadas às idades de 2, 3, 6, 7, 10, 14, 21, 28, 35, 41, 50, 56, 70, 80 e 90 dias. Foram utilizadas três amostras por argamassa. A variação dimensional é dada pela Equação 1, em que ε_i é a variação específica do comprimento do provete ($i = 1, 2, 3, \dots, n$), ΔL_i a variação do comprimento entre o comprimento inicial e final do provete, e L_i o comprimento inicial do provete.

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta L_i}{L_i} \times 100 \quad \text{Equação 1}$$

O ensaio de retração restringida mede ao longo do tempo a tensão induzida devido à retração restringida desde a moldagem, considerando a capacidade de relaxação da argamassa. Quando não se verifica fissuração durante o ensaio de retração restringida, é realizado o ensaio de tração com o mesmo provete, produzindo uma rotura por tração. O equipamento permite registar as curvas força-deslocamento durante o ensaio de tração. A energia de rotura da argamassa é também registada. O equipamento é constituído por uma estrutura rígida e dois bordos de dimensões alargadas (Figura 2). Um dos bordos está fixo à estrutura e o outro tem um movimento longitudinal livre. Durante o ensaio de retração restringida, um transdutor de força para o deslocamento enquanto regista a força gerada pela restrição da retração.

O ensaio baseia-se na condição do aparecimento da primeira fissura, denominada Coeficiente de Segurança para a Abertura da primeira fissura, definido como $S = R_t/F_{rmax}$. Este coeficiente é obtido pela relação entre a resistência à tração da argamassa (R_t), determinada pelo ensaio de tração, e a força máxima gerada pela retração restringida (F_{rmax}), medida durante o ensaio de retração restringida. Quando $S < 1$ abre-se a primeira fissura logo durante o ensaio de retração restringida. Caso contrário, o mesmo provete é depois sujeito ao ensaio de tração e obtém-se um R_t superior ou igual a F_{rmax} , portanto $S \geq 1$. Outro critério que pode ser calculado a partir deste ensaio é o Coeficiente de Resistência à Evolução da Fissuração, que se define como $R = G/F_{rmax}$, em que G representa a energia de rotura e F_{rmax} a força máxima provocada pela retração restringida. Quando este coeficiente é elevado, é necessária uma maior quantidade de energia para o processo de evolução das fissuras na argamassa, diminuindo a probabilidade de fissuração.

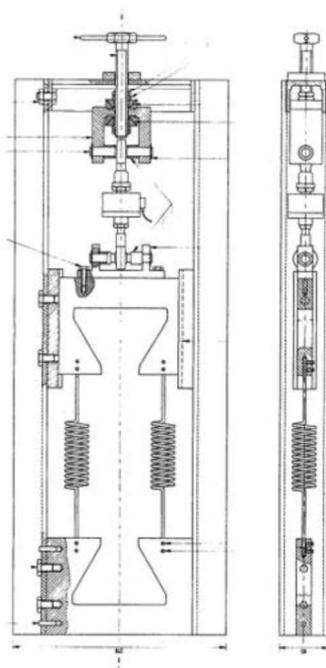


Figura 2 - Ilustração do equipamento usado para o ensaio de retração restringida

O procedimento adotado para a retração restringida consiste na moldagem da argamassa no equipamento. Os provetes são moldados na posição horizontal sobre placas de acrílico com óleo lubrificante, com 20 mm de espessura e mantêm-se em condições de temperatura de $23^{\circ} \pm 2$ °C e humidade relativa de $50\% \pm 5\%$.

As estruturas de suporte dos transdutores de deslocamento são aparafusadas e inicia-se as medições. Cerca de duas horas depois, quando a presa da argamassa o permite, são extraídos os varões laterais. Passadas 24 horas da moldagem (período suficiente para que o ponto de presa assegure a rigidez necessária), o aparelho é colocado na posição vertical, sendo depois retirada a base acrílica. O registo das tensões é realizado até à idade para o ensaio de resistência à tração, pré-definida em 14 dias, de acordo com estudos anteriores (Veiga, 1998; Veiga et al, 2007).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Retração restringida

Os resultados do ensaio de retração restringida são apresentados na Figura 3. As curvas de força *versus* tempo obtidas no ensaio mostram a força devido à retração restringida (F_r) ao longo do tempo. Após o ensaio de retração restringida, não foram encontradas fissuras em nenhum dos provetes. Em geral, as curvas não apresentam tensões durante as primeiras 24 horas; durante este período, as forças devidas à retração restringida são praticamente nulas, uma vez que a argamassa é muito deformável. Cerca de 4 dias (96 horas) após a moldagem, nota-se um rápido aumento da força. Após este período, as tensões parecem praticamente estabilizadas. Aos 14 dias (336 horas) termina-se os ensaios de retração restringida e realiza-se os ensaios de tração. A carga de tração aplicada provoca um aumento instantâneo da força até se atingir a rotura.

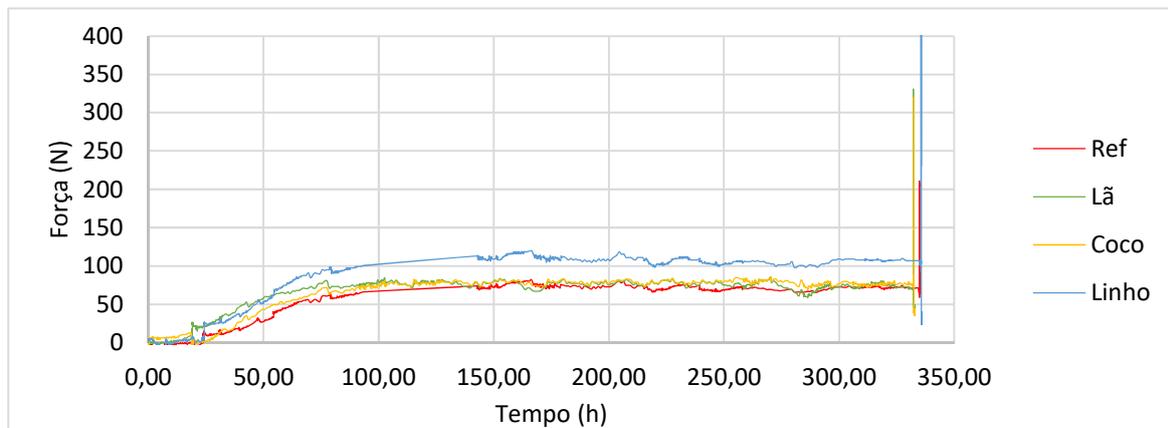


Figure 3 - Média das curvas obtidas no ensaio de retração restringida para argamassas

A Figura 4 mostra o provete da argamassa de referência após o ensaio de tração. Neste ensaio, o parafuso deve ser movido lentamente, produzindo uma força de tração no provete até aparecer a primeira fissura. O sistema continua a medir e a registar forças e deslocamentos. Após a abertura da primeira fissura, o movimento lento do parafuso é ajustado até que a resistência seja totalmente eliminada. A resistência à tração é dada pela força máxima atingida no ensaio de tração e ocorre geralmente imediatamente antes da abertura da primeira fissura.

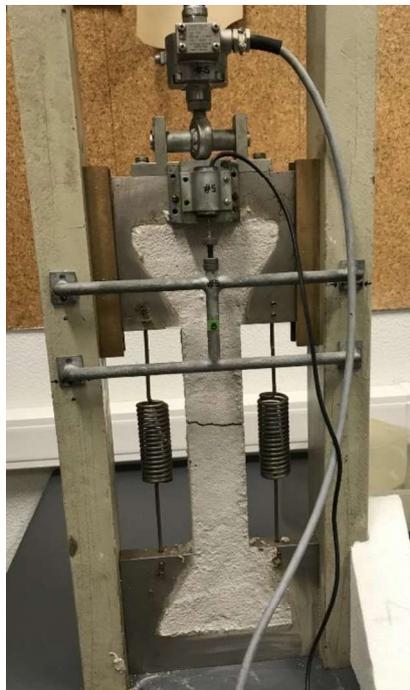


Figure 4 - Provete da argamassa de referência após ensaio de tração

Na Figura 5, apresenta-se as curvas força *versus* deslocamento obtidas nos ensaios de tração aos 14 dias para as quatro argamassas de cimento ensaiadas, realizados imediatamente após os ensaios de retração restringida. As argamassas reforçadas com fibras tiveram picos máximos superiores aos da argamassa de referência. Assim, conclui-se que a adição de fibras aumentou a resistência à tração das



argamassas para todas as fibras incorporadas. A partir destas curvas, é também possível calcular a energia de rotura das argamassas e avaliar a sua tenacidade. A energia de rotura é calculada pela área sob as curvas obtidas no ensaio. Verificou-se que as argamassas com fibras continuam a resistir a uma carga residual, mesmo depois de atingida a força máxima, o que não se observa para a argamassa de referência. Verifica-se também que as argamassas com fibras apresentam uma maior deformação na rotura, uma vez que o pico de resistência ocorre para um valor de deslocamento mais elevado. As curvas força / deslocamento das argamassas com fibras apresentaram maior absorção de energia tanto até à rotura como após a rotura, como também se apresenta na Tabela 1 (valor G). Estes valores representam um modo de rotura mais dúctil.

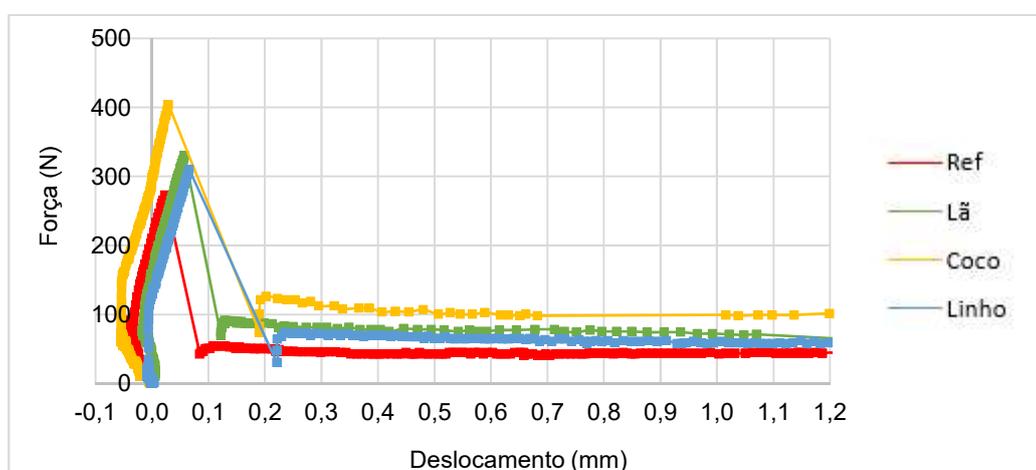


Figure 5 - Curvas de força *versus* deslocamento das argamassas

Os coeficientes do ensaio de retração restringida são apresentados no Tabela 1. Verificou-se que a incorporação de fibras aumentou a resistência à fissuração das argamassas. A argamassa de referência foi classificada como tendo uma suscetibilidade moderada à fissuração, devido ao parâmetro "R" - coeficiente de resistência à evolução da fissuração, que foi inferior ao das argamassas reforçadas com fibras, e também ao valor de S, que é inferior ao das argamassas reforçadas com fibras. De um modo geral, verifica-se que quer a resistência à tração quer a ductilidade das argamassas aumentam com a adição de fibras.

Tabela 1 - Coeficientes do ensaio de retração restringida

Argamassas	F_{rmax} (N)	Desvio- padrão	R_t (N)	Desvio- padrão	G (N.mm)	Desvio- padrão	S	R	Classificação quanto à suscetibilidade à fissuração
Referência	81.1	17.5	298.2	58.5	69.7	15.1	3.7	0.9	MODERADO
Lã	82.5	29.8	310.2	68.9	92.0	54.2	3.8	1.1	BAIXO
Coco	84.7	43.7	323.2	77.9	87.4	21.5	3.8	1.0	BAIXO
Linho	76.5	12.8	337.3	10.1	87.8	29.7	4.4	1.1	BAIXO

De acordo com a classificação, a incorporação de linho destacou-se como a argamassa menos suscetível à fissuração, apresentando os valores mais elevados em ambos os critérios.

3.2. Retração livre

A retração livre das argamassas foi analisada pela variação dimensional após o endurecimento. Os



provetes foram medidos ao longo do tempo, desde a desmoldagem (às 24 h) até aos 90 dias, e os resultados são apresentados na Figura 6. A argamassa com fibras de linho apresentou um comportamento semelhante na retração livre em comparação com a argamassa de referência. Por outro lado, a incorporação de fibras de lã e de coco aumentou a retração livre da argamassa. A maior variação dimensional dos provetes ocorreu nos primeiros dias de idade e, a partir daí, apenas houve ligeiras oscilações, essencialmente provocadas por variações de humidade ou de temperatura. Assim, a incorporação destas fibras foi responsável por um aumento muito significativo da retração livre das argamassas. No entanto, pelos resultados do ensaio de retração restringida, estas argamassas são mais deformáveis do que a argamassa de referência, podendo dissipar as tensões devidas à retração. Dessa forma, o modelo experimental adotado para medir a retração restringida é mais completo do que apenas a medição da retração livre, permitindo considerar a influência de outros parâmetros, como a deformabilidade e a relaxação.

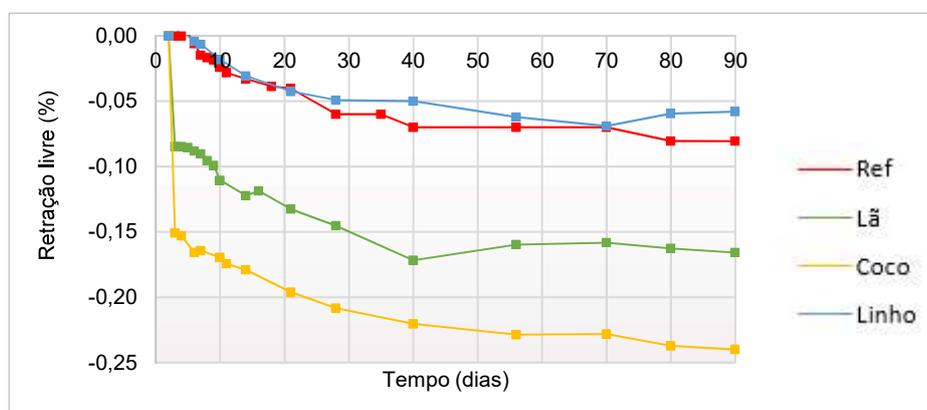


Figure 6 - Resultados do ensaio de retração livre das argamassas

Assim, faz-se de notar que o ensaio de variação dimensional não pode prever por si só a suscetibilidade à fissuração das argamassas, enquanto o modelo adotado permite avaliar o efeito da retração restringida possibilitando a obtenção de resultados mais precisos na avaliação da suscetibilidade à fissuração. O facto de as tensões induzidas pela retração restringida serem muito inferiores às correspondentes a uma deformação imposta da mesma magnitude aplicada instantaneamente mostra que elas dependem de parâmetros relacionados com a capacidade de relaxação da argamassa, que podem ser avaliados no ensaio de retração restringida.

4 CONCLUSÕES

Através da análise dos resultados, foi possível concluir que a adição de fibras naturais aumentou a resistência à fissuração das argamassas.

Relativamente ao ensaio de retração restringida, verificou-se que as argamassas de cimento reforçadas com fibras apresentaram uma baixa suscetibilidade à fissuração, enquanto a da argamassa de referência foi classificada como moderada, ainda que algumas das argamassas reforçadas com fibras tenham apresentado maior retração livre. De acordo com o coeficiente de resistência à evolução da fissuração, as argamassas reforçadas com fibras apresentaram valores mais elevados, o que indica que as fibras atuam como um mecanismo de ligação para impedir ou retardar o crescimento das fissuras. Estas argamassas apresentaram uma energia de rotura superior à da argamassa de referência, suportando assim as tensões impostas.



A partir dos resultados da retração livre, verifica-se que, nas primeiras idades, as argamassas modificadas que apresentaram maior variação dimensional foram, na sua maioria, as que obtiveram maiores forças geradas pela restrição de deslocamentos. Para uma análise mais aprofundada do comportamento à fissuração destas argamassas, o ensaio de retração restringida apresenta uma avaliação mais completa, levando em consideração a capacidade de relaxação das argamassas.

De uma forma geral, pode-se concluir que a incorporação de fibras naturais nas argamassas de cimento reduziu a sua suscetibilidade à fissuração. Além disso, o modelo experimental utilizado para avaliar a retração condicionada apresentou um método eficaz para avaliar a suscetibilidade à fissuração, tendo em conta uma multiplicidade de fatores que contribuem para a fissuração devido à retração restringida.

REFERÊNCIAS

- Afroz, S., Nguyen, Q. D., Zhang, Y., Kim, T., & Castel, A. (2023). Cracking of limestone calcined clay blended concrete and mortar under restrained shrinkage. *Construction and Building Materials*, 386. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131599>
- Baloch, H., Grünewald, S., & Matthys, S. (2023). Assessment of shrinkage and bond behaviour of high performance cement-based composites as a repair mortar. *Developments in the Built Environment*, 15. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100203>
- Bentz, D. P., Weiss, W. J., Schlitter, J. L., & Weiss, W. J. (2013). Quantifying stress development and remaining stress capacity in restrained, internally cured mortars Article in ACI. In *ACI Materials Journal* (Vol. 110, Issue 1). <https://www.researchgate.net/publication/235089451>
- Beushausen, H., & Arito, P. (2018). The influence of mix composition, w/b ratio and curing on restrained shrinkage cracking of cementitious mortars. *Construction and Building Materials*, 174, 38–46. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.099>
- Guo, Y. Q., & Wang, J. Y. (2023). Flexural behavior of high-strength steel bar reinforced UHPC beams with considering restrained shrinkage. *Construction and Building Materials*, 409. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133802>
- Hong, M., Lei, D., Zhu, F., Bai, P., & He, J. (2023). Experimental research on aggregate restrained shrinkage and cracking of early-age cement paste. *Cement and Concrete Research*, 172. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107246>
- Pederneiras, C. M., Veiga, R., & de Brito, J. (2019). Rendering mortars reinforced with natural sheep's wool fibers. *Materials*, 12(22). <https://doi.org/10.3390/ma12223648>
- Pederneiras, C. M., Veiga, R., & de Brito, J. (2021). Physical and mechanical performance of coir fiber-reinforced rendering mortars. *Materials*, 14(4), 1–15. <https://doi.org/10.3390/ma14040823>
- Tan, X., Du, J., Zhang, Q., Meng, W., & Bao, Y. (2024). Monitoring restrained shrinkage and cracks of ultra-high-performance concrete (UHPC) using distributed fiber optic sensors. *Construction and Building Materials*, 422. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135789>
- VEIGA, M. R., 1998 – Comportamento de argamassas de revestimento de paredes. Contribuição para o estudo da sua resistência à fendilhação. Lisboa: LNEC, 1998. Tese para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.



- VEIGA, M. R. (2000) - Influence of application conditions on the cracking susceptibility of renderings. RILEM Publications S.A:R.L., Concrete Science and Engineering, vol. 2, September 2000, p.134-140.
- Veiga, M. R., Velosa, A. L., & Magalhães, A. C. (2007). Evaluation of mechanical compatibility of renders to apply on old walls based on a restrained shrinkage test. *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, 40(10), 1115–1126. <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9209-6>
- Yang, Y., Ma, L., Huang, J., Gu, C., Xu, Z., Liu, J., & Ni, T. (2019). Evaluation of the thermal and shrinkage stresses in restrained high-performance concrete. *Materials*, 12(22). <https://doi.org/10.3390/ma12223680>