

Monitorização de estruturas de construção a partir de varões compósitos entrançados (BCRs)

Monitoring of building structures from braided composite reinforcing bars (BCRs)

J. Sousa^a, C. Mota^a, J. Bessa^{a†}, F. Cunha^a, R. Figueiro^{a,b}

^a *Fibrenamics-Universidade do Minho, Guimarães, Portugal*

^b *Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Têxtil, Guimarães, Portugal*

[†] *Autor para correspondência: joabessa@fibrenamics.com*

RESUMO

O presente trabalho surge no âmbito de um estudo em que foram desenvolvidos varões de compósito entrançados (BCRs) piezoresistivos através da incorporação de um filamento de fibra de vidro impregnado com nanotubos de carbono (CNTs). Diferentes concentrações mássicas de CNTs [0%, 0,5%, 1%, 1,5%, 2% e 2,5%] foram dispersas em formulações poliméricas de resina epóxi e ácido polilático (PLA). Estas formulações foram, em seguida, utilizadas para impregnar os filamentos de fibra de vidro com pré-tratamento alcalino. O efeito do pré-tratamento alcalino dos filamentos de fibra de vidro dos BCRs foi caracterizado pela técnica de espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR). O desempenho piezoresistivo dos BCRs funcionalizados foi avaliado usando um set-up dedicado para medir, simultaneamente, a resposta de deformação mecânica e variação de resistência elétrica, durante cargas de tração cíclicas. Através dos resultados, verificou-se que o sensor piezoresistivo estrutural obtido apresenta uma sensibilidade adequada para substituir varões de aço de alta densidade e suscetíveis à oxidação nas armaduras de betão, por uma estrutura de monitorização inteligente.

ABSTRACT

The present work arises from a study in which piezoresistive braided composite rods (BCRs) were developed by incorporating a glass fibre filament impregnated with carbon nanotubes (CNTs). Different mass concentrations of CNTs [0%, 0.5%, 1%, 1.5%, 2% and 2.5%] were dispersed in epoxy resin and polylactic acid (PLA) polymer formulations. These formulations were then used to impregnate the glass fibre filaments with alkaline pre-treatment. The alkaline pre-treatment effect of the BCRs glass fibre filaments was characterised by Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) technique. The piezoresistive performance of the functionalised BCRs was evaluated using a dedicated set-up to, simultaneously, measure the mechanical strain and electrical resistance variation response, during cyclic tensile loads. Through the results, it was found that the obtained structural piezoresistive sensor presents a suitable sensitivity to replace high density and oxidation susceptible steel bars in concrete reinforcement with a smart monitoring structure.

Palavras-chave:

BCRs; CNTs;
Piezoresistividade;
Monitorização.

Keywords:

BCRs; CNTs;
Piezoresistivity;
Monitoring.

1. Introdução

Preocupações com a durabilidade de armaduras de betão em aço relacionadas com elevados níveis de carga e exposição a elementos corrosivos, impulsiona respostas tecnológicas inovadoras que incluem a implementação de varões poliméricos reforçados com fibras, uma nova classe de material não corrosivo, de alta resistência mecânica e composta por materiais leves [1], [2], [3]. Esta é uma tecnologia promissora que pode diminuir o tempo de instalação em obra e, sendo quimicamente inerte, mitiga o fenómeno de corrosão. Os polímeros reforçados com fibra de vidro surgem como a solução mais económica [4]. Em comparação com os metais, os compósitos de fibra de vidro, com composição e orientação adequadas, têm uma resistência semelhante à do aço e são mais rígidos do que o alumínio [5]. Estima-se que até 2020 o mercado de compósitos gerou 90 mil milhões de euros a nível global, com a fibra de vidro a ser utilizada como reforço em 90% da produção de todos os compósitos reforçados com fibras [6].

As aplicações de sensores aumentaram drasticamente de 1980 para os dias atuais, onde foi estudada uma grande e ampla aplicabilidade nas nossas rotinas diárias, devido aos avanços recorrentes neste campo da tecnologia [7]. Um sensor deve satisfazer algumas características essenciais, tais como, ser de pequenas dimensões e multifunções, apresentar baixo custo, alta sensibilidade e fiabilidade. Uma grande área de superfície específica, bem como uma estrutura altamente porosa, são necessárias para uma resposta rápida em função do tempo [8]. Para aplicações de deteção adequadas, os sensores devem replicar o seu comportamento de resposta em função do tempo, para permitir a sua reutilização [9]. Sensores piezoresistivos dependem da variação de pressão externa que se traduz numa modificação da sua resistência eléctrica [10]. Estes materiais têm uma grande variedade de aplicações, desde acelerómetros a sensores de pressão [11].

Os nanomateriais apresentam uma posição importante na produção e fabrico de uma grande variedade de gadgets e materiais funcionais devido às suas características físicas e químicas que incluem também elevada resistência mecânica, propriedades estruturais e maior relação área superficial-volume [12]. As nanopartículas de carbono, têm sido amplamente exploradas para objetivos distintos de aplicação, a condutividade eléctrica dos materiais poliméricos pode ser potenciada através da incorporação de partículas condutoras, como estruturas de carbono [13]. Os nanotubos de carbono (CNTs) são moléculas cilíndricas que consistem em átomos de carbono especialmente organizados, que resultam numa rede hexagonal de átomos híbridos [14]. As aplicações de CNTs em nanotecnologia incluem principalmente funções de sensorização, que podem monitorizar alterações devido a flutuações na frequência de vibração dos CNTs, cujo seu arranjo atómico hexagonal garante uma elevada condutividade eléctrica [15].

A impregnação têxtil [16] e as técnicas de revestimento [17] podem ser utilizadas para funcionalizar a fibra de vidro com uma formulação polimérica em combinação com um nanomaterial condutor, como o CNTs, de modo a promover o comportamento piezoresistivo ao longo de todo o comprimento do filamento. O tratamento alcalino das fibras a partir do NaOH [18] é um método económico e comum para diminuir a hidrofobia, o que facilita a impregnação dos CNTs [19].

Este estudo teve como objetivo otimizar e implementar filamentos de fibras de vidro piezoresistivos em BCRs, através da sua funcionalização com CNTs. Pretendia-se, ainda, obter uma maior compreensão do impacto do tratamento alcalino no processo de funcionalização, bem como a sua influência na condutividade eléctrica. Este estudo salvaguarda a repetibilidade de monitorização de estruturas sujeitas a pressões cíclicas, otimização da compatibilidade e conservação do desempenho entre o filamento funcional e os varões compósitos estruturais, resultando numa estrutura de monitorização inteligente com tecnologia piezoresistiva.

2. Materiais e métodos

2.1. Materiais

Respeitante aos materiais utilizados no presente estudo, o filamento de fibra de vidro, com uma massa linear de 100 TEX, foi adquirido à Owens Corning®. Os pellets de NaOH, utilizados no

tratamento alcalino dos filamentos de fibra de vidro, pertencia ao fornecedor Normax. Nas formulações de impregnação de funcionalização dos filamentos de fibra de vidro foram utilizados os constituintes: clorofórmio de pureza 99,8% (Sigma-Aldrich®), pellets de PLA (NatureWorks), nanotubos de carbono (*Thomas Swan & Company Ltd.*) e, por fim, a resina epóxi adicionada foi a *Biresin®* CR141 da *Sika*.

2.2. Métodos de funcionalização

A funcionalização dos filamentos de fibra de vidro iniciou-se com a sua imersão numa solução aquosa de NaOH 4% (m/v) durante uma hora à temperatura ambiente, com agitação mecânica de 350 rpm. As fibras foram, de seguida, lavadas com água destilada, para a remoção de NaOH residual e submetidas a secagem em estufa, a 80°C durante duas horas [20]. Para efeitos de comparação, as amostras sem tratamento alcalino foram submetidas às mesmas formulações de funcionalização que os filamentos com tratamento alcalino.

Com a finalidade de ser comparada a influência de soluções de formulação de funcionalização da matriz a impregnar os filamentos, foi estudada a utilização de bases termoendurecível (epóxi), termoplástica (PLA) e da sua combinação. Assim, os filamentos de fibra de vidro foram impregnados com as formulações a seguir apresentadas (Formulação A, B e C). Estes filamentos foram funcionalizados a partir de matrizes com CNTs, utilizando o método *Dip-Pad-Dry*, numa gama de [0%, 0,5%, 1%, 1,5%, 2% e 2,5%] CNTs (m/v), utilizando as seguintes formulações:

- **Formulação A:** CNTs dispersos em acetona com epóxi *Biresin®* CR141 [21], agitação mecânica durante uma hora e banho de ultrassons durante uma hora;
- **Formulação B:** CNTs dispersos numa solução de clorofórmio com PLA 6% (m/v), através de agitação mecânica durante uma hora, seguido de banho de ultrassons durante uma hora;
- **Formulação C:** Combinação de ambas as formulações anteriores aplicando a matriz epóxi *Biresin®* CR141 como um revestimento às fibras de vidro funcionalizadas com a formulação B.

Esta gama de formulações permite inferir a influência de diferentes comportamentos elásticos em diferentes amostras.

De acordo com a visualização dos filamentos com e sem impregnação de solução de funcionalização, (Figura 1), verifica-se que o processo de *Dip-Pad-Dry* permite uma distribuição homogénea da formulação em todo o comprimento dos filamentos, esta aplicação foi realizada, aplicando as formulações de funcionalização aos filamentos de fibra de vidro num equipamento *Foulard* vertical, seguido de secagem em estufa a 100°C durante 5 min [16] (Figura 1).

2.3. Métodos de produção

A incorporação dos filamentos de fibra de vidro funcionalizados, pelos métodos descritos anteriormente, baseou-se em adicionar o filamento funcionalizado, juntos com os restantes multifilamentos de fibra de vidro que compõem os BCRs. Esta adição é realizada no início do processo de produção dos varões compósitos entrançados, na zona de alimentação das fibras. É possível visualizar, (Figura 2), as diferentes zonas e equipamentos referentes ao processo de produção de BCRs, inclusive a referida zona de alimentação das fibras [22].

Os BCRs testados foram produzidos utilizando seis multifilamentos de fibra de vidro (SE1200 9600 [23]) com um filamento, do mesmo material, funcionalizado no seu núcleo. Este conjunto de fibras foi imerso para impregnação em resina epóxi *Biresin®* CR141. Posteriormente, no entrançamento, as fibras impregnadas foram envolvidas por filamentos de poliéster. Na fase seguinte, as fibras impregnadas e entrançadas passam numa câmara de cura durante 5 min a 140°C. Por fim, os BCRs saem curados, após zona de tiragem, como produto final, disponível para ser seccionado da forma pretendida.

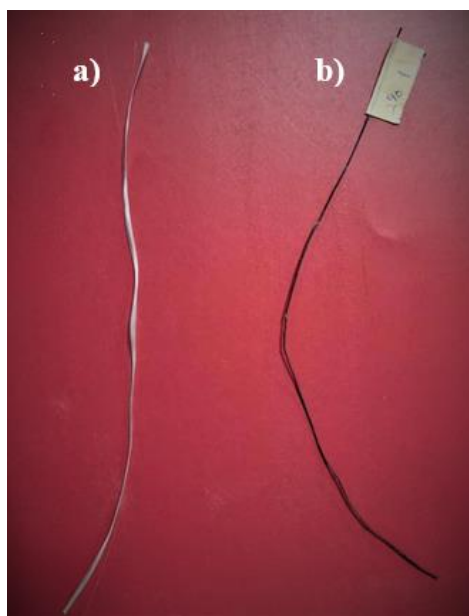


Figura 1 - Filamento de fibra de vidro TEX 100 sem impregnação, a) e filamento de fibra de vidro impregnado com Formulação B com 2% CNTs, b).

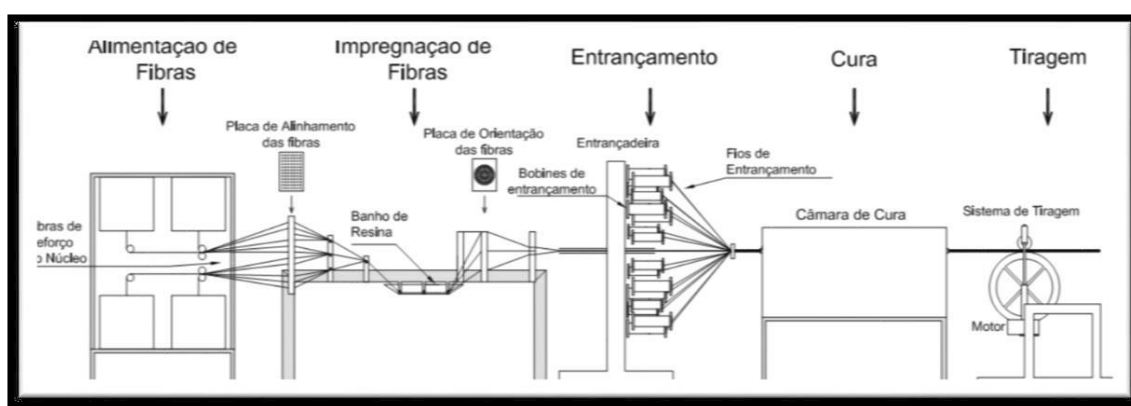


Figura 2 - Esquema do processo de fabrico dos Varões Compósitos Entrançados (BCRs) [22].

2.4. Métodos de caracterização

Para avaliar o desempenho dos filamentos com e sem tratamento alcalino após funcionalização, a espectroscopia de infravermelhos por transformada de *Fourier* (FTIR) permite verificar a presença de CNTs nos filamentos. Os testes de resistividade elétrica foram efetuados com recurso a uma fonte *Keitley 487 Picoammeter/Voltage Source*, através da aplicação de uma diferença de potencial entre -1 a 1 V, a temperatura ambiente. De modo a ser possível medir valores de resistência elétrica, utilizou-se um sistema de eléctrodos de cobre, com uma área de eléctrodo de ($5 \times 1 \text{ mm}^2$) e a distância entre eléctrodos de 3 mm. São apresentados os equipamentos utilizados para a medição da resistividade elétrica (Figura 3).

O comportamento piezoresistivo dos filamentos de fibra de vidro impregnados com a formulação B apresentada, foi avaliado através de ensaios cíclicos de tração, constituídos por cinco ciclos e velocidade de ensaio de 2mm por minuto, aplicando 0,5% e 1% de extensão ao comprimento entre as mandíbulas do dinamómetro (170mm) e ligando aos eléctrodos, com a distância de 1cm no centro do filamento, os terminais de um multímetro digital [24]. O comportamento piezoresistivo foi apenas avaliado em amostras impregnadas com a formulação B, por se tratar das amostras que apresentaram valores de resistividade mais adequados ao objetivo. Esta explicação surge, mais detalhadamente, no capítulo referente aos resultados deste

estudo. Pode ser visualizado o *set-up* utilizado nos ensaios de piezoresistividade na imagem abaixo (Figura 4).

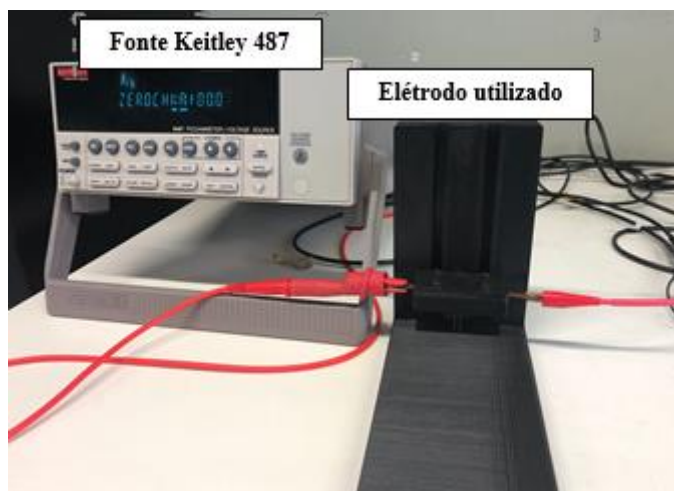


Figura 3 - Equipamentos utilizados na medição de resistividade elétrica.

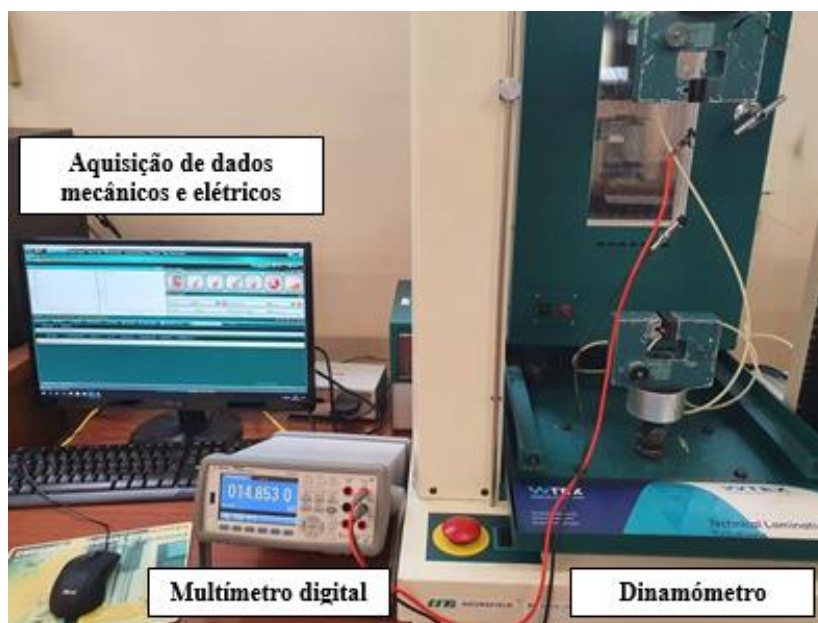


Figura 4 - *Set-up* utilizado nos ensaios de piezoresistividade.

Os testes de piezoresistividade foram realizados de forma a determinar-se a capacidade destes filamentos funcionalizados se comportarem como material piezoresistivo. Assim, o comportamento elétrico (resistência elétrica) e mecânico (extensão) do filamento foram avaliados simultaneamente e ao longo dos ensaios cíclicos de tração, para avaliar também a repetibilidade deste comportamento. Após a caracterização e seleção das formulações, com base no seu desempenho, os filamentos de fibra de vidro funcionalizados foram incorporados nos varões compósitos reforçados, aquando da sua produção, de acordo com o método de produção acima abordado.

3. Resultados e Discussão

3.1. Caracterização FTIR

A análise FTIR realizada aos filamentos de fibra de vidro não funcionalizados, com e sem tratamento alcalino foi realizada entre os comprimentos de onda de 4000 a 400 cm^{-1} e com resolução de 4 cm^{-1} . A partir do espectro FTIR (Figura 5), detalhado anteriormente, podem ser observados os resultados apresentados de seguida. O espectro demonstra que um pico de absorção é conservado a cerca de 1750 cm^{-1} para ambas as amostras, correspondente à frequência de alongamento de C=O, assim como a banda a 1050 cm^{-1} relativa a Si-O-Si, comumente encontrada em fibra de vidro e ainda a banda 1200 cm^{-1} C-OH de alongamento [25]. A existência de uma banda expressiva a 720 cm^{-1} para a amostra de fibra de vidro com tratamento alcalino resulta do evento de infravermelhos de flexão Si-OH causada pelo NaOH durante o pré-tratamento alcalino [26], já o pico nos 3400 cm^{-1} é também característico da vibração de alongamento OH [27]. Verifica-se a partir do mesmo espectro que ambos os picos nos 720 cm^{-1} e 3400 cm^{-1} não se aplicam à amostra de fibra de vidro não tratada. Este resultado demonstra a remoção da maioria dos grupos não polares e a implementação de grupos hidroxilo, que promovem a impregnação dos CNTs [28].

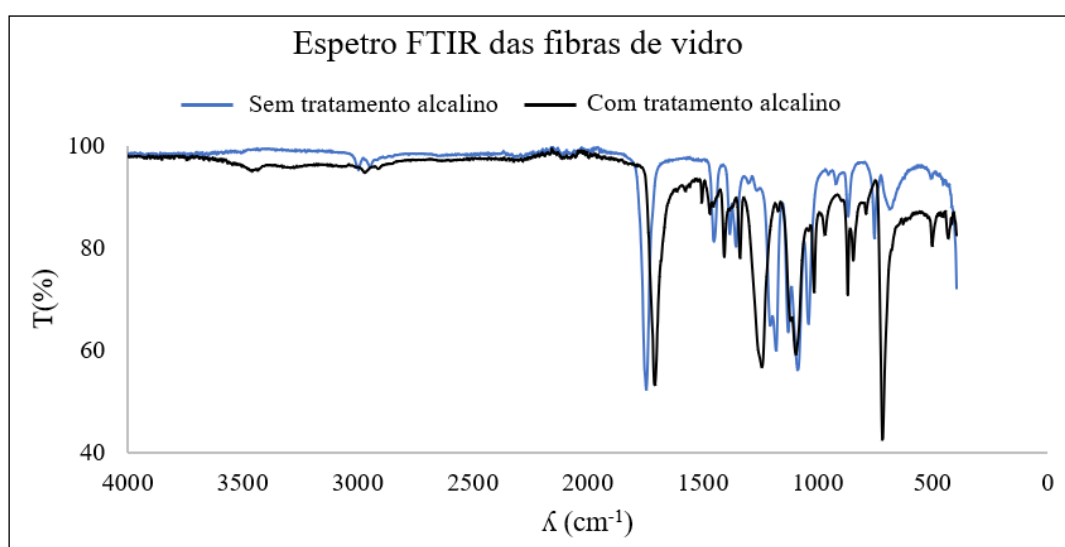


Figura 5 - Espectro FTIR das fibras de vidro com tratamento alcalinos, a cor preta e sem tratamento alcalino, a cor azul.

3.2. Caracterização Elétrica

Dada a discrepância entre os filamentos, impregnados com as diferentes formulações, a variação da resistividade elétrica destes (Tabela 1), mostra que os melhores resultados são apresentados pelas amostras impregnadas com a Formulação B, as quais demonstraram uma resistividade elétrica mais baixa e, portanto, maior condutividade, resultando numa aplicação para materiais piezoresistivos mais adequada e promissora. Por outro lado, verificou-se a existência, também, com problemas de incompatibilidade na formulação C, retratados pela maior resistividade apurada para a concentração de 2,5% de CNTs em comparação com 2% de CNTs.

3.3. Influência da concentração de CNTs

Relativamente aos filamentos de fibra de vidro funcionalizados com a formulação B e com diferentes percentagens de CNTs adicionados, os resultados dos ensaios de piezoresistividade mostram que para as percentagens de 0,5% de CNTs (Figura 6-Figura 7) e 1% de CNTs (Figura 8-Figura 9), não existe uma sobreposição clara entre a variação da resistência elétrica ($\Delta R/R_0$) e a variação da extensão mecânica ($\Delta L/L_0$). Embora exista um padrão para filamentos funcionalizados com 1% de CNTs, a sua resposta elétrica permanece estática para um

determinado limiar de extensão. No que respeita aos picos da curva de $\Delta R/R_0$, estes sobrepõem-se e são mais consistentes para as amostras com 1,5% (Figura 11) e, mais concretamente, 2% de CNTs (Figura 12-Figura 13). No que diz respeito às amostras de filamentos de fibra de vidro com a adição de 2,5% de CNTs (Figura 14-Figura 15), estas apresentam comportamento piezoresistivo de qualidade inferior em comparação com 1,5% e 2% de CNTs, principalmente no ensaio de 1% de extensão, o que não invalidou a sua utilização na incorporação em BCRs, de forma a ser avaliado o comportamento piezoresistivo nos varões compósitos.

Tabela 1 - Resistividade elétrica dos filamentos de fibra de vidro funcionalizados.

% CNTs (m/v)	R (Ω/cm)		
	Formulação A	Formulação B	Formulação C
0,50	1,08E+05	9,07E+03	1,23E+05
1,00	2,67E+04	3,99E+01	4,65E+02
1,50	8,38E+03	4,95E+00	5,56E+01
2,00	4,06E+03	4,24E+00	1,46E+01
2,50	6,36E+02	2,42E+00	2,81E+01

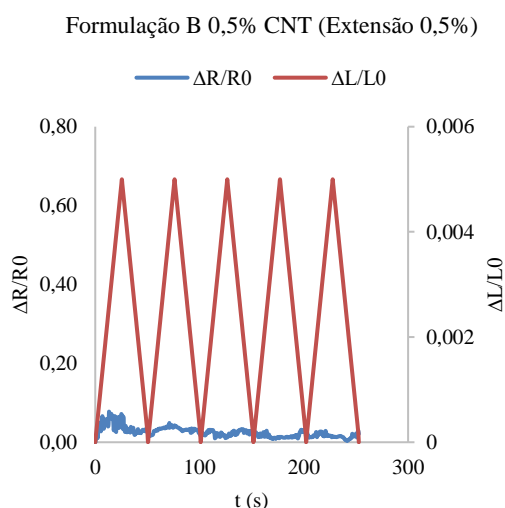


Figura 6 - Comportamento piezoresistivo dos filamentos funcionalizados com a formulação B, 0,5% de CNTs e submetidas a tração cíclica com extensões de 0,5%.

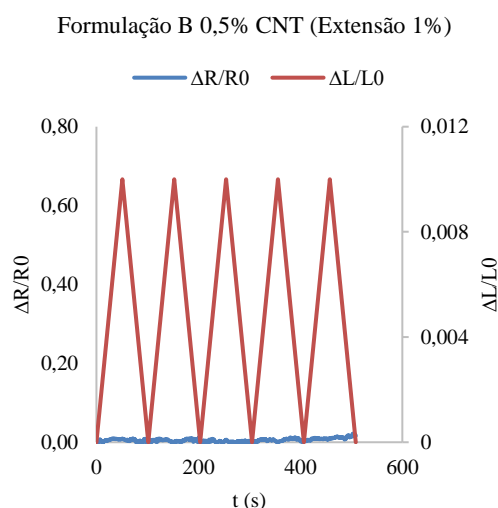


Figura 7 - Comportamento piezoresistivo dos filamentos funcionalizados com a formulação B, 0,5% de CNTs e submetidas a tração cíclica com extensões de 1%.

3.4. Varões compósitos entrançados (BCRs)

Depois de incorporar filamentos impregnados com a Formulação B, adicionados com 1,5% a 2,5% de CNTs nos varões compósitos entrançados (BCR) de 50cm, de modo a otimizar-se a leitura do sinal elétrico, procedeu-se ao polimento e revestimento das extremidades dos BCRs com cola condutora. Este procedimento permitiu, posteriormente uma leitura mais eficaz do sinal elétrico nestes pontos durante os ensaios de piezoresistividade realizados aos varões funcionalizados, (Figura 16).

O comportamento piezoresistivo dos varões compósitos foi avaliado através de ensaios de tração cíclica, consistindo em cinco ciclos com velocidade de extensão de 2mm por minuto, aplicando uma extensão de 0,5% e 1% ao comprimento dos BCRs entre amarras do dinamómetro (400mm) e ligando ambas as extremidades do varão às garras do multímetro utilizado para medição da resistência elétrica durante os ensaios [24].

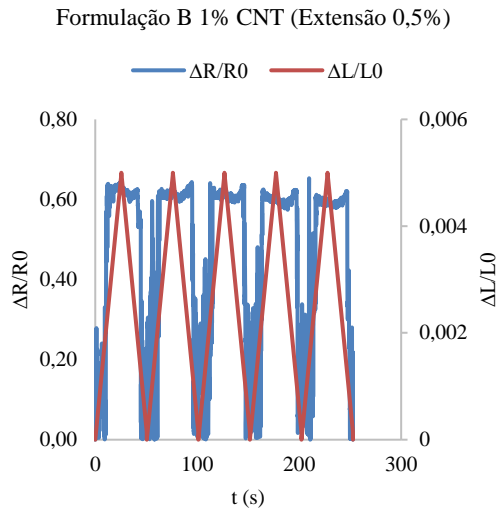


Figura 8 - Comportamento piezoresistivo dos filamentos funcionalizados com a formulação B, 1% de CNTs e submetidas a tração cíclica com extensões de 0,5%.

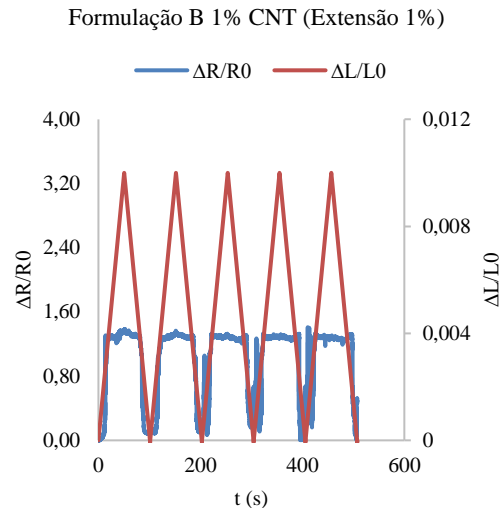


Figura 9 - Comportamento piezoresistivo dos filamentos funcionalizados com a formulação B, 1% de CNTs e submetidas a tração cíclica com extensões de 1%.

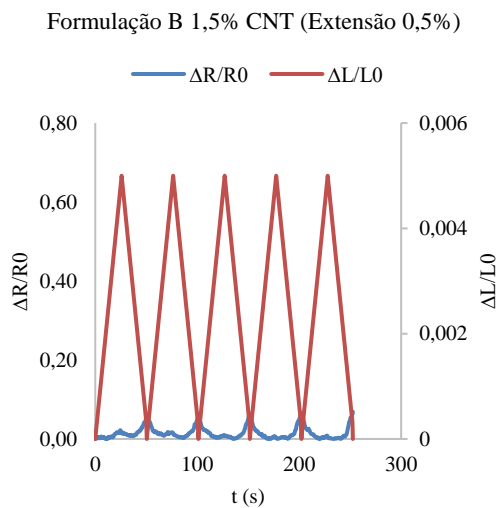


Figura 10 - Comportamento piezoresistivo dos filamentos funcionalizados com a formulação B, 1,5% de CNTs e submetidas a tração cíclica com extensões de 0,5%.

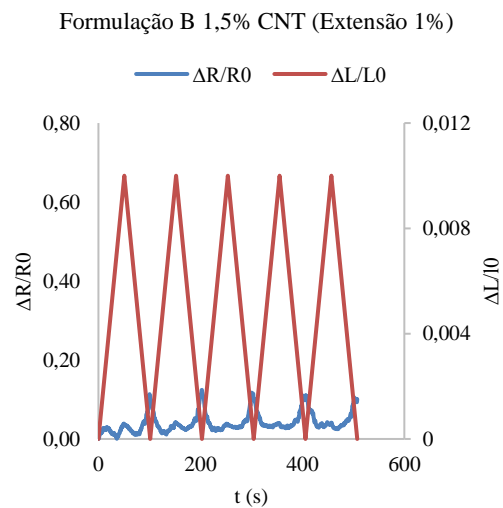


Figura 11 - Comportamento piezoresistivo dos filamentos funcionalizados com a formulação B, 1,5% de CNTs e submetidas a tração cíclica com extensões de 1%.

Os gráficos relacionados com o comportamento piezoresistivo obtido a partir dos ensaios de piezoresistividade dos BCRs funcionalizados (Figura 17) apontam que, para o mesmo BCR, o seu comportamento é semelhante quando aplicados diferentes deformações, nota-se também que os picos têm mais amplitude e consistência para as concentrações de 2% e 2,5% de CNTs. Por outro lado, os BCRs com concentração de 1,5% de CNTs não mostram o mesmo comportamento piezoresistivo, desejado, devido à sua inconsistência na variação de resistência elétrica.

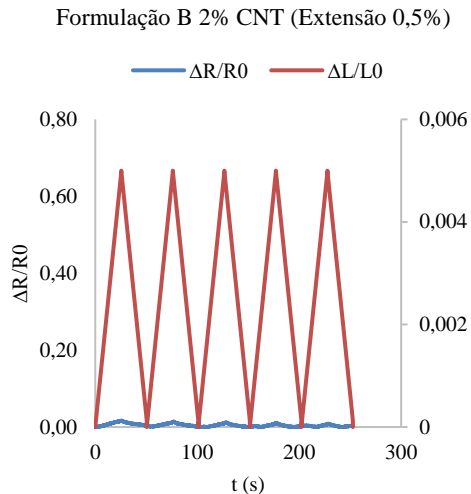


Figura 12 - Comportamento piezoresistivo dos filamentos funcionalizados com a formulação B, 2% de CNTs e submetidas a tração cíclica com extensões de 0,5%.

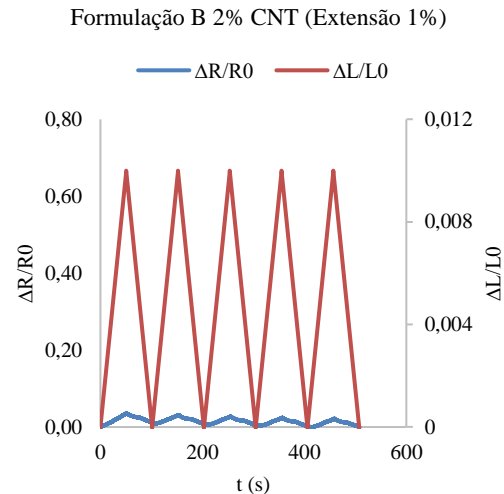


Figura 13 - Comportamento piezoresistivo dos filamentos funcionalizados com a formulação B, 2% de CNTs e submetidas a tração cíclica com extensões de 1%.

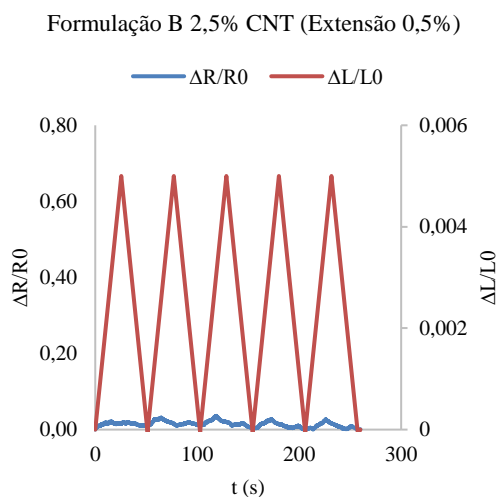


Figura 14 - Comportamento piezoresistivo dos filamentos funcionalizados com a formulação B, 2,5% de CNTs e submetidas a tração cíclica com extensões de 0,5%.

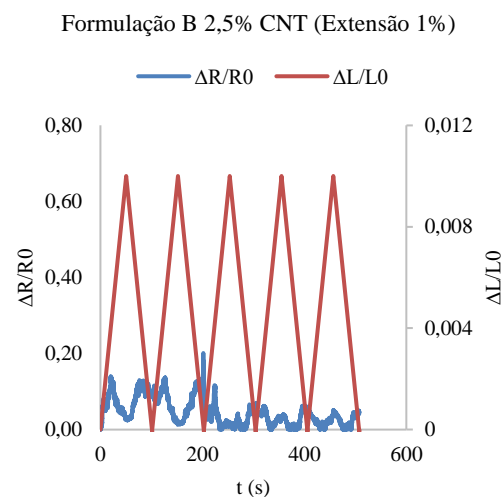
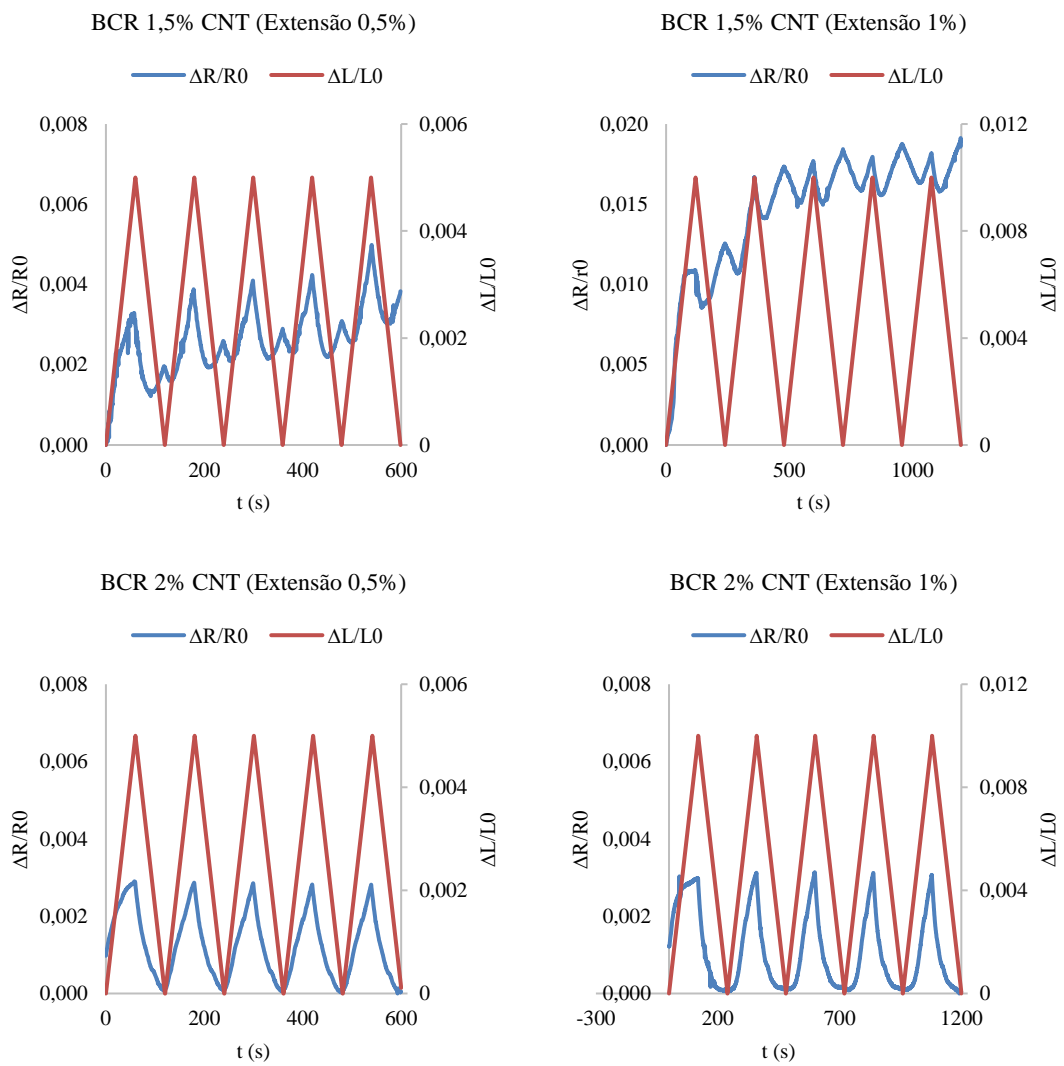


Figura 15 - Comportamento piezoresistivo dos filamentos funcionalizados com a formulação B, 2,5% de CNTs e submetidas a tração cíclica com extensões de 1%.

Os *gauge factors* apresentados nos gráficos prévios determinados atendendo ao terceiro ciclo de deformação, no intervalo da curva ascendente (Tabela 2). Os filamentos de fibra de vidro funcionalizados demonstram que, ao aumentar a percentagem de CNTs, o material perde a sua capacidade de sensorização devido ao princípio do limite de percolação, o mesmo ocorre aumentando a deformação do varão, o que pode estar a perturbar o sinal condutor obtido a partir da malha construída pelos CNTs. Ao serem obtidos resultados semelhantes com diferentes extensões, a elasticidade do PLA destaca-se, mantendo a integridade do filamento ao longo do seu comprimento. Os valores de *gauge factor* mostram ainda que, quanto maior for a concentração de CNTs, menor é a sensibilidade do material piezoresistivo. No entanto esta diferença é quase insignificante quando se comparam os gráficos associados à concentrações de 1,5% da CNTs aos referentes à concentração de 2% CNTs (Figura 17).



Figura 16 - BCRs após colocação de cola condutora nas suas extremidades.



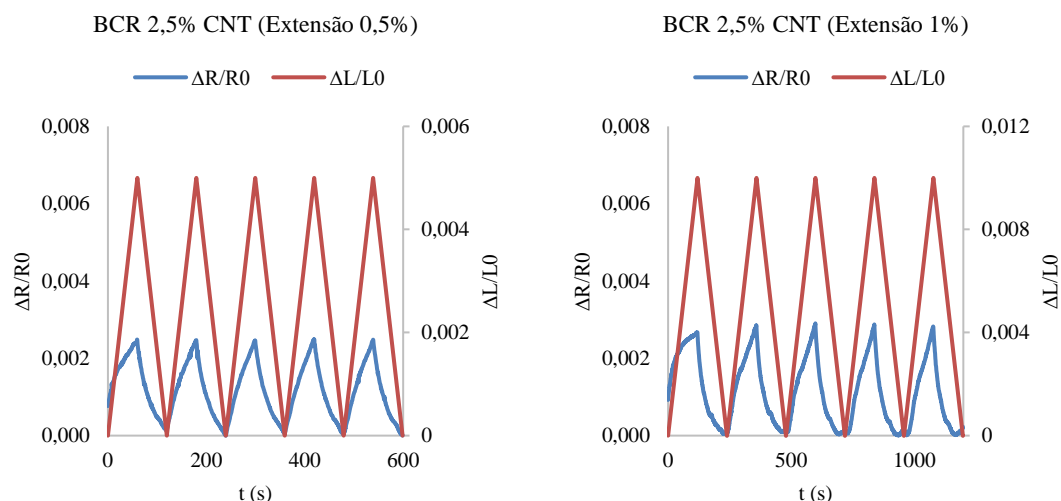


Figura 17 - Comportamento piezoresistivo dos ensaios realizados às amostras de BCRs funcionalizadas com a formulação B, submetidas a tração cíclica, a extensões de 0,5 e 1%.

Tabela 2 - Determinação de *Gauge Factor* dos BCRs funcionalizados testados.

% CNTs (m/v)	Gauge Factor	
	Extensão 0,5%	Extensão 1%
1,50	0,61	0,59
2,00	0,58	0,44
2,50	0,48	0,28

4. Conclusões

A combinação de sensores piezoresistivos e varões compósitos estruturais resulta num material de monitorização inteligente que pode resistir à abrasão e corrosão, enquanto facilita a sua instalação e manutenção. Para atingir estes objetivos, combinando a funcionalização dos CNTs com materiais dúcteis através da impregnação num material bem conhecido e fiável, a fibra de vidro, o que resulta num material piezoresistivo capaz de monitorizar a variação da sua deformação através da variação de resistência elétrica. Neste caso, a formulação B, que combina o PLA com CNTs, quando implementada nos BCRs revelou resultados impressionantes, destacando-se a formulação B com concentração de 2% CNTs, a qual apresentou um comportamento consistente entre ciclos de tração e um *gauge factor* adequado.

Os ensaios piezoresistivos de filamento de fibra de vidro isolado demonstraram um melhor desempenho do que os atuais disponíveis no mercado, com uma diferença mais notória quando incorporados nos BCRs. No entanto, os ensaios piezoresistivos de tração cíclica iniciais para filamentos condutores isolados revelaram melhores resultados para as concentrações de 1,5% e 2% de CNTs. Dado o maior comprimento de medição elétrica e uma possível presença de materiais não condutores na sua periferia, os resultados melhores para os BCRs com filamento condutor incorporado, mudaram esta gama ideal para as concentrações de 2% e 2,5% de CNTs. A combinação dos BCRs com esta tecnologia satisfaz o propósito deste estudo, proporcionando uma abordagem multifuncional e inteligente ao mercado da engenharia estrutural.

Referências

- [1] J. Saliba, A. Loukili, F. Grondin, Acoustic emission monitoring and quantitative evaluation of damage in concrete beams under creep, in Acoustic Emission (AE) and Related Non-destructive Evaluation (NDE) Techniques in the Fracture Mechanics of Concrete: Fundamentals and Applications, Woodhead Publishing, 2015, pp. 113-136.

- [2] A. Poursaeed, Corrosion sensing for assessing and monitoring civil infrastructures, in *Sensor Technologies for Civil Infrastructures*, Woodhead Publishing, 2014, vol. 1, pp. 357-382.
- [3] M. Motavalli, C. Czaderski, A. Schumacher, D. Gsell, Fibre reinforced polymer composite materials for building and construction, in *Textiles, Polymers and Composites for Buildings*, Woodhead Publishing, 2010, pp. 69-128.
- [4] A. Mufti, N. Banthia, B. Benmokrane, M. Boulfiza, J. Newhook, Durability of GFRP composite rods: Results from preliminary field tests don't match data from accelerated lab tests, *Concr. Int.*, 2007.
- [5] R.S. Chen, Y.H. Muhammad, S. Ahmad, Physical, Mechanical and environmental stress cracking characteristics of epoxy/glass fiber composites: Effect of matrix/fiber modification and fiber loading, *Polym. Test.*, 96 (2021) 107088. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107088>.
- [6] S.T. Bashir, L. Yang, J.J. Liggat, J.L. Thomason, Kinetics of dissolution of glass fibre in hot alkaline solution, *J. Mater. Sci.*, 53 (2018) 1710-1722.
- [7] M. Kimura, A. Ando, D. Maurya, S. Priya, Lead Zirconate Titanate-Based Piezoceramics, in *Advanced Piezoelectric Materials*, Elsevier, 2017, pp. 95-126.
- [8] R. Nayak, R. Padhye, L. Arnold, Melt-electrospinning of nanofibers, in *Electrospun Nanofibers*, Elsevier Inc., 2017, pp. 11-40.
- [9] R. Viter, I. Iatsunskyi, Metal Oxide Nanostructures in Sensing, in *Nanomaterials Design for Sensing Applications*, Elsevier, 2019, pp. 41-91.
- [10] T. Kenny, W. Kester, G. C. Low, Strain Gages, in *Sensor Technology Handbook*, Elsevier Inc., 2005, pp. 501-529.
- [11] M.H. Bao, Piezoresistive sensing, in *Handbook of Sensors and Actuators*, vol. 8, Elsevier, 2000, pp. 199-239.
- [12] T.A. Saleh, V.K. Gupta, Synthesis, Classification, and Properties of Nanomaterials, in *Nanomaterial and Polymer Membranes*, Elsevier, 2016, pp. 83-133.
- [13] P. Cassagnau, Rheology of Carbon Nanoparticle Suspensions and Nanocomposites, in *Rheology of Non-Spherical Particle Suspensions*, Elsevier Inc., 2015, pp. 59-75.
- [14] A.M. Holban, A.M. Grumezescu, E. Andronescu, Inorganic nanoarchitectonics designed for drug delivery and anti-infective surfaces, in *Surface Chemistry of Nanobiomaterials: Applications of Nanobiomaterials*, Elsevier Science Ltd., 2016, pp. 301-327.
- [15] V. Harik, Nanotechnology of Carbon Nanotubes, in *Mechanics of Carbon Nanotubes*, Elsevier, 2018, pp. 1-24.
- [16] J. Mack and R. Schledjewski, Filament winding process in thermoplastics, in *Manufacturing Techniques for Polymer Matrix Composites (PMCs)*, Elsevier, 2012, pp. 182-208.
- [17] W.C. Smith, Overview of textile coating and lamination, in *Smart Textile Coatings and Laminates: A volume in Woodhead Publishing Series in Textiles*, Woodhead Publishing, 2010, pp. 3-9.
- [18] W. Ouarhim, N. Zari, R. Bouhfid, A.E.K. Qaiss, Mechanical performance of natural fibers-based thermosetting composites, in *Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*, Elsevier, 2018, pp. 43-60.
- [19] M.H. Zin, K. Abdan, M.N. Norizan, The effect of different fiber loading on flexural and thermal properties of banana/pineapple leaf (PALF)/glass hybrid composite, in *Structural Health Monitoring of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*, Elsevier, 2018, pp. 1-17.
- [20] D. Panesar, R. Leung, M. Sain, S. Panthapulakkal, The effect of sodium hydroxide surface treatment on the tensile strength and elastic modulus of cellulose nanofiber, in *Sustainable and Nonconventional Construction Materials using Inorganic Bonded Fiber Composites*, Woodhead Publishing, 2017, pp. 17-26.
- [21] Sika, Biresin ® CR141 1 / 3 Biresin ® CR141 Composite resin system for heat curing, 2020.
- [22] S. Patinha, F. Oliveira, F. Cunha, C. Mota, Desenvolvimento e Caracterização de Varões Compósitos Híbridos para Reforço de Betão, 2014.
- [23] Owens Corning, SE 1200 Single End Roving for Knitting, Weaving, Filament Winding, and LFTP product description product information. Brussels, 2012.
- [24] X. Wang, J. Wang, S. Biswas, H. Kim, I. Nam, Characteristics of Epoxy-Based Composites

Incorporating Hybridized Networks of Carbon or Graphite Nanoplatelets, Sensors, 2020, pp. 1-17.

- [25] A.M. Mhatre, S. Chappa, S. Ojha, A.K. Pandey, Functionalized glass fiber membrane for extraction of iodine species, *Sep. Sci. Technol.*, 54 (2019) 1469-1477. <https://doi.org/10.1080/01496395.2018.1520729>.
- [26] A.J. Bonon, M. Weck, E.A. Bonfante, P.G. Coelho, Physicochemical characterization of three fiber-reinforced epoxide-based composites for dental applications, *Mater. Sci. Eng. C*, 69 (2016) 905-913. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2016.07.002>.
- [27] H. Sosiati, Y.A. Shofie, A.W. Nugroho, Tensile properties of Kenaf/E-glass reinforced hybrid polypropylene (PP) composites with different fiber loading, *Evergreen*, 5 (2018) 1-5.
- [28] V. Fiore, G. Di Bella, A. Valenza, The effect of alkaline treatment on mechanical properties of kenaf fibers and their epoxy composites, *Compos. Part B Eng.*, 68 (2015) 14-21. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.08.025>.

ORCID

José Duarte Pereira Cunha Sousa 0009-0002-3850-6077
<https://orcid.org/0009-0002-3850-6077>

João Luís Sousa Bessa Soares 0000-0003-0950-4961
<https://orcid.org/0000-0003-0950-4961>