

Efeito de nano adições de base carbono nas funções de deformação e percepção de aquecimento em pastas cimentícias

B. del Moral¹ , C. Farcas¹ , O. Galao¹ , F. J. Baeza¹ , E. Zornoza¹ , P. Garcés^{1*} 

* Autor de Contato: pedro.garces@ua.es

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v14i1.713>

Recebido: 04/11/2023 | Correções recebidas: 12/12/2023 | Aceito: 19/12/2023 | Publicado: 01/01/2024

RESUMO

Nesta pesquisa, foi estudado o uso de nano adições condutoras, como nanotubos de carbono (CNT) e produtos de grafite (PG), em corpos de prova de cimento para desenvolver as funções de detecção de deformação e aquecimento. Para tanto, foram fabricados corpos de prova de pasta de cimento com adição de 1% de CNT e 5% de PG e realizados ensaios de aquecimento em corrente contínua (CC) e corrente alternada (CA) em 20 V e 40 V. Além disso, foi estudado a influência da temperatura em testes de percepção de deformação em faixas entre 0 °C e 60 °C, obtendo bons resultados em ambas as técnicas. Portanto, estes materiais oferecem uma alternativa muito interessante na monitorização estrutural e podem ter aplicações em infraestruturas de aquecimento como pontes e aeroportos, evitando a utilização de substâncias corrosivas.

Palavras-chave: nano adições; percepção; pastas de cimento; aquecimento; resistividade.

Citar como: del Moral, B., Farcas, C., Galao, O., Baeza, F. J., Zornoza, E., Garcés, P. (2024), “Efeito de nano adições de base carbono nas funções de deformação e percepção de aquecimento em pastas cimentícias”, Revista ALCONPAT, 14 (1), pp. 13 – 24, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v14i1.713>

¹ Departamento de Ingeniería Civil, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Alicante, España.

Contribuição de cada autor

Neste trabalho Beatriz del Moral Delgado contribuiu com a atividade de desenvolvimento do programa experimental (35%) e tratamento de dados (20%). Catalina Farcas contribuiu na atividade de desenvolvimento do programa experimental (35%) e processamento de dados (20%). Oscar Galao Malo contribuiu para o planejamento do programa experimental (25%), atividade de desenvolvimento do programa experimental (10%) e processamento de dados (15%). Francisco Javier Baeza de los Santos contribuiu para o planejamento do programa experimental (25%), contribuiu para a atividade de desenvolvimento do programa experimental (10%) e processamento de dados (15%). Emilio Zornoza contribuiu para o planejamento do programa experimental (25%), contribuiu para a atividade de desenvolvimento do programa experimental (5%) e processamento de dados (15%). Pedro Garcés contribuiu para o planejamento do programa experimental (25%), contribuiu para a atividade de desenvolvimento do programa experimental (5%) e processamento de dados (15%).

Licença Creative Commons

Copyright (2022) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no terceiro número de 2024, desde que a informação seja recebida antes do encerramento do segundo número de 2024.

Effect of carbonaceous nanoadditions on strain sensing and heating functions in cement pastes

ABSTRACT

In this research, the use of conductive nanoadditions, such as carbon nanotubes (CNT) and graphite products (GP), in cement specimens has been studied to develop strain sensing and heating functions. For this purpose, cement paste specimens with addition of 1% CNT and 5% GP have been fabricated and heating tests have been performed in direct current (DC) and alternating current (AC) at 20 V and 40 V. In addition, the influence of temperature on the strain sensing tests in the range from 0 °C to 60 °C has been studied, obtaining good results in both techniques. Therefore, these materials offer a very interesting alternative in structural monitoring and may have applications in the heating of infrastructures such as bridges and airports, avoiding the use of corrosive substances.

Keywords: nanoadditions; strain sensing; cement pastes; heating; resistivity.

Efecto de las nanoadiciones carbonosas en las funciones de percepción de la deformación y calefacción en pastas cementicias

RESUMEN

En esta investigación se ha estudiado el uso de nanoadiciones conductoras, como los nanotubos de carbono (NTC) y productos de grafito (PG), en probetas de cemento para desarrollar las funciones de percepción de la deformación y calefacción. Para ello, se han fabricado probetas de pasta de cemento con adición de 1% NTC y 5% PG y se han realizado ensayos de calefacción en corriente continua (DC) y alterna (AC) a 20 V y 40 V. Además, se ha estudiado la influencia de la temperatura en los ensayos de percepción de la deformación en rangos comprendidos entre 0 °C y 60 °C, obteniéndose buenos resultados en ambas técnicas. Por tanto, estos materiales ofrecen una alternativa muy interesante en la monitorización estructural y pueden tener aplicaciones en la calefacción de infraestructuras como puentes y aeropuertos, evitando el uso de sustancias corrosivas.

Palabras clave: nanoadiciones; percepción; pastas de cemento; calefacción; resistividad.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de monitorização estrutural surgem para controlar o desempenho de uma estrutura, de forma a garantir a sua segurança e vida útil adequada, além de otimizar as intervenções de reabilitação (Baeza et al., 2018). Apesar das múltiplas tipologias de sensores de deformação (sensores cerâmicos piezoelétricos, sensores de fibra óptica ou extensômetros), sua durabilidade é limitada (Li et al., 2004; Song et al., 2006). No entanto, os sensores de cimento condutivo surgiram como uma alternativa interessante e podem ser facilmente obtidos pela adição de um aditivo condutor, por exemplo, fibras de carbono (CF), nanofibras (NFC) ou nanotubos (NTC), à matriz de cimento (Camacho-Ballesta et al., 2016; Han et al., 2015). A incorporação destas adições condutoras melhora a condutividade elétrica da pasta de cimento, permitindo-lhe funcionar como sensor de deformação. Ao medir alterações na resistividade elétrica, o sensor pode detectar tensões e deformações na estrutura. A possibilidade de correlacionar alterações na resistividade dos materiais com a sua deformação torna-os sem dúvida interessantes para fins de monitoramento estrutural. Esta propriedade é comumente conhecida como percepção de deformação e tem sido amplamente estudada nos últimos anos (Baeza et al., 2013a, 2013b; Chung, 1998; Galao et al., 2014; Ubertini et al., 2014, 2016).

A adição de um material condutor melhora a condutividade elétrica do compósito, transformando-o em um material multifuncional que pode ser aplicado a muitas outras funções do concreto, como degelo ou como ânodo em técnicas eletroquímicas (Carmona et al., 2015; del Moral et al., 2013). Uma das funções mais poderosas e atuais que um material cimentício condutor pode desempenhar é a função de aquecimento. O aumento da temperatura do material é baseado no efeito Joule quando uma corrente elétrica é aplicada, no qual o calor é gerado por uma corrente que flui através de um condutor (Ding et al., 2013; Liu et al., 2010). A capacidade de geração de calor dos materiais cimentícios eletricamente condutivos está associada à sua resistência, conforme expresso pela primeira lei de Joule (Wang et al., 2004). Ao controlar a energia elétrica fornecida, a temperatura do composto pode ser ajustada. Quando este conceito é aplicado a materiais estruturais, é possível utilizar o próprio material estrutural para causar o derretimento do gelo em sua superfície (ou para evitar sua formação). Os sistemas tradicionais de aquecimento de edifícios incluem tubos subterrâneos, lâmpadas de calor infravermelhas, fluidos aquecidos e energia solar. Porém, esses sistemas possuem construção complicada, alto custo e baixa integridade com a estrutura original e, portanto, sua aplicação é limitada (Zhang et al., 2011). Yehia et al. (Yehia et al., 2000) e Chung (Chung, 2004) foram pioneiros no desenvolvimento desta função utilizando materiais cimentícios condutores. Os compósitos multifuncionais à base de cimento apresentam alta integridade estrutural com as estruturas originais. Ou seja, o dano induzido pela dilatação térmica durante o aquecimento é desprezível, uma vez que o seu coeficiente de dilatação térmica é semelhante ao das estruturas de cimento originais (Chung, 2004). A utilização destes materiais que poderiam oferecer a possibilidade de aumentar a sua temperatura em infra-estruturas de transporte como pontes ou aeroportos evitaria a utilização de sais corrosivos que poderiam danificar as armaduras de aço, o próprio concreto e o ecossistema. Portanto, estes materiais poderão ser viáveis para aumentar a temperatura ambiente de salas ou para prevenir a formação de gelo, ou produzir descongelamento, em infraestruturas de engenharia civil, entre outros.

Nesta pesquisa, as funções de detecção de deformação e aquecimento foram realizadas em amostras de cimento com nano adições condutoras, como CNT e produtos de grafite.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1 Fabricação de corpos de prova de pasta de cimento condutor

Os materiais utilizados nesta pesquisa foram os seguintes:

- Água destilada.
- Cimento Portland tipo CEM I 52.5 R UNE-EN 197-1, subministrado por Cemex España S.A. (Alicante).
- Produtos de grafite: Grafite expandido (ABG1010) subministrado por Superior Graphite.
- NTC Graphistrength C100 suministrados por Arkema.
- Superplastificante Sika Viscocrete 20-HE, subministrado por Sika España.

O processo de dispersão das nano adições é essencial para o aproveitamento ideal de suas propriedades quando integradas à matriz cimentícia. Este processo começou com a pesagem dos CNTs sob uma coifa. A concentração utilizada durante este tratamento consistiu em 18 gramas de CNT por 450 ml de água. Em seguida, as dispersões de CNT foram preparadas utilizando um robô de lâminas da marca Robot Coupé, durante 10 minutos. A suspensão resultante é homogeneizada, adotando uma consistência menos líquida e pastosa. A pasta formada pelo robô é despejada de volta no recipiente, coletando toda a pasta das paredes do robô usando uma espátula de silicone e o superplastificante Sika Viscocrete 20-HE é adicionado na proporção de Plastificante/NTC = 0,4. A seguir, aplica-se um tratamento de ultrassom na dispersão, por 10 minutos, utilizando uma ponta de ultrassom modelo Hielschier UP400St com amplitude de 65%, utilizando banho de gelo para evitar aumento excessivo da temperatura da mistura.

A massa foi amassada com batedeira. As dispersões preparadas foram completamente despejadas no recipiente misturador e o cimento foi adicionado em três partes, aproximadamente 600 g de cada vez. Cada parte foi misturada durante 2 minutos em velocidade baixa. Finalmente, quando todas as partes de cimento foram adicionadas, a pasta foi misturada por mais 1 minuto em alta velocidade. A relação água/cimento para essas pastas formadas com uma mistura de 1% CNT e 5% ABG1010 foi de 0,4.

As pastas de cimento foram então lançadas em moldes padronizados e compactadas em mesa vibratória. De cada molde foram confeccionados 3 tubos de ensaio medindo 4 x 4 x 16 cm³. Uma vez niveladas as massas frescas nas formas, elas foram colocadas em câmara úmida até o dia seguinte (24 horas), quando foram retiradas para serem retiradas da forma e corretamente etiquetadas. Posteriormente, as amostras continuaram a cura em câmara húmida (100% HR) e a 20 °C durante 28 dias, de acordo com a UNE-EN 196-1:2018. Após 28 dias de cura, foram realizados ensaios de caracterização mecânica em 3 corpos de prova, 6 corpos de prova foram instrumentados para ensaios de condutividade e piezo resistividade e 6 corpos de prova foram preservados para ensaios de aquecimento.

2.2 Descrição do ensaio de percepção em câmara climática.

Previamente aos ensaios de percepção de deformação, os corpos de prova foram instrumentados para possibilitar o registro das medidas, com o método de quatro pontos. Esta instrumentação consiste na pintura de quatro faixas perimetrais com tinta prata (Prata Condutiva RS 186-3600 de componentes RS), sobre quatro cabos de cobre, previamente enrolados perimetralmente conforme esquema da Figura 1.

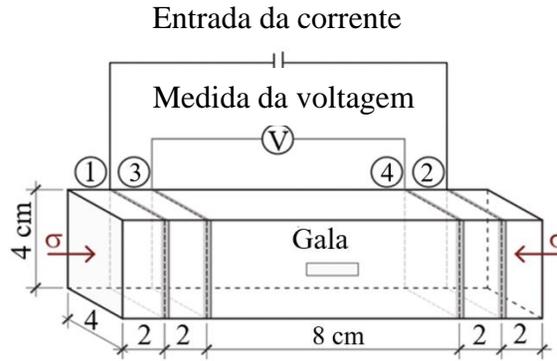


Figura 1. Esquema da instrumentação de corpos de prova para ensaios de resistividade.

Os eletrodos assim fixados constituem as conexões elétricas para a aplicação de uma corrente elétrica predefinida entre os pontos exteriores ① e ②, ao mesmo tempo em que se registra a diferença de potencial medida entre os pontos interiores ③ e ④. A corrente elétrica foi aplicada por meio de uma fonte digital Keithley 6220, da National Instruments Inc. A diferença de potencial foi medida com um multímetro digital Keithley 2002, da National Instruments Inc. Extensômetros de 10 mm (modelo 10/120 CLY41-4L-3M, fornecidos pela HBM) foram utilizados para registrar as deformações causadas tanto pelas tensões quanto pelo incremento de temperatura durante o ensaio.

Os ensaios foram realizados em uma prensa mecânica controlando a carga e a velocidade de aplicação da mesma com uma câmara climática modelo MUF 401, fornecida pela Servosis. A temperatura do ar dentro desta câmara pode ser controlada em um intervalo de temperaturas entre $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $150\text{ }^{\circ}\text{C}$. A configuração de medida é representada no esquema da Figura 2. Além das deformações relacionadas à tensão aplicada, as amostras sofreram deformações térmicas adicionais devido a mudanças de temperatura. Para controlar esse efeito, uma segunda amostra (amostra de controle) foi colocada na câmara climática. Nesta amostra, nenhuma carga foi aplicada, mas seu extensômetro registrou as deformações térmicas, que foram posteriormente removidas das medições da amostra carregada. A temperatura ambiente e a temperatura da superfície de ambas as amostras foram medidas com sensores de temperatura do tipo Pt-100. Além disso, na amostra de controle, foi feito um pequeno furo para instalar um termopar em seu centro e possibilitar o controle de possíveis gradientes térmicos. Para limitar o efeito da perda de água relacionada ao aquecimento da amostra, as temperaturas foram fixadas entre $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (com incrementos de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$).

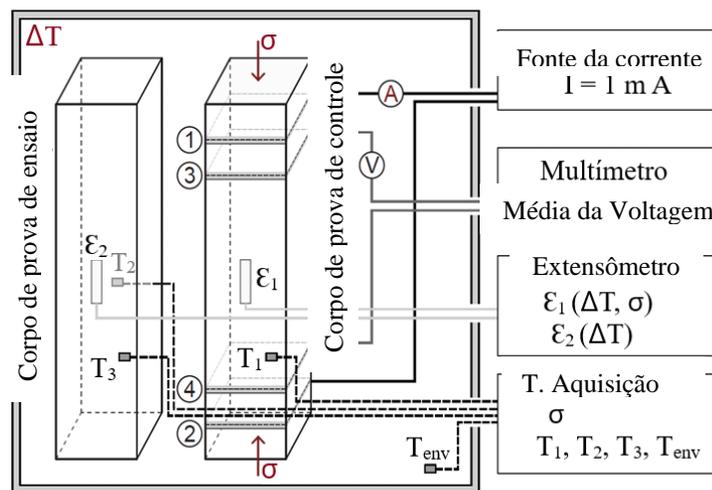


Figura 2. Esquema do ensaio dentro da câmara climática (del Moral et al, 2021).

2.3 Descrição de ensaio de calefação.

Os ensaios de aquecimento foram realizados em condições de laboratório, após o período de cura. Os ensaios consistiram em aplicar diferentes voltagens em corrente alternada e corrente contínua entre os dois extremos das amostras condutoras (4 x 4 cm²). Anteriormente, uma camada de tinta condutora de prata foi aplicada para melhorar o contato elétrico entre os eletrodos primários (placa de cobre com 0,5 mm de espessura e feltro de carbono com 2 mm de espessura) e o material cimentício. A montagem pode ser observada na Figura 3.

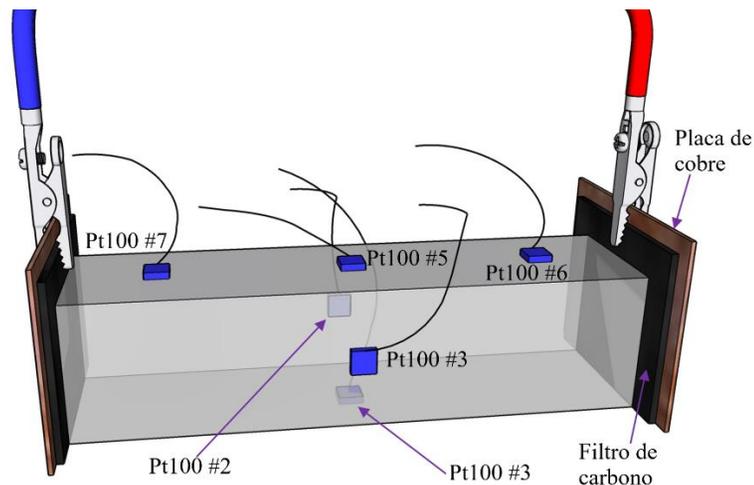


Figura 3. Esquema de uma amostra de 4 x 4 x 16 cm³ preparada para ser testada

As mudanças de temperatura na superfície das amostras foram registradas continuamente por meio de 6 sensores de temperatura de resistência do tipo Pt-100 conectados a um registrador de dados, e outros dois sensores Pt-100 foram colocados para monitorar a temperatura ambiente. Os ensaios de aquecimento foram realizados aplicando diferentes voltagens. Quanto maior a voltagem aplicada, mais alta foi a temperatura registrada. Foram aplicadas diferentes voltagens com uma fonte de alimentação contínua (DC) e uma fonte de alimentação alternada F5V (AC, a 50 Hz). Em ambos os casos, a corrente elétrica foi medida com multímetros digitais Keithley 2002.

3. RESULTADOS

3.1 Resultados dos ensaios de percepção a diferentes temperaturas.

Foi estudada a influência da temperatura em ensaios isolados, variando entre 0 °C e 60 °C. A Tabela 1 resume os parâmetros relevantes dos ensaios realizados em dias diferentes para 0 °C, 20 °C, 40 °C e 60 °C. As amostras retornavam à temperatura ambiente naturalmente, e no dia seguinte procedia-se à realização da próxima temperatura.

Tabela 1. Efeito da temperatura em diferentes parâmetros eletromecânicos durante os ensaios de percepção de deformação: resistividade elétrica, módulo elástico, fator de galga e coeficiente R² de Pearson da regressão linear.

Temperatura	Resistividade elétrica (ohm·cm)	Módulo Elástico (GPa)	Fator de Galga (FG)	R ²
0 °C	43.70	26.20	14.30	0.968
20 °C	43.80	26.00	17.40	0.971
40 °C	44.18	23.60	22.30	0.975
60 °C	45.70	23.10	58.80	0.888

Houve um leve aumento na resistividade com a temperatura, de 43,7 Ohm·cm a 0 °C para 45,7 Ohm·cm a 60 °C. Em outro estudo, também não foram relatadas mudanças significativas na condutividade no intervalo entre 50 e 115 °C (Demircilioğlu et al., 2019).

Por outro lado, a resposta mecânica foi semelhante em todos os ensaios, com módulos elásticos entre 23 e 26 GPa (descartando qualquer dano estrutural durante os processos de carga ou aquecimento) (del Moral et al., 2021). No entanto, houve mudanças significativas na resposta piezorresistiva (ver Figura 4) e o fator de galga (FG) a 60 °C foi quatro vezes o FG a 0 °C. Observou-se uma clara tendência de aumento no FG ao aquecer, especialmente no último nível de temperatura. Nenhuma medida específica foi tomada para evitar a troca de umidade entre as amostras e o ambiente. A Figura 4 apresenta graficamente os fatores de galga nas diferentes temperaturas ensaiadas.

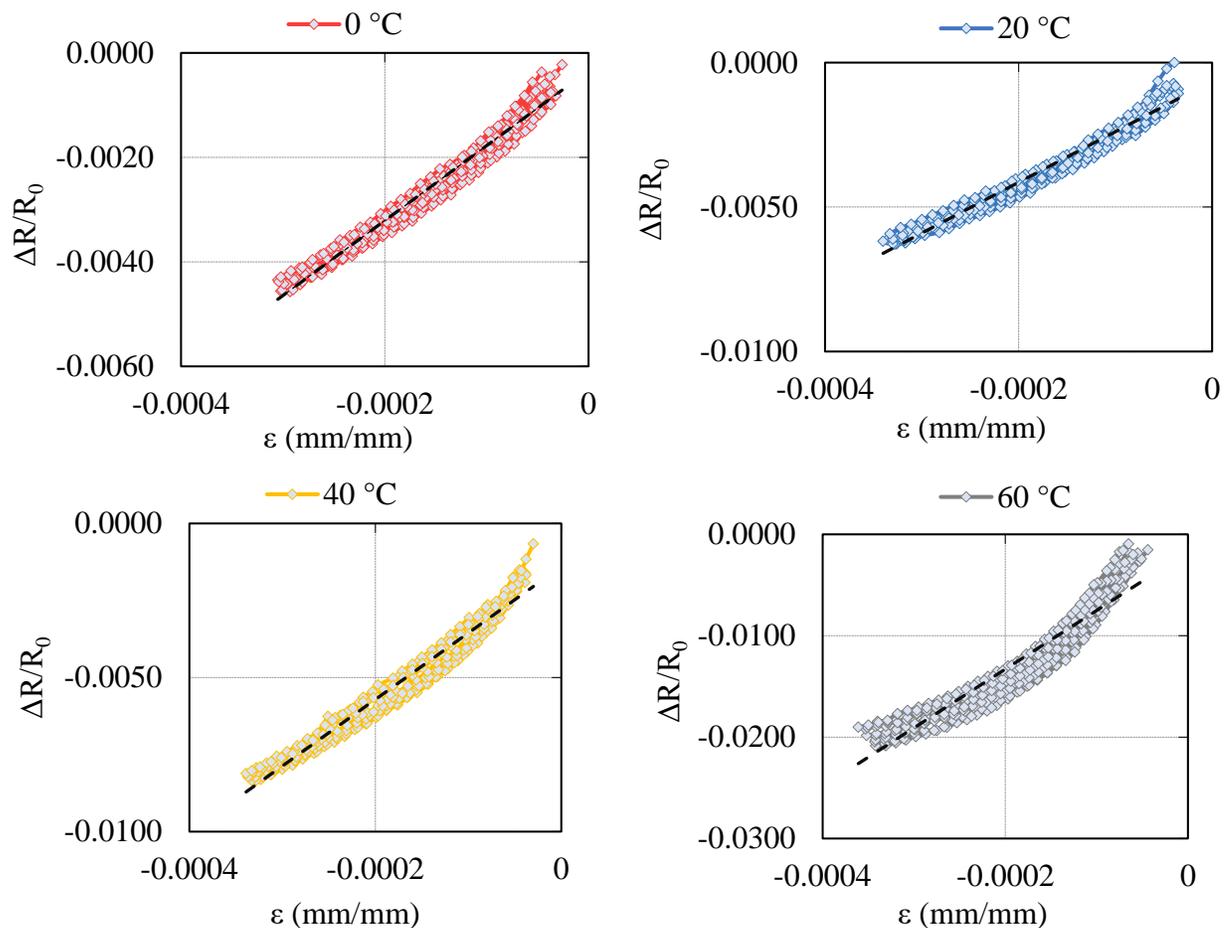


Figura 4. Resposta piezorresistiva da pasta com 1% NTC e 5% ABG1010 a diferentes temperaturas: 0 °C, 20 °C, 40 °C e 60 °C. São representadas as mudanças na resistência elétrica em relação à deformação para obter o fator de galga.

Em pesquisas anteriores (Gomis et al., 2015), Gomis determinou que a 60°C havia um ponto de inflexão nessas mudanças de umidade, e durante os ensaios de aquecimento observou-se que a água dos poros nos materiais cimentícios poderia passar por uma mudança de estado e começar a evaporar. Essa modificação na solução dos poros pode ter afetado o equilíbrio entre as conduções eletrolíticas e eletrônicas, melhorando o desempenho da percepção da deformação nos ensaios após uma pequena secagem (Allam et al., 2020; Chung, 2004; Vilaplana et al., 2013).

Além disso, de acordo com Shifeng (Shifeng et al., 2007), a temperatura pode aumentar o efeito túnel na faixa abaixo de 100 °C, pois os elétrons transformam a energia térmica em energia cinética. Além do limite de 100-130 °C, são obtidos valores de resistividade mais altos, devido à pressão de poros interna decorrente do aumento do vapor d'água.

Em nosso caso, as amostras foram aquecidas a uma temperatura máxima de 60 °C, com consequente secagem superficial. Portanto, a mobilidade do elétron aumentou devido a uma melhor condução eletrônica e ao efeito túnel, o que pode ter resultado em uma resposta piezorresistiva aprimorada nessas temperaturas.

3.2 . Resultados dos ensaios de calefação.

A Figura 5 mostra os resultados obtidos para a pasta de cimento com 1% de NTC e 5% de ABG1010, aplicando uma tensão de 20 V AC e DC. Os valores médios de temperatura da amostra para ambos os ensaios em °C e a corrente monitorizada (linhas pontilhadas) em amperes (A) são exibidos. Nestes ensaios, foi alcançado um aumento de temperatura de +17 °C para ambos os tipos de corrente, o que poderia ser uma variação suficiente para a aplicação de sistemas de degelo com temperatura ambiente superior a -15 °C.

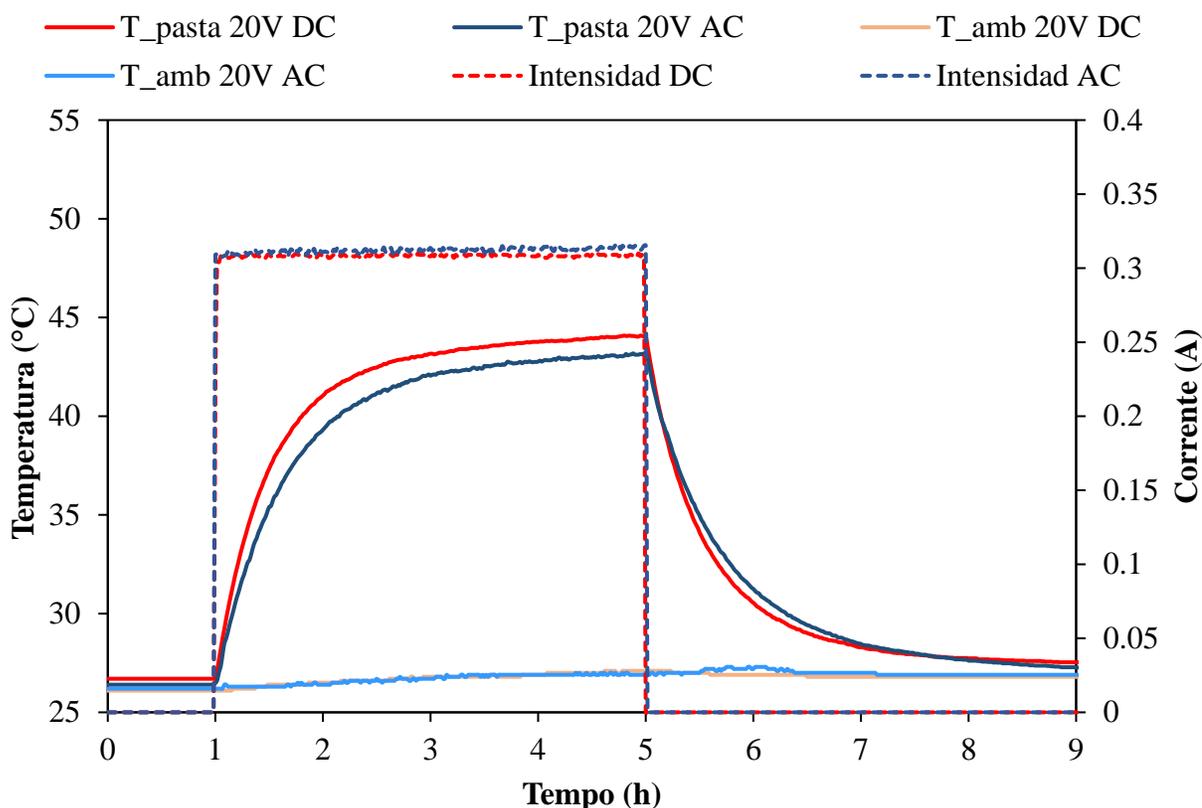


Figura 5. Temperatura ambiente (T_{amb}), temperatura média da amostra (T_{pasta}), ambas em °C, e a corrente monitorizada (linhas pontilhadas), em A, em função do tempo (em horas), para ensaios de aquecimento de pasta de cimento em AC e DC com uma voltagem fixa de 20 V.

A Figura 6 mostra a temperatura de seis ensaios de aquecimento com três amostras diferentes de amassadas distintas com a mesma voltagem (40 V) em DC e AC. Como pode ser observado, os resultados são muito semelhantes, o que confirma a reprodutibilidade (mesmo comportamento de diferentes amostras no mesmo ensaio). Além disso, duplicar a tensão aplicada implica duplicar a corrente elétrica, refletindo uma resistividade constante dos compostos no intervalo de temperatura mostrado (Farcas et al., 2021).

Por outro lado, a temperatura máxima alcançada a 40 V (AC e DC) é aproximadamente 3,3 vezes maior do que a temperatura máxima alcançada a 20 V (AC e DC). Esse achado destaca a influência significativa da voltagem no aumento da temperatura da pasta de cimento durante os ensaios de aquecimento, fornecendo informações valiosas para o design e controle de sistemas de aquecimento elétrico em aplicações semelhantes.

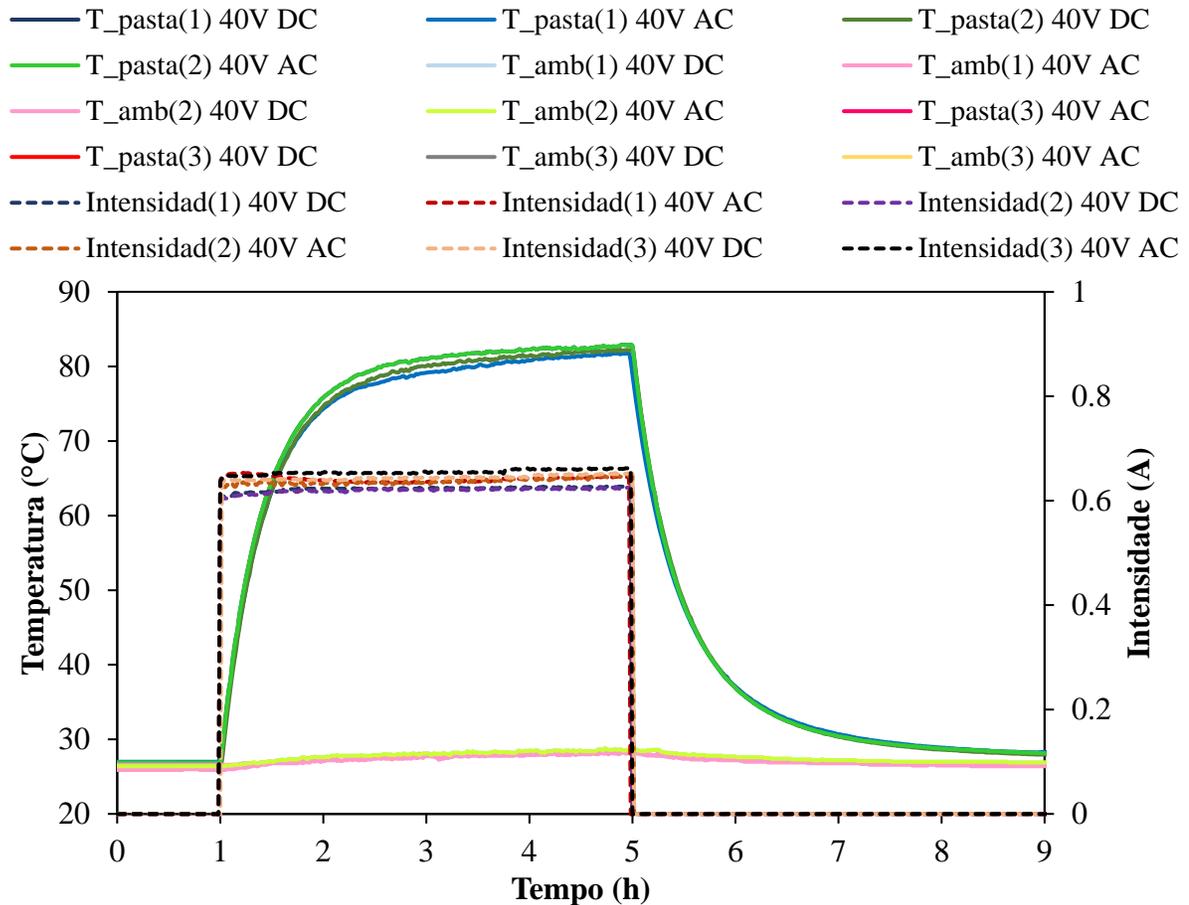


Figura 5. Temperatura ambiente (T_{amb}), temperatura média da amostra (T_{pasta}), ambas em $^{\circ}C$, e corrente (linhas tracejadas), em A, em função do tempo (em horas), para ensaios de aquecimento de pasta de cimento em CA e CC com temperatura fixa tensão de 40 V.

Tabela 2. Resumo das características elétricas (resistividade, tipo de corrente e tensão aplicada), variação de temperatura e potência média

Resistividade (ohm·cm)	AC/DC	Voltagem (V)	Intensidade (A)	ΔT ($^{\circ}C$)	Potência média (W/m^2)
67	DC	20	0.33	17.10	304
64	AC	20	0.31	17.00	310
64	DC	40	0.64	53.60	1267
67	DC	40	0.62	53.20	1228
67	DC	40	0.62	54.30	1224
66	AC	40	0.63	54.40	1230
64	AC	40	0.64	54.80	1273
63	AC	40	0.65	55.70	1294

A Tabela 2 resume as características elétricas (resistividade, tipo de corrente e tensão fixa aplicada), variação de temperatura e a característica energética, a potência média, dos ensaios de aquecimento. Em todos os casos, aumentos elevados de temperatura podem ser obtidos com tensão e corrente elétrica relativamente pequenas. Na verdade, o tipo de corrente aplicada não parece desempenhar um papel importante no comportamento térmico e no desempenho energético deste material. A resistividade das amostras permanece estável sob todas as condições.

4. CONCLUSÕES

- Foi verificada a viabilidade da utilização de sensores de pasta de cimento na função de percepção de deformação em diferentes temperaturas.
- Verifica-se um ligeiro aumento da resistividade com a temperatura nos ensaios de percepção de deformação. Além disso, o aumento da temperatura (entre 0 e 60 °C) levou a valores mais elevados de TFG.
- A viabilidade da função de aquecimento em pastas de cimento eletricamente condutoras foi comprovada graças à adição de 1% NTC + 5% ABG1010, aplicando tanto corrente contínua (DC) como corrente alternada (AC), com diferenças insignificantes no comportamento de ambas as correntes.
- Os resultados mostraram que as amostras de pasta de cimento, ao aplicar uma tensão de 20 V, conseguiram aumentar a sua temperatura em +17 °C. Portanto, esses compósitos seriam viáveis para aplicações de prevenção e degelo em locais com temperatura ambiente de -15 °C.

5. AGRADECIMENTOS

Esta investigação foi possível graças ao financiamento recebido de fundos europeus do projeto Grant Agreement 760940 MASTRO.

6. REFERÊNCIAS

- Allam, H., Duplan, F., Clerc, J. P., Amziane, S., Burtschell, Y. (2020). *About electrical resistivity variation during drying and improvement of the sensing behavior of carbon fiber-reinforced smart concrete*. In *Construction and Building Materials* (Vol. 264). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120699>
- Baeza, F. J., Galao, O., Zornoza, E., Garcés, P. (2013a). *Effect of aspect ratio on strain sensing capacity of carbon fiber reinforced cement composites*. *Materials and Design*, 51, 1085–1094. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.05.010>
- Baeza, F. J., Galao, O., Zornoza, E., Garcés, P. (2013b). *Multifunctional cement composites strain and damage sensors applied on reinforced concrete (RC) structural elements*. *Materials*, 6(3), 841–855. <https://doi.org/10.3390/ma6030841>
- Baeza, F. J., Ivorra, S., Bru, D., Varona, F. B. (2018). *Structural health monitoring systems for smart heritage and infrastructures in Spain*. *Intelligent Systems, Control and Automation: Science and Engineering*, 92, 271–294. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68646-2_12
- Banthia, F. A. and N. (n.d.). *Carbon Fiber-Reinforced Cementitious Composites for Tensile Strain Sensing*. *ACI Materials Journal*, 114(1). <https://doi.org/10.14359/51689486>
- Camacho-Ballesta, C., Zornoza, E., Garcés, P. (2016). *Performance of cement-based sensors with CNT for strain sensing*. *Advances in Cement Research*, 28(4), 274–284.

<https://doi.org/10.1680/adcr.14.00120>

- Carmona, J., Climent, M.-Á., Antón, C., De Vera, G., Garcés, P. (2015). *Shape Effect of Electrochemical Chloride Extraction in Structural Reinforced Concrete Elements Using a New Cement-Based Anodic System*. In *Materials* (Vol. 8, Issue 6). <https://doi.org/10.3390/ma8062901>
- Chung, D. D. L. (1998). *Self-monitoring structural materials*. 22.
- Chung, D. D. L. (2004). *Self-heating structural materials*. In *Smart Materials and Structures* (Vol. 13, Issue 3, pp. 562–565). <https://doi.org/10.1088/0964-1726/13/3/015>.
- del Moral, B., Galao, Ó., Antón, C., Climent, M. A., Garcés, P. (2013). *Viabilidad de utilización de una pasta de cemento con nanofibras de carbono como ánodo en la extracción electroquímica de cloruros en hormigón*. *Materiales de Construcción*, 63(309), 39–48. <https://doi.org/10.3989/mc.2012.03111>.
- del Moral, B., Baeza, F.J., Navarro, R., Galao, O., Zornoza, E., Vera, J., Farcas, C., Garcés, P. *Temperature and humidity influence on the strain sensing performance of hybrid carbon nanotubes and graphite cement composites*. *Construction and Building Materials* 284 (2021) 122786. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122786>.
- Demircilioğlu, E., Teomete, E., Schlangen, E., Baeza, F. J. (2019). *Temperature and moisture effects on electrical resistance and strain sensitivity of smart concrete*. In *Construction and Building Materials* (Vol. 224, pp. 420–427). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.091>.
- Ding, Y., Chen, Z., Han, Z., Zhang, Y., Pacheco-Torgal, F. (2013). *Nano-carbon black and carbon fiber as conductive materials for the diagnosing of the damage of concrete beam*. *Construction and Building Materials*, 43, 233–241. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.010>.
- Farcas, C., Galao, O., Navarro, R., Zornoza, E., Baeza, F. J., Del Moral, B., Pla, R., Garcés, P. (2021). *Heating and de-icing function in conductive concrete and cement paste with the hybrid addition of carbon nanotubes and graphite products*. *Smart Materials and Structures*, 30(4). <https://doi.org/10.1088/1361-665X/abe032>.
- Galao, O., Baeza, F. J., Zornoza, E., Garcés, P. (2014). *Strain and damage sensing properties on multifunctional cement composites with CNF admixture*. *Cement and Concrete Composites*, 46, 90–98. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.11.009>.
- Gomis, J., Galao, O., Gomis, V., Zornoza, E., Garcés, P. (2015). *Self-heating and deicing conductive cement. Experimental study and modeling*. *Construction and Building Materials*, 75, 442–449. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.042>.
- Han, B., Ding, S., Yu, X. (2015). *Intrinsic self-sensing concrete and structures: A review*. *Measurement*, 59, 110–128. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.09.048>.
- Li, H. N., Li, D. S., Song, G. B. (2004). *Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering*. *Engineering Structures*, 26(11), 1647–1657. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2004.05.018>.
- Liu, Q., Schlangen, E., García, Á., van de Ven, M. (2010). *Induction heating of electrically conductive porous asphalt concrete*. *Construction and Building Materials*, 24(7), 1207–1213. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.12.019>.
- Materials, C., Publishers, K. A. (2001). *Functional properties of cement-matrix*. 6, 1315–1324.
- Shifeng, H., Dongyu, X., Jun, C., Ronghua, X., Lingchao, L., Xin, C. (2007). *Smart properties of carbon fiber reinforced cement-based composites*. *Journal of Composite Materials*, 41(1), 125–131. <https://doi.org/10.1177/0021998306063378>.
- Song, G., Mo, Y. L., Otero, K., Gu, H. (2006). *Health monitoring and rehabilitation of a concrete structure using intelligent materials*. *Smart Materials and Structures*, 15(2), 309–314. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/15/2/010>.
- Ubertini, F., Laflamme, S., Ceylan, H., Luigi Materazzi, A., Cerni, G., Saleem, H., D’Alessandro, A., Corradini, A. (2014). *Novel nanocomposite technologies for dynamic monitoring of structures:*

- a comparison between cement-based embeddable and soft elastomeric surface sensors*. Smart Materials and Structures, 23(4), 45023. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/23/4/045023>.
- Ubertini, F., Laflamme, S., D'Alessandro, A. (2016). *Smart cement paste with carbon nanotubes*. In Innovative Developments of Advanced Multifunctional Nanocomposites in Civil and Structural Engineering (pp. 97–120). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-326-3.00006-3>.
- Vilaplana, J. L., Baeza, F. J., Galao, O., Zornoza, E., Garcés, P. (2013). *Self-sensing properties of alkali activated blast furnace slag (BFS) composites reinforced with carbon fibers*. Materials, 6(10), 4776–4786. <https://doi.org/10.3390/ma6104776>.
- Wang, S., Wen, S., Chung, D. (2004). *Resistance Heating Using Electrically Conductive Cements*. Advances in Cement Research - ADV CEM RES, 16, 161–166. <https://doi.org/10.1680/adcr.16.4.161.46662>.
- Yehia, S., Tuan, C. Y., Ferdon, D., Chen, B. (2000). *Conductive concrete overlay for bridge deck deicing: Mixture proportioning, optimization, and properties*. ACI Structural Journal, 97(2), 172–181. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0034161181&partnerID=40&md5=2b2d7c46c87b0e36654bccde13f559a3>.
- Zhang, K., Han, B., Yu, X. (2011). *Nickel particle based electrical resistance heating cementitious composites*. Cold Regions Science and Technology, 69(1), 64–69. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2011.07.002>