

## Concretos condutores multifuncionais: avanços, aplicações e desafios para uma infraestrutura inteligente.

P. Garcés Terradillos<sup>1\*</sup> , O. Galao<sup>1</sup> , F. Ubertini<sup>2</sup> 

\* Autor de Contato: [pedro.garces@ua.es](mailto:pedro.garces@ua.es)

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v16i1.876>

Recebido: 15/07/2025 | Correções recebidas: 24/11/2025 | Aceito: 08/12/2025 | Publicado: 01/01/2026

### RESUMO

Este artigo apresenta os fundamentos e a evolução das pesquisas sobre as principais funcionalidades desenvolvidas com materiais cimentícios condutivos. Concretos condutivos multifuncionais representam uma inovação no campo dos materiais cimentícios, apresentando não apenas capacidades estruturais, mas também propriedades elétricas, térmicas e sensoriais, atuando como materiais auto-sensores. As funções propostas são: a) Função de percepção de deformações e danos estruturais: capacidade de detectar deformações e danos em uma estrutura submetida a esforços, sem a necessidade de sensores aderidos ou embutidos no material. b) Função de aquecimento e degelo por efeito Joule: utilizada em aplicações como aquecimento resistivo (por exemplo, degelo ou aquecimento de edificações e infraestruturas). c) Função de blindagem contra interferência eletromagnética (EMI): baseada no efeito de blindagem que a própria estrutura condutiva exerce sobre o campo eletromagnético que a atravessa.

**Palavras-chave:** concreto condutivo, multifuncionalidade, piezoresistividade, aquecimento e descongelamento, blindagem.

**Citar como:** Garcés Terradillos, P., Galao, O., Ubertini, F. (2026), “Concretos condutores multifuncionais: avanços, aplicações e desafios para uma infraestrutura inteligente.”, Revista ALCONPAT, 16 (1), pp. 23 – 41, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v16i1.876>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Alicante, España.

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Civil y ambiental de la Universidad de Perugia, Italia.

### Contribuição de cada autor

Neste trabalho, o autor Garcés contribuiu com 50% com a ideia original, coleta de dados, redação, discussão e conclusões, e os autores Galao e Ubertini contribuíram com 25% para as mesmas atividades, respectivamente.

### Licença Creative Commons

Copyright (2026) 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 do ano 2026, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do segundo número do ano de 2026.

## Multifunctional conductive concretes: advances, applications, and challenges for smart infrastructure.

### ABSTRACT

This article presents the foundations and evolution of research into the main functionalities developed using conductive cementitious materials. Multifunctional conductive concrete represents an innovation in the field of cement-based materials, exhibiting not only structural capabilities but also electrical, thermal, and sensing functions. The addressed functions are: a) strain and structural damage sensing in a load bearing structure without the need for any attached or embedded sensor; b) heating and de-icing function through the Joule effect, for applications such as surface de-icing or building heating; and c) electromagnetic interference (EMI) shielding provided by the conductive structure itself.

**Keywords:** conductive concrete, multifunctionality, piezoresistivity, heating and defrosting, shielding.

### Hormigones conductores multifuncionales: avances, aplicaciones y desafíos para una infraestructura inteligente.

### RESUMEN

Este artículo plantea el fundamento y evolución en la investigación desarrollada de las principales funciones desarrolladas con materiales cementicios conductores. Los hormigones conductores multifuncionales representan una innovación en el campo de los materiales cementicios, con capacidades no solo estructurales, sino también eléctricas, térmicas y como sensor. Las funciones planteadas son: a) Función de percepción de la deformación y del daño estructural de una estructura al estar sometida esfuerzos, sin llevar algún sensor adherido o embebido en él mismo. b) Función de calefacción y deshielo por efecto Joule para aplicaciones como deshielo o calefacción en edificaciones. c) Función de apantallamiento de campos electromagnéticos (EMI) de la propia estructura conductora.

**Palabras clave:** hormigón conductor, multifuncionalidad, piezorresistividad, calefacción y deshielo, apantallamiento.

### 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. +52 1 983 419 8241, [alconpat.int@gmail.com](mailto:alconpat.int@gmail.com), Website: [www.alconpat.org](http://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

Por quase 2000 anos, o concreto tem sido usado principalmente como material estrutural, valorizado sobretudo por sua capacidade de suportar cargas. Como material dielétrico, ou seja, um mau condutor de eletricidade, a adição de materiais condutores como fibra de carbono, pó de grafite ou fibras de aço o transforma em um material condutor, permitindo que ele desempenhe funções além de seu papel estritamente estrutural — em outras palavras, que se torne um material multifuncional. Entre as funções que um material cimentício condutor pode desempenhar estão as seguintes:

- a) Função de perceber a deformação** no regime elástico de uma estrutura quando submetida a tensão, sem que haja qualquer sensor acoplado ou embutido nela (D'Alessandro et al. 2016).
- b) Função de percepção de danos estruturais.** A detecção em tempo real permite diferenciar entre danos estacionários, em evolução, permanentes ou reversíveis (Baeza et al. 2013; Chung, 2024; Galao et al. 2014; Konsta-Gdoutos and Aza, 2014).
- c) Função de aquecimento e descongelamento.** Aquecimento por resistência (por exemplo, descongelamento e aquecimento em edifícios, (Anur Oumer et al. 2024; D.D.L. Chung, 2004a; Yehia and Tuan 1999)).
- d) Função de blindagem EMI.** Esta função baseia-se na blindagem que uma estrutura condutora exerce sobre o campo eletromagnético que a atravessa. (Chung, 2000; Kumar et al. 2021; Zornoza et al. 2010).
- e) Função anódica para extração eletroquímica de cloreto e proteção catódica.** Esta função baseia-se na utilização de uma pasta de cimento condutora que atua como ânodo para a aplicação da técnica de extração eletroquímica de cloreto e proteção catódica (Bertolini et al. 2004; J. Carmona, Garcés, and Climent, 2015; Pérez, Climent, and Garcés, 2010; Tritthart, 1998; Vennesland and Opsahl, 1989).

Os materiais cimentícios têm recebido considerável atenção devido às suas propriedades mecânicas e à sua importância como materiais estruturais. No entanto, a necessidade de um material estrutural capaz de incorporar funções não estruturais, mantendo boas propriedades estruturais, é cada vez mais reconhecida. Isso ocorre porque o uso de um material estrutural multifuncional (ou seja, um material estrutural que incorpora um material funcional não estrutural) em vez de uma combinação de materiais funcionais e não estruturais reduz custos, melhora a durabilidade e a reparabilidade, aumenta o volume funcional, previne a degradação mecânica e simplifica o projeto (Chung, 2024). O concreto condutor multifuncional foi desenvolvido em resposta à necessidade de materiais estruturais capazes de interagir ativamente com o ambiente. Essa capacidade é alcançada pela incorporação de aditivos condutores na matriz cimentícia, permitindo que o concreto não apenas suporte cargas, mas também transmita sinais elétricos, gere calor ou funcione como um sensor para aplicações de monitoramento da integridade estrutural (SHM). Essa multifuncionalidade o posiciona como um componente-chave no desenvolvimento de infraestruturas inteligentes e resilientes (Qin et al. 2024). Sua implementação em larga escala ainda enfrenta desafios significativos, como o custo dos materiais nanoestruturados, a necessidade de eletrodos com fios e a dificuldade de se obter uma dispersão uniforme dos aditivos condutores (ver Figura 1).

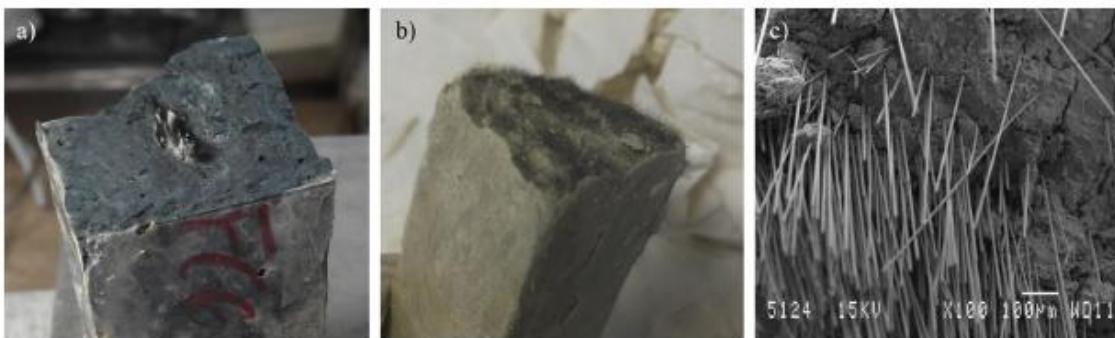


Figura 1. a) Aglomeração de fibras devido à má dispersão das mesmas. (b) Amostra com orientação preferencial das fibras ao longo do eixo longitudinal. (c) Imagem de SEM de uma pasta de cimento alcalino com fibras de carbono.(Vilaplana et al. 2016).

No entanto, os avanços na pesquisa de materiais e nos processos de construção oferecem uma perspectiva promissora para a sua adoção. O desenvolvimento desses materiais terá impacto em indústrias relacionadas à construção, aquecimento, transporte de energia, usinas elétricas, telecomunicações, eletrônica e segurança (Segundo et al. 2021; Song, Li, and Xu, 2024).

## 2. PIEZORESISTIVIDADE EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS CONDUTORES: SENSORES DE DEFORMAÇÃO E DANO.

A percepção de deformação é a capacidade de um material estrutural detectar sua própria deformação quando submetido a uma carga externa. A percepção de deformação (que está relacionada à percepção de tensão, mas difere da percepção de danos) é importante em áreas como monitoramento de vibração estrutural (SHM) e monitoramento e controle de tráfego.

As aplicações convencionais de sensores de deformação variam desde sensores para componentes nas indústrias aeroespacial ou automotiva até sensores para estruturas de engenharia civil, como viadutos, e até mesmo sensores de controle de peso em rodovias que não exigem que os veículos parem. Na primeira categoria, tendem a ser usados sensores pequenos (geralmente pastas de cimento ou argamassas), que competem com sensores de pressão de silício. Nos outros casos, podem ser usados sensores maiores (por exemplo, elementos pré-fabricados de concreto ou argamassa), que competem com sensores acústicos, de silício, pneumáticos ou indutivos (Baeza et al. 2011; Ivorra et al. 2010; Shi and Chung, 1999).

Tem-se observado que materiais cimentícios com adição de fibras curtas de carbono, nanofibras de carbono ou nanotubos de carbono são capazes de detectar sua própria deformação (ver Figura 2). Isso é possível devido às variações em sua resistividade elétrica (Camacho-Ballesta et al. 2016). Em testes de laboratório, registrou-se que, sob tensão de tração, a resistividade aumenta devido à abertura de microfissuras ou mesmo ao desprendimento de fibras na matriz. Isso é possível graças às variações em sua resistividade elétrica (Han, Ding, and Yu, 2015). Por outro lado, quando o material é submetido a tensão de compressão, obtém-se o efeito oposto: uma diminuição da resistividade, relacionada ao reacoplamento das fibras à medida que as microfissuras se fecham. Esse fenômeno eletromecânico é conhecido como piezoresistividade e permite o uso de medições de resistência elétrica (tanto em corrente contínua, DC, quanto em corrente alternada, AC) para monitorar o estado de deformação dos corpos de prova, com o próprio material cimentício atuando como um sensor de deformação.

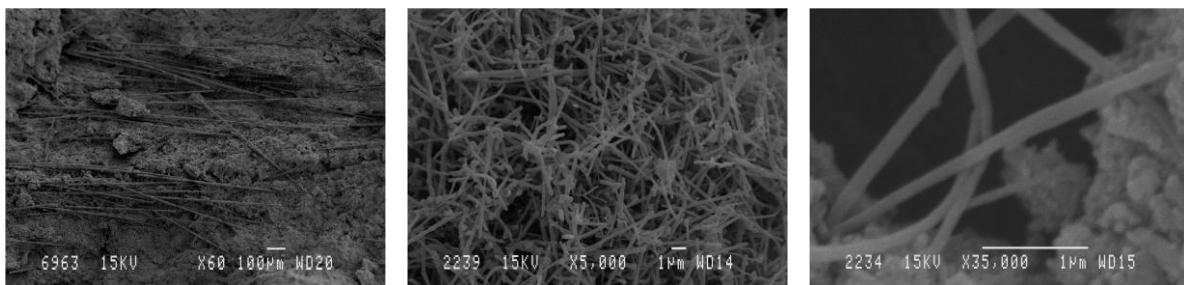


Figura 2. Imagens de fibras de carbono (esquerda) e nanofibras de carbono (centro e direita) incorporadas em matrizes cimentícias.

Um dos parâmetros mais interessantes do fenômeno de percepção de deformação é a quantidade máxima e mínima de material condutor necessário para observar esse comportamento. O *limiar de percolação* é definido como a quantidade mínima de fibras necessária para produzir um caminho condutor contínuo através do material, ou seja, para garantir o contato entre as fibras sem descontinuidades. Acima desse ponto, adições adicionais de material condutor não resultam em variações significativas na condutividade elétrica do material. O limiar de percolação é normalmente expresso como uma porcentagem em massa ou volume em relação à quantidade de cimento na mistura. Antes de atingir o limiar de percolação, com pequenas quantidades de adições condutoras, a resistividade elétrica do compósito diminui acentuadamente (ver Figura 3), e a resistividade do material pode atingir a ordem de alguns ohm·cm em alguns casos. No caso de fibras de carbono curtas, para uma dada porcentagem em volume, o limiar de percolação depende em grande parte do comprimento das fibras utilizadas e da relação de aspecto, e geralmente fica entre 0,1% e 0,5% em volume. À medida que o comprimento da fibra aumenta, o limiar de percolação diminui. É importante ressaltar que atingir o limiar de percolação não é essencial para obter a detecção de deformação no material compósito, visto que altas condutividades não são necessárias para observar o comportamento piezoresistivo. (Baeza et al. 2010).

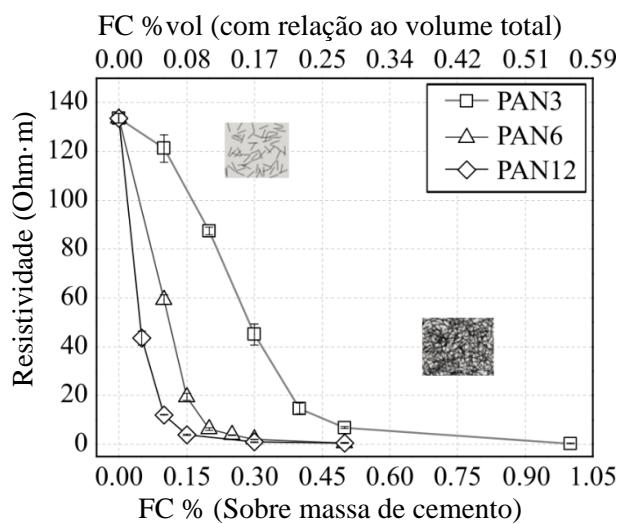


Figura 3. Detecção do limiar de percolação por meio da resistividade em uma pasta de cimento com a adição de fibras de carbono de 3 mm, 6 mm e 12 mm de comprimento. FC % corresponde à porcentagem de adição de fibra de carbono e PAN refere-se ao tipo de fibra de carbono identificado por seu precursor (poliacrilonitrila).

Em particular, a sensibilidade à deformação ideal — definida como a variação relativa da resistividade por unidade de deformação — é tipicamente alcançada próximo ao limiar de percolação. Acima desse ponto, a sensibilidade à deformação tende a diminuir à medida que a rede

condutora se torna mais estável e menos sensível à deformação. (García-Macías et al. 2017). As fibras não são os sensores; elas simplesmente aumentam a piezoresistividade do material compósito, que é o sensor propriamente dito. Portanto, o uso de material menos condutor é sempre preferível, pois leva a custos de fabricação mais baixos e melhor trabalhabilidade. A Figura 4 mostra um exemplo de como a resistência elétrica do material cimentício condutor se relaciona com a tensão e a deformação a que é submetido em ensaios de compressão sob condições elásticas (del Moral et al. 2021). Observa-se uma correlação quase perfeita entre os parâmetros mecânicos e elétricos. Isso permitiria, claramente, a determinação bastante precisa do estado de tensão de um elemento estrutural, conhecendo-se sua resistência elétrica em um dado momento.

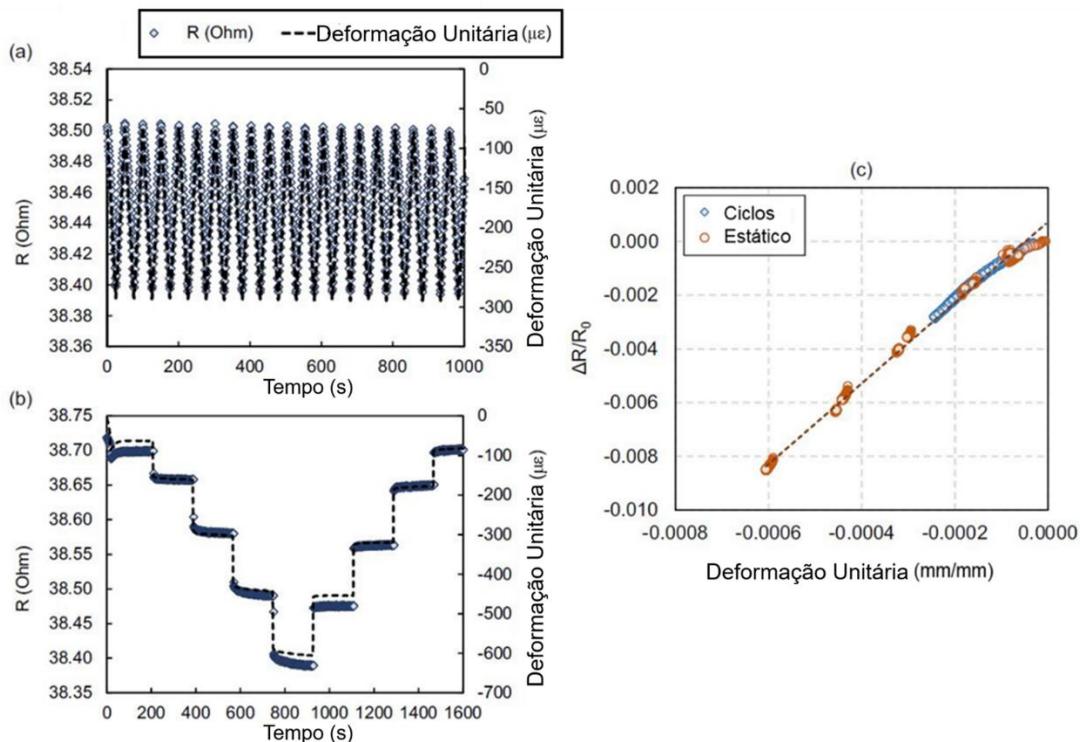


Figura 4. Testes de percepção de deformação com pastas de cimento dopadas com adições híbridas (1% de nanotubos de carbono e 5% de pó de grafite) após 28 dias de cura em água saturada. (a) e (b) mostram a resistência elétrica (ohm) e a deformação (microdeformações unitárias) em função do tempo, para testes de carga e descarga cíclicas e para cargas estáticas, respectivamente; (c) mostra a variação fracionária da resistência elétrica ( $\Delta R/R_0$ ) em função da deformação (mm/mm). (Adaptado de del Moral et al. 2021)

Como mencionado anteriormente, o fator de calibre é usado para quantificar o nível de sensibilidade piezoresistiva de um material. Semelhante aos extensômetros (feitos de constantan ou níquel-cromo), o fator de sensibilidade do calibre é definido como uma constante  $K$ , que é a razão entre a variação unitária na resistividade e a deformação longitudinal unitária do fio quando o extensômetro é submetido à deformação. Matematicamente, o fator de calibre ( $\lambda$ ) é expresso como:

$$\lambda = \frac{\frac{d\rho}{dL}}{\frac{\rho}{L}}$$

sendo  $d\rho/\rho$  a mudança fracionária da resistividade elétrica, e  $dL/L$  corresponde à deformação axial no caso de um estado de tensão unidimensional.

A variação na resistividade elétrica de um material sob tensão deve-se à modificação da resistividade do material; ou seja, trata-se de uma propriedade intrínseca do material, que permite a observação desse comportamento. Na Figura 5 mostram-se diferentes métodos de aplicação dos chamados compostos cimentícios autodetectáveis (em bulk, ou seja, o próprio material estrutural sendo o sensor, com sensores contínuos nas faces superior e inferior, ou com pequenos sensores acoplados) (Han et al. 2015).

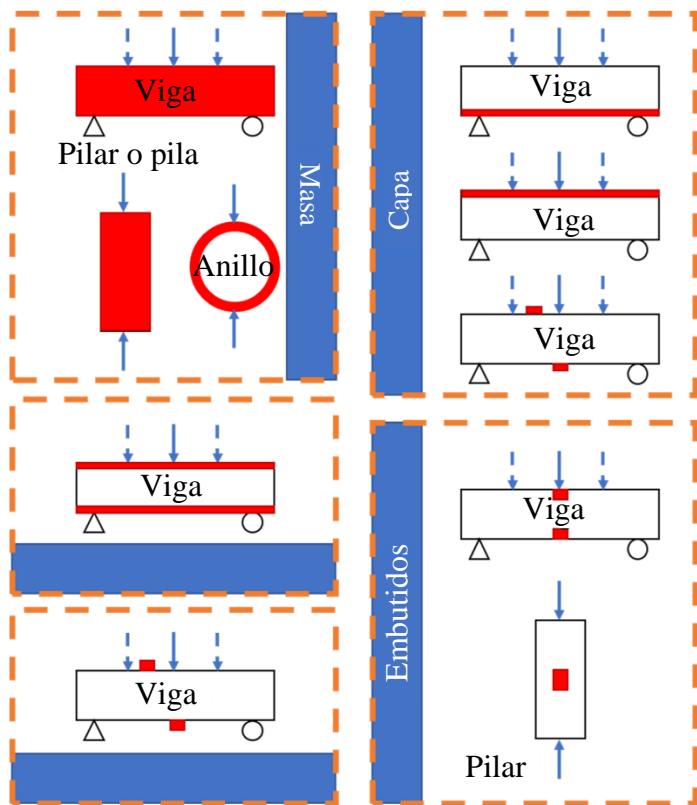


Figura 5. Métodos de aplicação de compostos cimentícios autodetectáveis, publicado por Han, B. et al., 2015, na Elsevier.(Adaptado de Han et al. 2015)

A detecção precoce de danos estruturais é fundamental para evitar maiores prejuízos à estrutura. Isso requer um sistema de detecção capaz de registrar os danos ao material em nível microscópico. Estudos recentes demonstraram que esses materiais podem ser integrados de forma eficiente às tecnologias de monitoramento e manutenção estrutural (SHM), reduzindo custos de manutenção e aumentando a segurança em tempo real (Baeza et al. 2013; Galao et al. 2014; Konsta-Gdoutos and Aza 2014).

Diversas aplicações foram desenvolvidas utilizando pastas condutoras como sensores em elementos estruturais reais. Por exemplo, Garcés et al. instrumentaram uma viga de concreto armado utilizando diferentes sensores de pasta de cimento com fibras curtas de carbono (ver Figura 6). A correlação linear entre deformação e resistividade elétrica é evidente (Garcés et al. 2010).

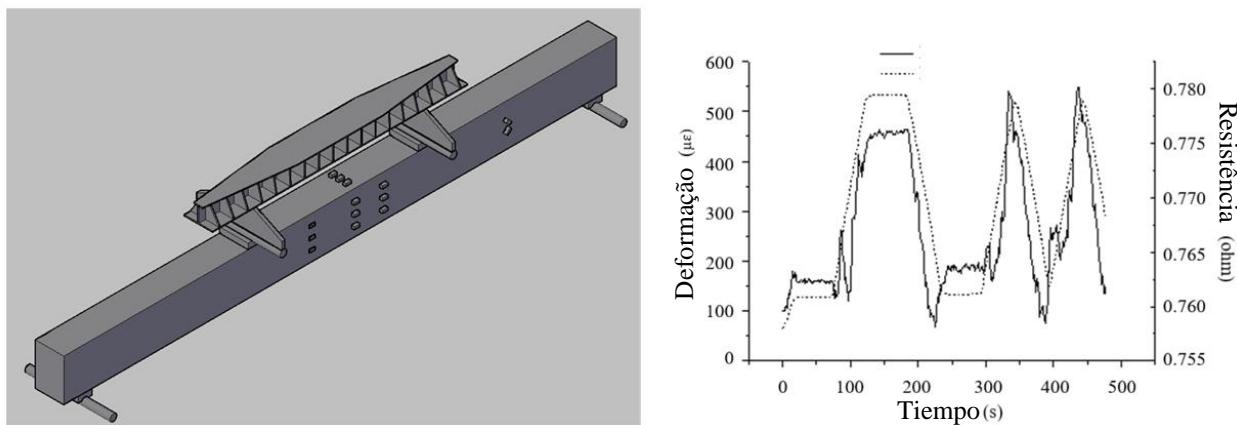


Figura 6. (esquerda) Disposição de extensômetros de pasta de cimento condutora em uma viga de concreto armado submetida a um ensaio de tração por flexão. (direita) Esquema do monitoramento da deformação e da resistência elétrica ao longo do tempo de um dos sensores fixados à viga ensaiada.

Como mencionado na introdução, o monitoramento de tráfego, parte essencial da gestão e controle de tráfego, envolve a visualização em tempo real do tráfego, exigindo sensores de deformação, que podem ser ópticos, elétricos, magnéticos ou acústicos. Esses sensores são normalmente fixados ou embutidos no pavimento das vias de transporte monitoradas. As limitações desse tipo de sensor são: (i) alcance limitado, (ii) baixa durabilidade e (iii) custo muito elevado para permitir o uso em larga escala. Graças a uma nova tecnologia, o próprio concreto pode ser usado como sensor, eliminando a necessidade de sensores fixados ou embutidos. Como o próprio material estrutural atua como sensor, toda a infraestrutura pode ser monitorada com alta durabilidade e um aumento mínimo de custo, superando as três limitações dos sensores tradicionais descritas acima (ver Figura 7 (Birgin et al. 2022; Han et al. 2015; Shi and Chung 1999).

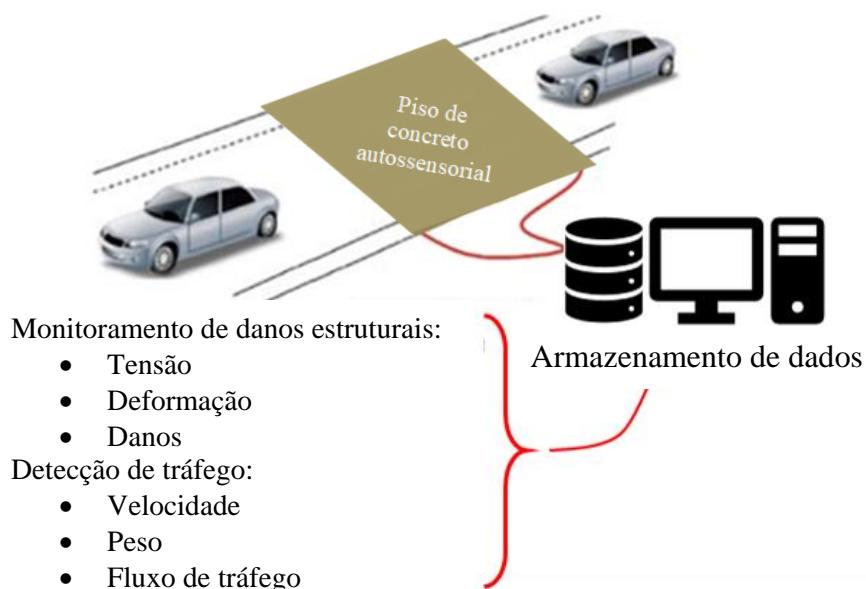


Figura 7. Diagrama esquemático da aplicação da função de percepção em pavimentos de concreto. (Adaptado de Han et al. 2015)

Uma nova aplicação da função de percepção foi desenvolvida por Garcia-Macias e Ubertini. (García-Macías and Ubertini 2019) Isso envolve o uso de tijolos inteligentes para monitorar

edifícios de alvenaria. Semelhantes ao concreto condutor, que é sensível às suas deformações, e incorporando cargas especiais de aço com alta resistência à temperatura, os tijolos piezoresistivos inteligentes podem ser usados como sensores de deformação, como mostrado na Figura 8.

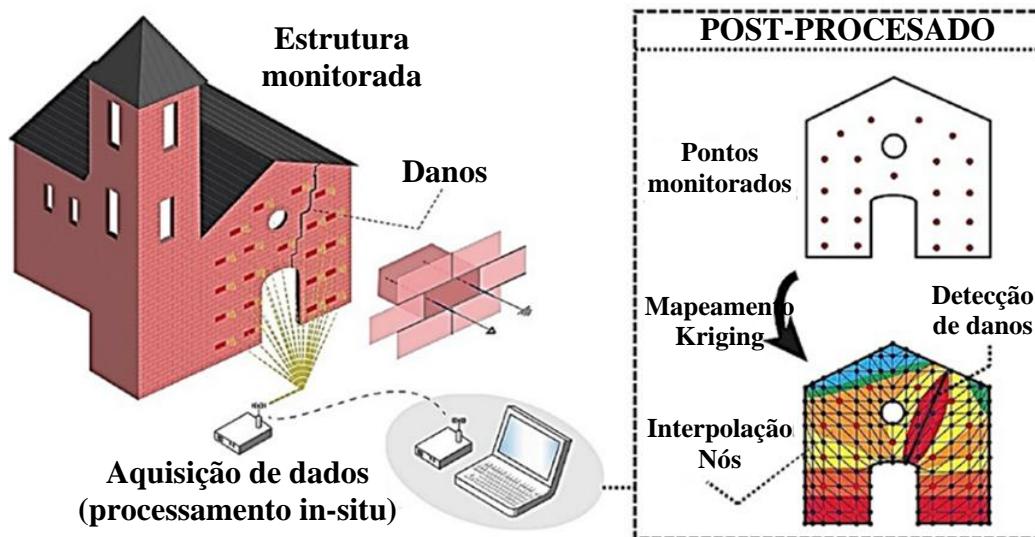


Figura 8. Esquema da aplicação de tijolos inteligentes para monitoramento do estado de estruturas de alvenaria. (Adaptado de García-Macías e Ubertini 2019)

Os resultados da simulação numérica demonstraram o potencial deste sensor para a detecção de danos em edifícios novos e existentes, o que é de grande interesse para a proteção de estruturas de alvenaria históricas (Downey et al. 2018; García-Macías and Ubertini, 2019). Recentemente, a validação em campo num edifício de alvenaria em escala real confirmou ainda mais a eficácia dos tijolos inteligentes para a monitorização estrutural e ambiental (SHM) em condições reais (Meoni et al. 2025).

### 3. FUNÇÃO DE AQUECIMENTO E DESCONGELAMENTO

Uma das funções mais promissoras que um material condutor à base de cimento pode desempenhar é o aquecimento. O aumento da temperatura do material baseia-se no efeito Joule quando uma corrente elétrica é aplicada, no qual o calor é gerado pela corrente que flui através de um condutor. A capacidade de geração de calor de materiais condutores de eletricidade à base de cimento está associada à sua resistência, conforme expresso pela primeira lei de Joule (Anur Oumer et al. 2024; Park et al. 2024). Controlando a potência elétrica fornecida, a temperatura do composto pode ser ajustada (ver Figura 9). Quando esse conceito é aplicado a materiais estruturais, é possível usar o próprio material para derreter gelo em sua superfície (ou para impedir sua formação) (Farcas et al. 2021).

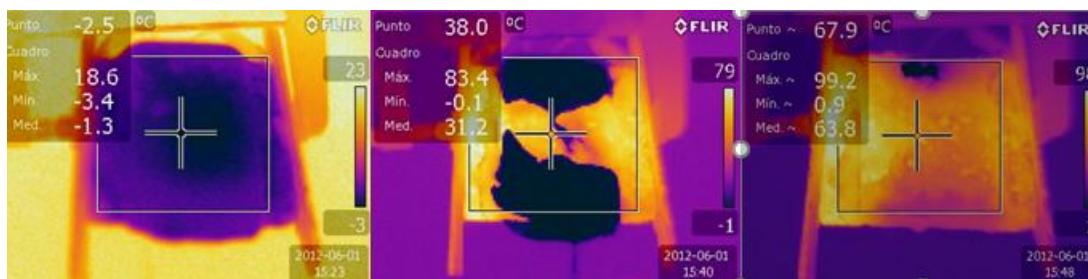


Figura 9. Monitoramento da evolução da temperatura usando uma câmera termográfica.

Os sistemas tradicionais de aquecimento de edifícios incluem tubulações subterrâneas, lâmpadas de calor infravermelho, fluidos aquecidos e energia solar. No entanto, esses sistemas são complexos de construir, caros e oferecem baixa integridade estrutural, limitando assim sua aplicação. Os compósitos multifuncionais à base de cimento exibem alta integridade estrutural com as estruturas originais (ver Figura 10). Ou seja, os danos induzidos pela expansão térmica durante o aquecimento são negligenciáveis, uma vez que seu coeficiente de expansão térmica é semelhante ao das estruturas cimentícias originais (Chung, 2004).



Figura 10. Aplicação real de descongelamento em pavimentos condutivos (Adaptado de Tuan and Yehia, 2004).

A utilização de materiais que podem aumentar sua temperatura em infraestruturas de transporte, como pontes ou aeroportos, evitaria o uso de sais corrosivos que poderiam danificar a armadura de aço, o próprio concreto e o ecossistema. Portanto, esses materiais poderiam ser viáveis para aumentar a temperatura ambiente de espaços, prevenir a formação de gelo ou promover o degelo em obras de engenharia civil, entre outras aplicações.

Os estudos iniciais sobre este tema destacaram o potencial dos (Chung, 2004b; Yehia and Tuan, 1999) compostos cimentícios condutores para aplicações de autoaquecimento utilizando o efeito Joule. Posteriormente, vários aditivos condutores foram incorporados em compostos cimentícios aquecíveis e extensos estudos experimentais foram conduzidos em laboratório (Farcas et al. 2021; Galao et al. 2016; Gomis et al. 2015) (ver Figura 11).

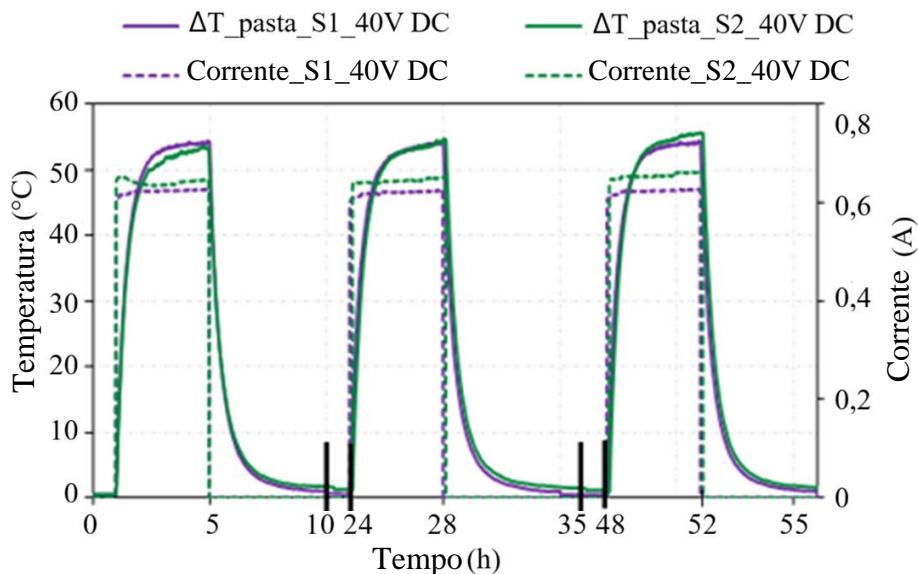


Figura 11. Variação da temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) e da corrente elétrica controlada (A) durante o ensaio, em função do tempo (h), de dois corpos de prova de pasta de cimento, para três ensaios consecutivos em corrente contínua a 40 V.(Farcas et al. 2021)

Diversos estudos confirmaram a eficácia desses materiais para aplicações de aquecimento e degelo (Rahman et al. 2022). No entanto, ainda existem desafios para sua aplicação em escala real. Por exemplo, o controle da temperatura do concreto por meio do desenvolvimento de misturas que otimizem sua resposta é crucial para evitar problemas de durabilidade na infraestrutura. Os estudos de Deng apresentaram uma abordagem inovadora para o controle ativo da temperatura no concreto, otimizando uma mistura autorregulável projetada para responder a variações extremas de temperatura. (Deng et al. 2023; Park et al. 2024) Eles também investigaram o uso de módulos de nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWCNTs) incorporados em placas de concreto para aplicações de degelo em larga escala, demonstrando com sucesso sua eficiência térmica em condições reais. Outro estudo interessante envolveu a instalação de uma rampa de estacionamento aquecida eletricamente com concreto aquecido na China, em condições de temperaturas muito baixas. As superfícies da rampa atingiram uma densidade de potência média de 200–300  $\text{W/m}^2$ , suficiente para a remoção eficaz do gelo em condições de inverno. (Rao et al. 2018; Sassani et al. 2018) Este estudo descreveu toda a sequência de projeto, produção, instalação e avaliação de desempenho do primeiro sistema de pavimento aquecido feito de concreto eletricamente condutor (ECON) com fibras de carbono em um aeroporto dos EUA. Para este projeto, foi selecionado o ECON reforçado com fibra de carbono, adequado para pistas de pouso e decolagem e pistas de táxi. Apesar da alta resistividade observada no ECON pré-misturado, o sistema de aquecimento instalado apresentou desempenho confiável em testes de inverno, gerando consistentemente uma densidade de potência superficial entre 300 e 350  $\text{W/m}^2$ , derretendo eficazmente o gelo e a neve acumulados. Em outro estudo, (Li et al. 2022) uma mistura de grafite e fibra de carbono foi incorporada como aditivos condutores, resultando em um concreto asfáltico condutivo. Isso possibilitou o derretimento do gelo e da neve acumulados na superfície de tabuleiros de pontes metálicas durante o inverno. Em 2022, os estudos de Li (Li et al. 2022) se concentraram em viabilizar o derretimento ativo de gelo e neve em superfícies de concreto asfáltico aplicadas sobre tabuleiros de pontes metálicas durante o inverno. Ao incorporar grafite e fibra de carbono como aditivos condutores, foi desenvolvida uma mistura de concreto asfáltico condutivo (CGA-10). O estudo examinou como a variação da quantidade desses componentes influencia a resistividade elétrica da mistura, bem como suas propriedades gerais de pavimentação. O desempenho térmico

foi avaliado por meio de testes de aquecimento, e a eficiência de degelo foi analisada em testes em ambiente controlado. A combinação de 0,4% de fibra de carbono e 30% de grafite estabeleceu com sucesso uma robusta rede condutora na matriz asfáltica. As fibras de carbono neutralizaram o impacto negativo do grafite no desempenho mecânico, reforçando a mistura sem comprometer a condutividade. Sob condições de teste, a mistura otimizada CGA-10 atingiu uma eficiência de conversão térmica de 78,85% e derreteu 50,03% do gelo em testes padronizados de degelo. A equipe da Faneca (Faneca et al. 2020) conduziu um estudo em 2020, tanto em laboratório quanto em ambientes industriais, para formular um concreto condutor à base de fibras de carbono recicladas, destinado ao uso em mobiliário urbano em temperaturas abaixo de zero, com resultados promissores. Recentemente, foi realizada uma revisão abrangente das pesquisas existentes sobre concreto cimentício eletricamente condutor (Anur Oumer et al. 2024)(CCEC), abrangendo métodos para melhorar a condutividade do concreto, análise do comportamento de transferência de calor e avaliações de desempenho por meio de experimentos em laboratório e testes de campo em pequena escala.

Os resultados concordam que os pavimentos ECCC podem melhorar significativamente a gestão rodoviária durante o inverno, aumentando a segurança e reduzindo os atrasos relacionados com o clima, além de oferecer uma alternativa ecológica aos métodos químicos e mecânicos de degelo. Apesar dessas vantagens, a sua implementação em larga escala ainda é limitada por desafios relacionados ao desenvolvimento de práticas de construção economicamente viáveis, à garantia de durabilidade a longo prazo e à maximização da eficiência energética. Superar esses obstáculos será crucial para a adoção mais ampla da tecnologia ECCC.

#### 4. TÉCNICAS ELETROQUÍMICAS UTILIZANDO PASTAS CIMENTÍCIAS CONDUTORAS COMO ÂNODO.

Quando ocorre corrosão na armadura de uma estrutura de concreto armado, reparos são necessários para prolongar sua vida útil; caso contrário, há um alto risco de colapso. O método tradicional para estruturas contaminadas por cloretos é a substituição dos elementos estruturais afetados. No entanto, métodos mais recentes, como proteção catódica, realcalinização eletroquímica e extração eletroquímica de cloretos (EEC), permitem evitar a substituição de elementos estruturais. A vantagem dessas técnicas, conhecidas como Métodos de Manutenção Eletroquímica, reside principalmente em sua capacidade de eliminar agentes agressivos, manter o cobrimento de concreto e possibilitar a passivação da armadura.

Esses métodos consistem basicamente na aplicação de um campo elétrico entre a haste de aço (polo negativo ou cátodo) e um eletrodo depositado externamente na superfície do concreto (polo positivo ou ânodo), como uma camada de material cimentício condutor feita com um material condutor como grafite, por exemplo. Como os cloretos são íons com carga negativa, o campo elétrico aplicado faz com que eles migrem da haste para o eletrodo externo através dos poros do concreto. Posteriormente, mantendo-se uma intensidade menor do campo elétrico, aplica-se proteção catódica à armadura (ver Figura ).

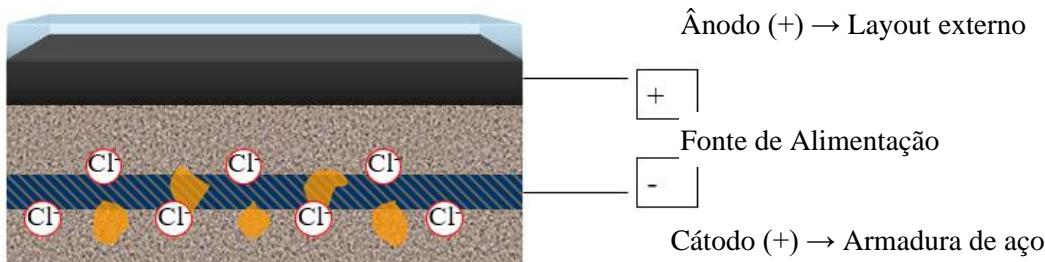


Figura 12. Esquema de la técnica de extracción electroquímica de cloruros.

A Figura 13 mostra um exemplo de EEC aplicado a amostras do tipo coluna com seção transversal circular, exibindo os perfis de  $\text{Cl}^-$  antes e depois do EEC, e o perfil de eficiência, no qual foram utilizados um ânodo de malha de  $\text{Ti}-\text{RuO}_2$  e uma camada pulverizada de cimento condutor e pasta de grafite com um sistema de molhagem constante. A eficiência média foi de 79,44% (Carmona et al. 2015).

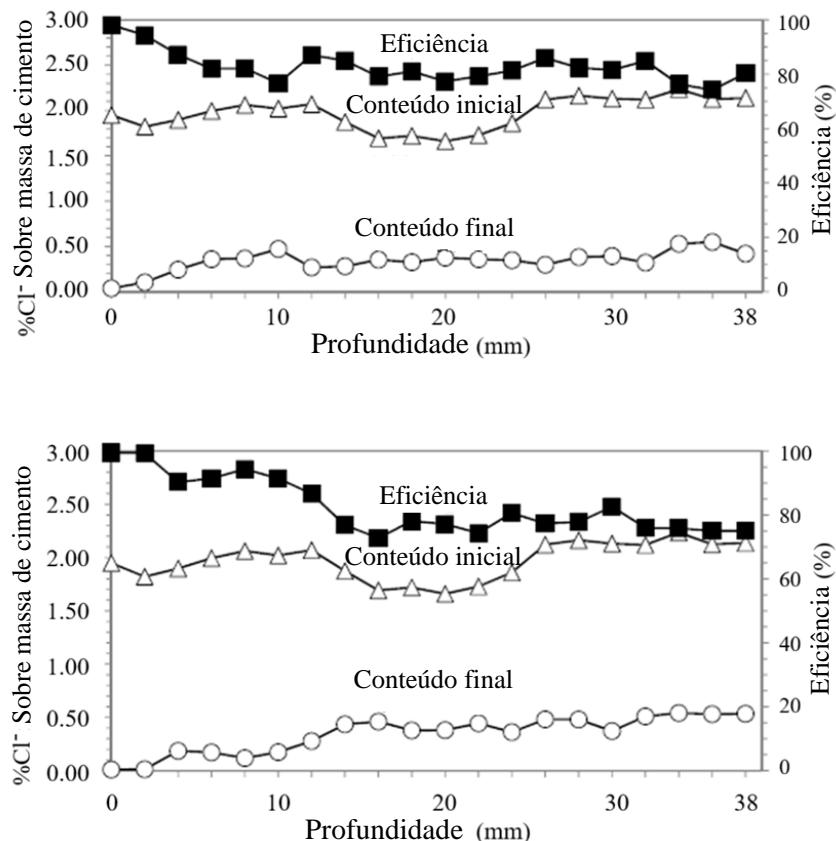


Figura 13. Exemplo de teste de extração de cloreto em pilares de base cilíndrica, indicando a porcentagem de cloretos em relação à massa de cimento (ânodo), bem como a eficiência em % (cátodo), em função da profundidade (mm) da amostragem. (a) Ânodo de malha de  $\text{Ti}-\text{RuO}_2$ ; (b) camada projetada de pasta condutora de cimento e grafite (Adaptado de Carmona et al. 2015).

As primeiras pesquisas conhecidas sobre esse método datam do início da década de 1970. Lankard, Morrison e outros pesquisadores americanos, nos laboratórios (Lankard et al. 1975) da Battelle em Columbus (Ohio), realizaram os primeiros testes de EEC em corpos de prova cilíndricos de concreto armado com aditivos de cloreto. Enquanto isso, Slater, do Departamento de Transportes em Topeka (Kansas), realizou as primeiras aplicações práticas em tabuleiros de pontes contaminados com cloretos. Em 1989, foi registrada a primeira patente nos EUA, intitulada "Removal of Chlorides from Concrete", e denominado "NORCURE", sobre um método para extrair cloretos do concreto armado (Vennesland and Opsahl, 1989). Em 1998, Tritthart publicou, como mencionado anteriormente, uma revisão abrangente do método EEC para destacar seus aspectos científicos. Após uma descrição detalhada do método e do histórico de sua aplicação, ele se concentra nos movimentos e na distribuição iônica causados pelo tratamento, medidos por mudanças na concentração dentro da rede de poros. Isso é seguido por um estudo completo dos efeitos colaterais indesejáveis do método, como possíveis reações álcali-agregado, diminuição da aderência entre aço e concreto e perda de resistência à tração no aço devido ao hidrogênio produzido (Tritthart, 1998). O grupo de Bertolini, Yu e Page dedicou sua pesquisa, na aplicação

dessas técnicas, aos efeitos do tratamento nas propriedades mecânicas, aplicando densidades de corrente que variam de 5 mA/m<sup>2</sup>, usadas na proteção catódica, até os 5 A/m<sup>2</sup> do EEC (Bertolini, Yu and Page, 1996). Em todos esses estudos, o ânodo externo é composto de malha de titânio embutida em camadas de fibra de celulose revestidas com um geotêxtil e imersos em uma solução saturada de Ca(OH)<sub>2</sub>. Andrade, Castellote e outros realizaram o primeiro estudo sobre a modelagem matemática da EEC. A partir da equação de Nernst-Planck para o fluxo iônico, desenvolveram fórmulas, por meio de suas pesquisas, para calcular o número de transporte de cloreto e o coeficiente de migração, a fim de modelar a eficiência do tratamento (Andrade et al. 1995). A equipe formada por Fajardo e Escadeillas, entre outros, estudou a microestrutura da interface aço-concreto após a EEC utilizando espectroscopia de raios X e microscopia eletrônica de varredura (Fajardo, Escadeillas and Arligue, 2006). A equipe formada por Climent, Garcés e outros publicou um trabalho inovador em 2005 sobre a influência da disposição das barras de reforço na eficiência da EEC (Garcés et al. 2005). Posteriormente, em 2006, essa mesma equipe publicou outro trabalho com estrutura semelhante ao anterior, mas com objetivos diferentes. Nesse caso, o objetivo era determinar a influência na eficiência do método de amostragem pontual, da densidade de corrente e da introdução de interrupções no tratamento (Climent et al. 2006).

É importante esclarecer que *a proteção catódica* é aplicada a estruturas já contaminadas por cloreto para controlar seu grau de corrosão, enquanto *a prevenção catódica* é utilizada para tratar novas estruturas suscetíveis à contaminação por cloreto, com o objetivo de aumentar sua resistência à corrosão e, consequentemente, sua vida útil, por meio de densidades de corrente muito menores. Lazzari e Pedeferri, em um artigo seminal, estabelecem as consequências negativas dessas técnicas e como controlá-las; as condições de operação de potencial e corrente, os problemas relacionados à capacidade de extração e a possibilidade de se obter a proteção desejada sem o risco de fragilização por hidrogênio em estruturas de concreto pretendido. Este trabalho também inclui exemplos de projeto, implementação, aplicação e monitoramento tanto da proteção catódica quanto da prevenção (Lazzari and Pedeferri 2006).

Além disso, foi no final da década de 1990 que se estabeleceu a possibilidade de usar um material cimentício condutor como ânodo em técnicas de proteção catódica. Dois estudos se destacam nesse sentido. O primeiro, conduzido por Fu e Chung em 1995 (Fu and Chung, 1995), foi um estudo interessante sobre o uso de argamassas reforçadas com fibra de carbono como material de contato para proteção catódica. Eles descobriram que uma pequena adição de fibras de carbono à nova argamassa aplicada à superfície da argamassa antiga a ser tratada com proteção catódica, servindo como ânodo no tratamento, reduz tanto a resistividade de contato quanto a resistividade volumétrica da nova argamassa. O segundo estudo, de Bertolini e colaboradores em 2003, investigou a eficiência de ânodos formados por argamassas cimentícias condutoras na proteção catódica de aço de reforço em concreto. Eles estudaram o comportamento dessas camadas atuando como ânodos no processo de proteção catódica. Trata-se de argamassas de cimento com adição de fibras de carbono revestidas com níquel (Bertolini et al. 2004). Perez et al. são os autores da primeira aplicação de ânodos cimentícios condutores na aplicação da técnica de extração eletroquímica de cloreto (Pérez et al. 2010).

## 5. OUTRAS APLICAÇÕES.

Existem muitas outras aplicações além das mencionadas. Por exemplo, o aterramento é necessário em edifícios e outras estruturas onde equipamentos elétricos estão em operação. A proteção contra raios é necessária em edifícios altos. Alguns metais, como o aço, são comumente usados para essas aplicações. No entanto, o uso de concreto eletricamente condutor para reduzir o volume de metal necessário é interessante do ponto de vista da redução de custos, maior durabilidade e instalação simplificada. (Chung, 2003) Recentemente, o Dr. Chung publicou estudos sobre as propriedades

capacitivas e piezopermissivas do concreto para autodetecção de tensões (Chung and Ozturk, 2024; Ozturk and Chung, 2024). Numerosos outros esforços estão sendo dedicados aos aspectos energéticos do concreto multifuncional (Abden et al. 2024).

Por fim, os esforços iniciais para imprimir em 3D concretos condutores capazes de detectar sua própria deformação são dignos de nota, pois demonstram um potencial promissor para a criação de estruturas em que áreas localmente críticas podem ser transformadas em nós sensores. Esses nós poderiam desempenhar um papel fundamental no monitoramento tanto do processo de impressão quanto da funcionalidade e segurança da estrutura ao longo de sua vida útil (Liu et al. 2024; Sousa et al. 2024).

## 6. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS.

O desenvolvimento de concretos condutivos com funcionalidades avançadas representa um campo emergente e promissor na engenharia de materiais para infraestrutura. Esses materiais não apenas cumprem funções estruturais tradicionais, mas também incorporam capacidades inteligentes que lhes permitem responder ativamente a estímulos ambientais. Entre as aplicações mais notáveis estão:

- a) Monitoramento estrutural por meio de piezoresistividade, medição de deformações e detecção de danos, além de integração com sistemas de energia e sensores.
- b) A função de aquecimento e descongelamento utiliza o efeito Joule. Pavimentos de concreto condutivo com funções de aquecimento e descongelamento representam uma alternativa promissora para infraestruturas inteligentes em climas frios. No entanto, é essencial dar continuidade à pesquisa aplicada e experimental em larga escala para otimizar seu desempenho, garantir sua viabilidade econômica e avaliar seu impacto ambiental a longo prazo.
- c) O papel do ânodo na aplicação de técnicas eletroquímicas. A pasta de cimento condutora se apresenta como uma solução promissora para a implementação de técnicas eletroquímicas mais eficientes e duráveis, além de promover a integração funcional entre os componentes do sistema e o substrato estrutural.

Apesar dos avanços significativos na formulação e caracterização desses materiais, sua implementação em larga escala ainda enfrenta diversos desafios técnicos e econômicos. Entre eles, destacam-se a dificuldade de dispersão homogênea dos materiais condutores na matriz cimentícia, os custos elevados associados aos aditivos funcionais, o uso de eletrodos de contato e fiação, e a necessidade de garantir a durabilidade e a estabilidade das propriedades elétricas em condições reais de uso.

No entanto, as pesquisas atuais continuam a explorar novas combinações de materiais condutores (como nanotubos de carbono, grafeno, fibras metálicas e materiais reciclados), bem como técnicas de fabricação inovadoras, incluindo a impressão 3D, para melhorar a eficiência e reduzir o impacto ambiental. Nesse contexto, o concreto condutor emerge como um componente fundamental para o desenvolvimento de infraestruturas inteligentes, resilientes e sustentáveis no futuro.

## 7. AGRADECIMENTOS

F. Ubertini agradece profundamente o apoio do Ministerio de Universidad e Investigación de Italia (MUR) por meio da bolsa avançada FIS2021 'SMS-SAFEST – Smart Masonry enabling SAFEtY-assessing STructures after earthquakes' (FIS00001797)

P. Garcés e O. Galao agradecem profundamente o apoio do Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades através da subvenção PROYECTOS DE GENERACIÓN DE CONOCIMIENTO Y A ACTUACIONES PARA LA FORMACIÓN DE PERSONAL INVESTIGADOR

PREDOCTORAL ASOCIADAS A DICHOS PROYECTOS, no âmbito do Programa Estatal para la Investigación y el Desarrollo Experimental, do Plan Estatal de Investigación Científica, Técnica y de Innovación 2024-2027 (Referência PID2024-159695OB-C21), bem como do Programa de Investigación e Innovación Horizonte 2020 da União Europeia, ao abrigo do Acuerdo de Subvención 760940.

## 8. REFERÊNCIAS

Abden, Md Jaynul, Vivian W. Y. Tam, Jannatul Dil Afroze, Khoa N. Le. (2024). “*Energy Efficient Sustainable Concrete for Multifunctional Applications.*” Construction and Building Materials, 418:135213. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135213>.

Andrade, C., J. M., Diez, A., Alamán, Alonso, C. (1995). “*Mathematical Modelling of Electrochemical Chloride Extraction from Concrete.*” [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00063-I](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00063-I).

Oumer, A., Lee, C., Ahn, E., Gwon, S. (2024). “*Review on Self-Heating Electrically Conductive Cementitious Composites: Focus on Deicing and Electrical Curing.*” Construction and Building Materials, 439:137232. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2024.137232>.

Baeza, F. J., Chung, D. D. L., Zornoza, E., Andión, L. G., Garcés, P. (2010). “*Triple Percolation in Concrete Reinforced with Carbon Fiber.*” ACI Materials Journal, 107(4):396–402.

Baeza, F. J., Galao, O., Zornoza, E., Garcés, P. (2013). “*Effect of Aspect Ratio on Strain Sensing Capacity of Carbon Fiber Reinforced Cement Composites.*” Materials and Design, 51:1085–94. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.05.010>.

Baeza, F. J., Zornoza, E., Andión, L. G., Ivorra, S., Garcés, P. (2011). “*Variables Affecting Strain Sensing Function in Cementitious Composites with Carbon Fibers.*” Computers and Concrete, 8(2):229–41. <https://doi.org/10.12989/cac.2011.8.2.229>

Bertolini, L., Yu, S. W., Page, C. L. (1996). “*Effects of Electrochemical Chloride Extraction on Chemical and Mechanical Properties of Hydrated Cement Paste.*” Advances in Cement Research, 8(31):93–100. <https://doi.org/10.1680/adcr.1996.8.31.93>.

Bertolini, L., Bolzoni, F., Pastore, T., Pederferri, P. (2004). “*Effectiveness of a Conductive Cementitious Mortar Anode for Cathodic Protection of Steel in Concrete.*” Cement and Concrete Research, 34(4):681–94. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.10.018>

Birgin, H. B., D’Alessandro, A., Favaro, M., Sangiorgi, C., Laflamme, S., Ubertini, F. (2022). “*Field Investigation of Novel Self-Sensing Asphalt Pavement for Weigh-in-Motion Sensing.*” Smart Materials and Structures, 31(8):085004. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ac7922>.

Camacho-Ballesta, C., Zornoza, E., Garcés, P., Zornoza, E. 2016. “*Performance of Cement-Based Sensors with CNT for Strain Sensing.*” Advances in Cement Research, 28(4):274–84. <https://doi.org/10.1680/adcr.14.00120>.

Carmona, J., Garcés, P., Climent, M. A. (2015). “*Efficiency of a Conductive Cement-Based Anodic System for the Application of Cathodic Protection, Cathodic Prevention and Electrochemical Chloride Extraction to Control Corrosion in Reinforced Concrete Structures.*” Corrosion Science, 96:102–11. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2015.04.012>.

Carmona, J., Climent, M.-Á., Antón, C., Vera, G., Garcés, P. (2015). “*Shape Effect of Electrochemical Chloride Extraction in Structural Reinforced Concrete Elements Using a New Cement-Based Anodic System.*” Materials, 8(6):2901–17. <https://doi.org/10.3390/ma8062901>.

Chung, D. D. L. (2000). “*Cement-Based Materials for Stress Sensing by Electrical Resistance Measurement.*” Cement and Concrete Composites, 22(6):409–4017.

Chung, D. D. L. (2003). *Multifunctional Cement-Based Materials.* edited by 2003 CRC Press. Buffalo, New York, USA.

Chung, D. D. L. (2004a). “*Review Electrical Applications of Carbon Materials.*” Journal of

Materials Science, 29:2645–61.

Chung, D D L. (2004). “*Self-Heating Structural Materials.*” Smart Materials and Structures, 13(3):562–65. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/13/3/015>.

Chung, D. D. L. (2004b). “*Self-Heating Structural Materials.*” Smart Materials and Structures, 13(3):562–65. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/13/3/015>.

Chung, D. D. L. (2024). *Functional Materials.* Vol. 4. 2nd ed. edited by World Scientific.

Chung, D. D. L., Ozturk, M. (2024). “*Spatially Resolved Capacitance-Based Stress Self-Sensing in Concrete.*” ISA Transactions, 152:299–307. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2024.06.034>.

Climent, M. A., Sanchez de Rojas, M. J., de Vera, G., Garces, P. (2006). “*Effect of Type of Anodic Arrangements on Efficiency of Electrochemical Chloride Removal from Concrete.*” ACI Materials Journal, 103(4):243–50.

D’Alessandro, A., Rallini, M., Ubertini, F., Materazzi, A. L., Kenny, J. M. (2016). “*Investigations on Scalable Fabrication Procedures for Self-Sensing Carbon Nanotube Cement-Matrix Composites for SHM Applications.*” Cement and Concrete Composites, 65:200–213. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.11.001>.

Deng, G., Zhang, M., Zhang, J., He, Y., Li, M. (2023). “*Temperature Self-Controlled Concrete: Electro-Thermal Performance and Active Temperature Control Strategy.*” Structures. 58:105629. <https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2023.105629>.

Downey, A., D’Alessandro, A., Laflamme, S., Ubertini, F. (2018). “*Smart Bricks for Strain Sensing and Crack Detection in Masonry Structures.*” Smart Materials and Structures. 27(1):015009. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/aa98c2>.

Fajardo, G., Escadeillas, G., Arliguie, G. (2006). “*Electrochemical Chloride Extraction (ECE) from Steel-Reinforced Concrete Specimens Contaminated by ‘Artificial’ Sea-Water.*” Corrosion Science, 48(1):110–25. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2004.11.015>.

Faneca, G., Ikumi, T., Torrents, J. M., Aguado, A., Segura, I. (2020). “*Conductive Concrete Made from Recycled Carbon Fibres for Self-Heating and de-Icing Applications in Urban Furniture.*” Materiales de Construcción, 70(339):e223. <https://doi.org/10.3989/mc.2020.17019>.

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):045010. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/abe032>.

Fu, X., Chung, D. D. L. (1995). “*Carbon Fiber Reinforced Mortar as an Electrical Contact Material for Cathodic Protection.*” Cement and Concrete Research. 25(4):689–94.

Galao, O., Baeza, F. J., Zornoza, E., Garcés, P. (2014). “*Strain and Damage Sensing Properties on Multifunctional Cement Composites with CNF Admixture.*” Cement & Concrete Composites. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.11.009>.

Galao, O., Bañón, L., Baeza, F. J., Carmona, J., Garcés, P. (2016). “*Highly Conductive Carbon Fiber Reinforced Concrete for Icing Prevention and Curing.*” Materials. 9(4). doi:10.3390/ma9040281.

Garcés, P., Fraile, J., Vilaplana-Ortego, E., Cazorla-Amorós, D., Alcocel, E. G. G., Andión, L. G. G. (2005). “*Effect of Carbon Fibres on the Mechanical Properties and Corrosion Levels of Reinforced Portland Cement Mortars.*” Cement and Concrete Research. 35(2):324–31. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.013>.

Garcés, P., Zornoza, E., Garcia Andion, L., Baeza, F. J., Galao, O. (2010). *Hormigones Conductores Multifuncionales.* edited by Editorial Club Universitario. Alicante: Editorial Club Universitario.

García-Macías, E., D’Alessandro, A., Castro-Triguero, R., Pérez-Mira, D., Ubertini, F. (2017). “*Micromechanics Modeling of the Uniaxial Strain-Sensing Property of Carbon Nanotube Cement-Matrix Composites for SHM Applications.*” Composite Structures. 163:195–215.

<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.12.014>.

García-Macías, E., Ubertini, F. (2019). “Earthquake-Induced Damage Detection and Localization in Masonry Structures Using Smart Bricks and Kriging Strain Reconstruction: A Numerical Study.” *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 48(5):548–69. <https://doi.org/10.1002/eqe.3148>.

Gomis, J., Galao, O., Gomis, V., Zornoza, E., Garces, P. (2015). “Self-Heating and Deicing Conductive Cement. Experimental Study and Modeling.” *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.042>.

Han, Baoguo, Siqi Ding, and Xun Yu. 2015. “Intrinsic Self-Sensing Concrete and Structures: A Review.” *Measurement* 59:110–28. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.09.048>.

Ivorra, S., Garcés, P., Catalá, G., Andión, L. G., Zornoza, E. (2010). “Effect of Silica Fume Particle Size on Mechanical Properties of Short Carbon Fiber Reinforced Concrete.” *Materials and Design*. 31(3):1553–58. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.09.050>.

Konsta-Gdoutos, M. S., Aza, C. A. (2014). “Self Sensing Carbon Nanotube (CNT) and Nanofiber (CNF) Cementitious Composites for Real Time Damage Assessment in Smart Structures.” *Cement and Concrete Composites*. 53. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.07.003>.

Kumar, R., Sahoo, S., Joanni, E., Singh, R. K., Tan, W. K., Kar, K. K., Matsuda, A. (2021). “Recent Progress on Carbon-Based Composite Materials for Microwave Electromagnetic Interference Shielding.” *Carbon*. 177:304–31. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2021.02.091>.

Lankard, D. R., Slater, J. E., Hedden, W. A., Niesz, D. E. (1975). *Neutralization of Chloride in Concrete*.

Lazzari, L., Pedeferri, P. (2006). *Cathodic Protection*. 1st ed. Polipress, Milano.

Li, Z., Guo, T., Chen, Y., Lu, Y., Niu, X., Yang, X., Jin, L. (2022). “Study on Road Performance and Electrothermal Performance of Poured Conductive Asphalt Concrete.” *Advances in Materials Science and Engineering*. 2022(1):2462126. <https://doi.org/10.1155/2022/2462126>.

Liu, H., Laflamme, S., Cai, B., Lyu, P., Sritharan, S., Wang, K. (2024). “Investigation of 3D Printed Self-Sensing UHPC Composites Using Graphite and Hybrid Carbon Microfibers.” *Sensors*. 24. <https://doi.org/10.3390/s24237638>.

Meoni, A., Mattiacci, M., D’Alessandro, A., Virgulto, G., Buratti, N., Ubertini, F. (2025). “Automated Damage Detection in Masonry Structures Using Cointegrated Strain Measurements from Smart Bricks: Application to a Full-Scale Building Model Subjected to Foundation Settlements under Changing Environmental Conditions.” *Journal of Building Engineering*. 100:111749. <https://doi.org/10.1016/J.JBEN.2024.111749>.

del Moral, B., Baeza, F. J., Navarro, R., Galao, O., Zornoza, E., Vera, J., Farcas, C., Garcés, P. (2021). “Temperature and Humidity Influence on the Strain Sensing Performance of Hybrid Carbon Nanotubes and Graphite Cement Composites.” *Construction and Building Materials*. 284:122786. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122786>.

Ozturk, M., Chung, D. D. L. (2024). “Piezopermittivity of Cement Mortar with Various Water Contents and Its Application to Capacitance-Based Structural Self-Sensing of Stress.” *Sensors and Actuators A: Physical*. 369:115206. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2024.115206>.

Park, S., Hwang, H., Lee, H., Chung, W. (2024). “A Full-Scale Test on Enhancing the Thermal Performance of a Concrete Slab Embedded with a MWCNT Heating Module Exposed to an Outdoor Environment.” *Buildings*. 14(3):775.

Pérez, A., Climent, M. A., Garcés, P. (2010). “Electrochemical Extraction of Chlorides from Reinforced Concrete Using a Conductive Cement Paste as the Anode.” *Corrosion Science*. 52(5):1576–81. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.01.016>.

Qin, H., Ding, S., Ashour, A., Zheng, Q., Han, B. (2024). “Revolutionizing Infrastructure: The Evolving Landscape of Electricity-Based Multifunctional Concrete from Concept to Practice.” *Progress in Materials Science*. 145:101310. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2024.101310>.

Rahman, Md L., Malakooti, A., Ceylan, H., Kim, S., Taylor, P. C. (2022). “*A Review of Electrically Conductive Concrete Heated Pavement System Technology: From the Laboratory to the Full-Scale Implementation.*” Construction and Building Materials. 329:127139. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.127139>.

Shama Rao, N., Simha, T. G. A., Rao, K. P., Ravi Kumar, G. V. V. (2018). *Carbon Composites are Becoming Competitive and Cost Effective.* Infosys.

Sassani, A., Arabzadeh, A., Ceylan, H., Kim, S., Sajed Sadati, S. M., Gopalakrishnan, K., Taylor, P. C., Abdulla, H. (2018). “*Carbon Fiber-Based Electrically Conductive Concrete for Salt-Free Deicing of Pavements.*” Journal of Cleaner Production. 203:799–809. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.08.315>.

Rocha Segundo, I., Freitas, E., Castelo Branco, V. T. F., Landi Jr., S., Costa, M. F., Carneiro, J. O. (2021). “*Review and Analysis of Advances in Functionalized, Smart, and Multifunctional Asphalt Mixtures.*” Renewable and Sustainable Energy Reviews. 151:111552. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111552>.

Shi, Z.-Q., Chung, D. D. L. (1999). “*Carbon Fiber-Reinforced Concrete for Traffic Monitoring and Weighing in Motion.*” Cement and Concrete Research. 29(3):435–39. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00204-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00204-X)

Song, F., Li, Q., Xu, S. (2024). “*A Review of Self-Sensing Ultra-High Performance Concrete: Towards next-Generation Smart Structural Materials.*” Cement and Concrete Composites. 145:105350. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105350>.

Sousa, I., D’Alessandro, A., Mesquita, E., Laflamme, S., Ubertini, F. (2024). “*Comprehensive Review of 3D Printed Cementitious Composites with Carbon Inclusions: Current Status and Perspective for Self-Sensing Capabilities.*” Journal of Building Engineering. 98:111192. <https://doi.org/10.1016/J.JBEE.2024.111192>.

Tritthart, J. 1998. “*Electrochemical Chloride Removal: An Overview and Scientific Aspects.*” The American Ceramic Society. 401–41.

Tuan, C., Yehia, S. (2004). “*Implementation of Conductive Concrete Overlay for Bridge Deck Deicing at Roca, Nebraska.*” in Civil Engineering Faculty Proceedings & Presentations. 3.

Vennesland, Ø., Opsahl, O. A. (1989). “*Patent. Removal of Chlorides from Concrete.*”

Vilaplana, J. L., Baeza, F. J., Galao, O., Alcocel, E. G., Zornoza, E., Garcés, P. (2016). “*Mechanical Properties of Alkali Activated Blast Furnace Slag Pastes Reinforced with Carbon Fibers.*” Construction and Building Materials. 116:63–71. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.066>.

Yehia, S., Tuan, C. Y. (1999). “*Conductive Concrete Overlay for Bridge Deck Deicing.*” ACI Materials Journal. 96(3):382–90.

Zornoza, E., Catalá, G., Jiménez, F., Andión, L. G<sup>a</sup>, Garcés, P. (2010). “*Electromagnetic Interference Shielding with Portland Cement Paste Containing Carbon Materials and Processed Fly Ash.*” Materiales de Construcción. 60(300):21–32. <https://doi.org/10.3989/mc.2010.51009>.