

COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS COM PROPRIEDADES ELÉTRICAS (CCPE) APLICADOS À INFRAESTRUTURA URBANA: UMA BREVE REVISÃO

Cementitious Composites With Electrical Properties (CCCEP) Applied to Urban Infrastructure: A Brief Review

Compuestos de Cemento con Propiedades Eléctricas (CCPE) Aplicados a la Infraestructura Urbana: Una Breve Revisión

SILVA, J. B. L. P.¹; SILVA, C. T. O.²; MARÇULA, S. C.³;
LINTZ, R. C. C.⁴; GACHET, L. A.⁵

Resumo

A demanda por infraestrutura que atenda aos anseios econômicos, sociais e ambientais, carece de avanços tecnológicos provenientes de pesquisas nos mais diversos campos, inclusive no desenvolvimento e aperfeiçoamento de compósitos cimentícios como argamassas e concretos, os quais são amplamente utilizados em obras de infraestrutura. Neste sentido, a sociedade acadêmica tem buscado agregar novas funcionalidades aos compósitos cimentícios, ao ponto que a melhora das propriedades elétrica ganha destaque. Quando melhoradas, essas propriedades permitem que os compósitos sejam usados como coletores de energia elétrica, sistema de detecção de tráfego, blindagem eletromagnética, monitoramento estrutural, entre outros. Para isso, materiais eletricamente condutivos, como carbono e metais são incorporados à matriz cimentícia. Estudos têm demonstrado que tais compósitos têm apresentado características multifuncionais, pois além de funcionarem como componentes estruturais, por exemplo, no caso de uma ponte, um túnel ou um pavimento, também são capazes de oferecer outras funcionalidades como gerar, transmitir ou armazenar energia elétrica. Contudo, mais pesquisas são necessárias para se superar todos os desafios técnicos, econômicos e ambientais, visando o uso dos compósitos cimentícios com propriedades elétricas (CCPEs) em construções reais. Assim, o objetivo deste trabalho é apresentar um panorama de pesquisas com CCPEs que contribuam para a identificação de campos para pesquisa futura.

Palavras-chave: Materiais da construção civil, impedância, condutividade, propriedades multifuncionais.

¹ SILVA, J. B. L. P. - João Batista Lamari Palma e Silva. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7115-6385>, jblamari@unicamp.br

² SILVA, C. T. O. - Camila Tiemi Ozaki e Silva. Doutoranda na Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0678-2624>, c210427@dac.unicamp.br

³ MARÇULA, S. C. - Stephanie Cucolo Marçula. Doutoranda na Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4858-0043>, s237360@dac.unicamp.br

⁴ LINTZ, R. C. C. - Rosa Cristina Cecche Lintz. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7201-3260>, rosaint@unicamp.br

⁵ GACHET, L. A. - Luísa Andréia Gachet. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1661-2605>, gachet@unicamp.br

COMO CITAR:

SILVA, J. B. L. P., SILVA, C. T. O., MARÇULA, S. C., LINTZ, R. C. C., GACHET, L. A. COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS COM PROPRIEDADES ELÉTRICAS (CCPE) APLICADOS À INFRAESTRUTURA URBANA: UMA BREVE REVISÃO. Engenharia Urbana Em Debate. Engenharia Urbana Em Debate, 6(1). <https://doi.org/110.14244/engurbdebate.v6i1.151>

Data da Submissão:
13 de janeiro de 2025
Data da Aprovação:
03 de março de 2025
Data da Publicação:
10 de março de 2025



Abstract

The demand for infrastructure that meets economic, social and environmental needs requires technological advances from research in a wide range of fields, including the development and improvement of cementitious composites such as mortars and concretes, which are widely used in infrastructure projects. In this sense, academia has sought to add new functionalities to cementitious composites, to the point that improving their electrical properties has gained prominence. When improved, these properties allow the composites to be used as electrical energy collectors, traffic detection systems, electromagnetic shielding, structural monitoring, among others. To this end, electrically conductive materials such as carbon and metals are incorporated into the cementitious matrix. Studies have shown that such composites have multifunctional characteristics, since in addition to functioning as structural components, for example, in the case of a bridge, a tunnel or a pavement, they are also capable of offering other functionalities such as generating, transmitting or storing electrical energy. However, more research is needed to overcome all the technical, economic and environmental challenges, aiming at the use of cementitious composites with electrical properties (CCEPs) in real constructions. Thus, the objective of this work is to present an overview of CCEPs research that contributes to the identification of fields for future research.

Keywords: building materials, impedance, conductivity, multifunctional properties.

Resumen

La demanda de infraestructura que atienda las preocupaciones económicas, sociales y ambientales requiere avances tecnológicos resultantes de la investigación en los más diversos campos, incluido el desarrollo y mejora de compuestos cementosos como morteros y concretos, ampliamente utilizados en obras de infraestructura. En este sentido, la sociedad académica ha buscado agregar nuevas funcionalidades a los composites cementosos, hasta el punto de que la mejora de las propiedades eléctricas ha ganado protagonismo. Cuando se mejoran, estas propiedades permiten que los compuestos sean utilizados como colectores de energía eléctrica, sistemas de detección de tráfico, blindaje electromagnético, monitoreo estructural, entre otros. Para lograrlo, se incorporan a la matriz de cemento materiales eléctricamente conductores, como carbono y metales. Los estudios han demostrado que dichos compuestos tienen características multifuncionales, ya que además de funcionar como componentes estructurales, por ejemplo, en el caso de un puente también son capaces de ofrecer otras funcionalidades como generar, transmitir o almacenar energía eléctrica. Sin embargo, se necesita más investigación para superar todos los desafíos técnicos, económicos y ambientales, apuntando al uso de compuestos cementosos con propiedades eléctricas (CCPEs) en construcciones reales. Así, el objetivo de este trabajo es presentar una visión general de la investigación con CCPEs que contribuya a la identificación de campos para futuras investigaciones.

Palabras-clave: materiales de construcción, impedancia, conductividad, propiedades multifuncionales.

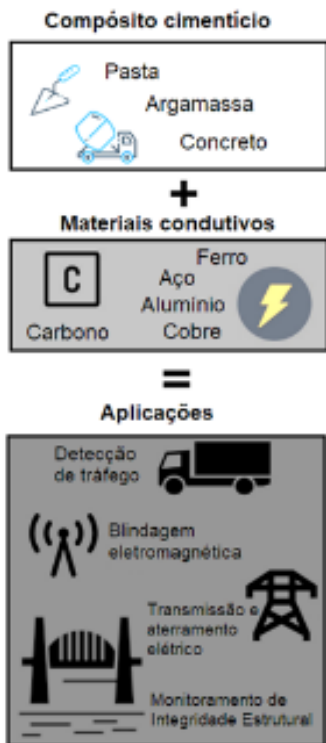
1. Introdução

A previsão do Governo Federal brasileiro para investimentos em infraestrutura é de R\$1,4 trilhão até o ano de 2026, por meio do programa Novo PAC (Brasil, 2023). É esperado que, além de aumento de obra, estas obras utilizem novas tecnologias, para diminuir custos de construção, operação e manutenção, além de atenuar os impactos ambientais e sociais.

Uma maneira de maximizar o uso de materiais e/ou compósitos se dá por meio de métodos que possam adicionar funcionalidades complementares a estes. Por exemplo, um concreto, que poderá ter múltiplos usos, além de servir como elemento estrutural.

Neste sentido tem-se os compósitos cimentícios com propriedades elétricas (CCPEs) que, seja na forma de pastas de cimento, argamassas ou concretos, pode dispor de propriedades que possibilitem diversas aplicações (Figura 1). Essas aplicações envolvem usos como, por exemplo: blindagem contra interferências eletromagnéticas, aterramento elétrico, monitoramento de tráfego de veículos, proteção catódica, monitoramento de integridade estrutural, entre outras funcionalidades (Wang & Aslani, 2019).

Figura 1 – Exemplos de aplicações de compósitos cimentícios com propriedades elétricas



Fonte: Adaptado de Silva (2024)

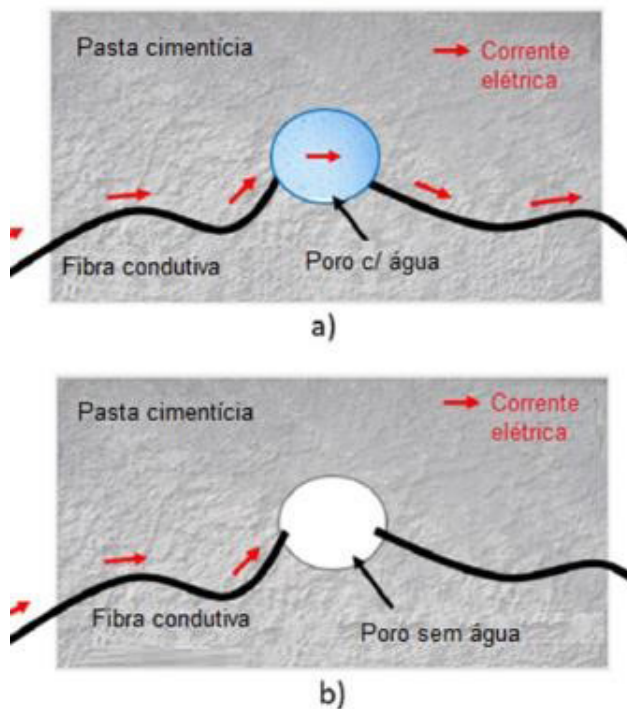
Compósitos cimentícios são considerados eletricamente isolante – mau condutor –, portanto, para que tenham suas propriedades elétricas modificadas, é necessário incorporar fillers eletricamente condutivos que permitam a passagem de corrente elétrica, podendo, por exemplo, aumentar sua condutividade elétrica (Wang & Aslani, 2021).

Entretanto, outras questões além dos materiais eletricamente condutores incorporados a um compósito cimentícios, interferem em sua condutividade elétrica, tais como: a presença ou não de água nos poros, a teoria do limiar de percolação e a teoria do efeito de tunelamento quântico.

A água nos poros serve como um caminho entre as partículas condutoras (Figura 2) que porventura não mantenham contato direto entre si (Yoo et

al., 2017). O aumento da condutividade elétrica devido a água presente nos poros do compósito, ocorre pelo fato da possibilidade de que os íons hidratados se movam livremente na água, na condição de portadores de corrente elétrica (Chuang et al., 2017).

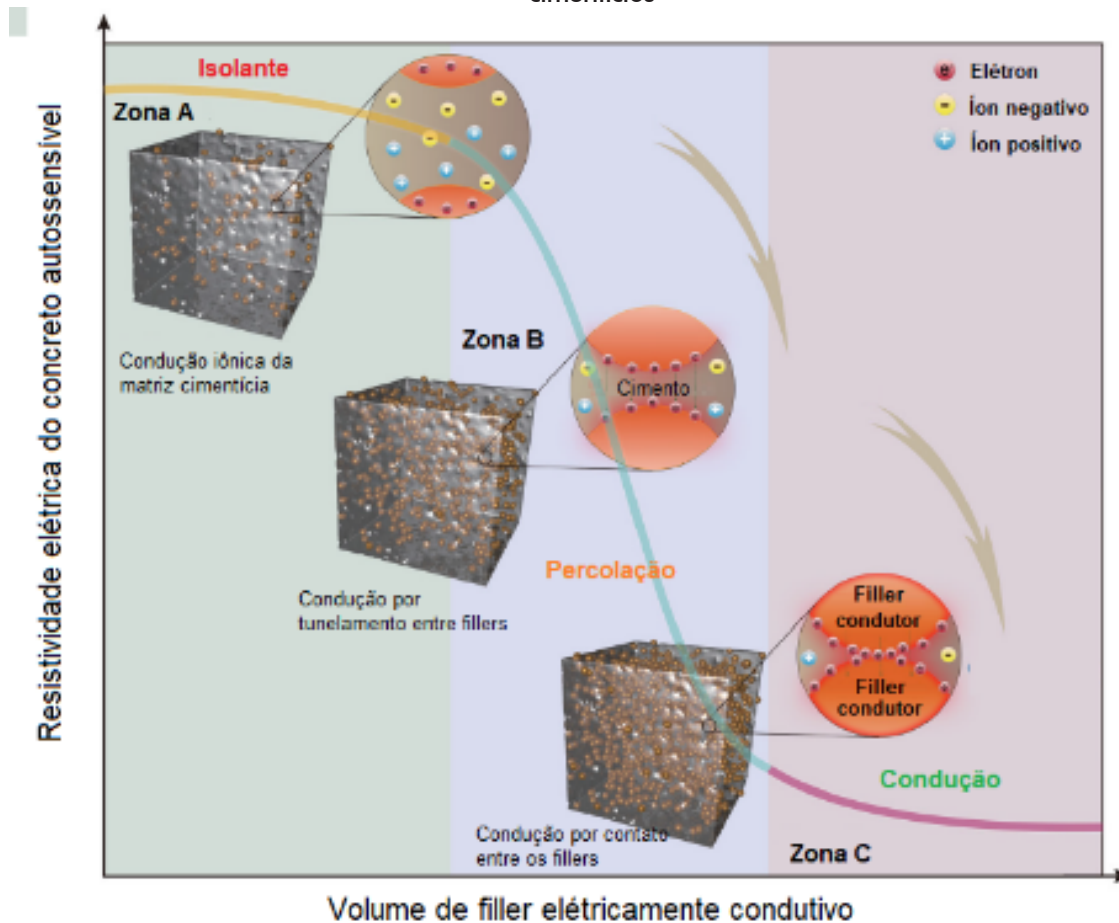
Figura 2 – Esquema comparativo entre o caminho condutivo da pasta de cimento (a) com água e (b) sem água.



Fonte: Wang & Aslani (2019) apud Silva (2024).

As variações de propriedades elétrica em compósitos cimentícios, também são justificadas pelas teorias do limiar de percolação e do efeito de tunelamento quântico (Han et al., 2020). O limiar de percolação (Figura 3) é o estágio em que uma transição abrupta ocorre da fase isolante para a fase de maior condutividade elétrica que o compósito pode atingir. Isso se dá mediante o aumento da incorporação de um material eletricamente condutor junto a matriz cimentícia (Haghgoo et al., 2022).

Figura 3 – Zonas (isolante, percolação ou transição e condução) de resistividade elétrica em compósitos cimentícios

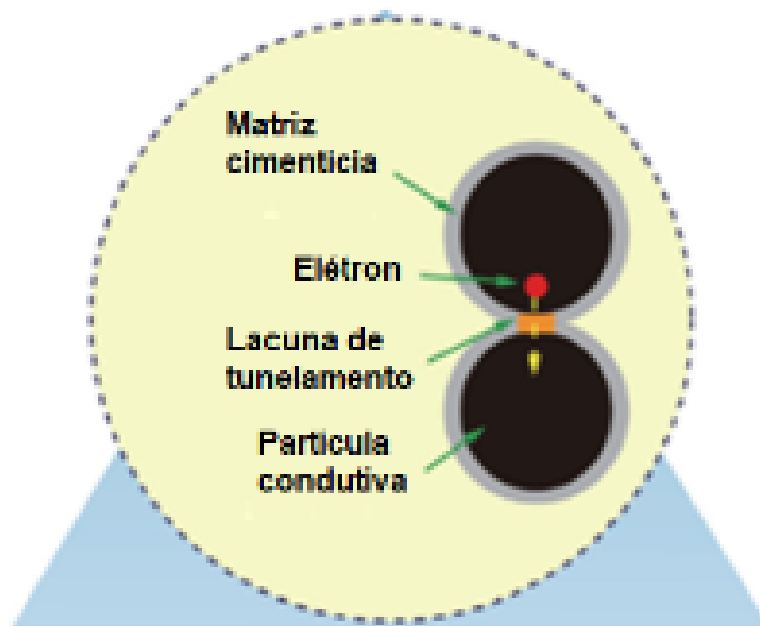


Fonte: Ding *et al.* (2019) apud Silva (2024).

Já o tunelamento quântico ocorre devido à distância demasiadamente pequena entre partículas eletricamente condutoras que não possuem contato direto (Figura 4), mas permitem

que um elétron ou carga elétrica salte de uma partícula para outra, sem que haja um caminho formado por um material condutor (Chuang *et al.*, 2017).

Figura 4 – Esquema ilustrativo de tunelamento entre partículas condutoras sem contato

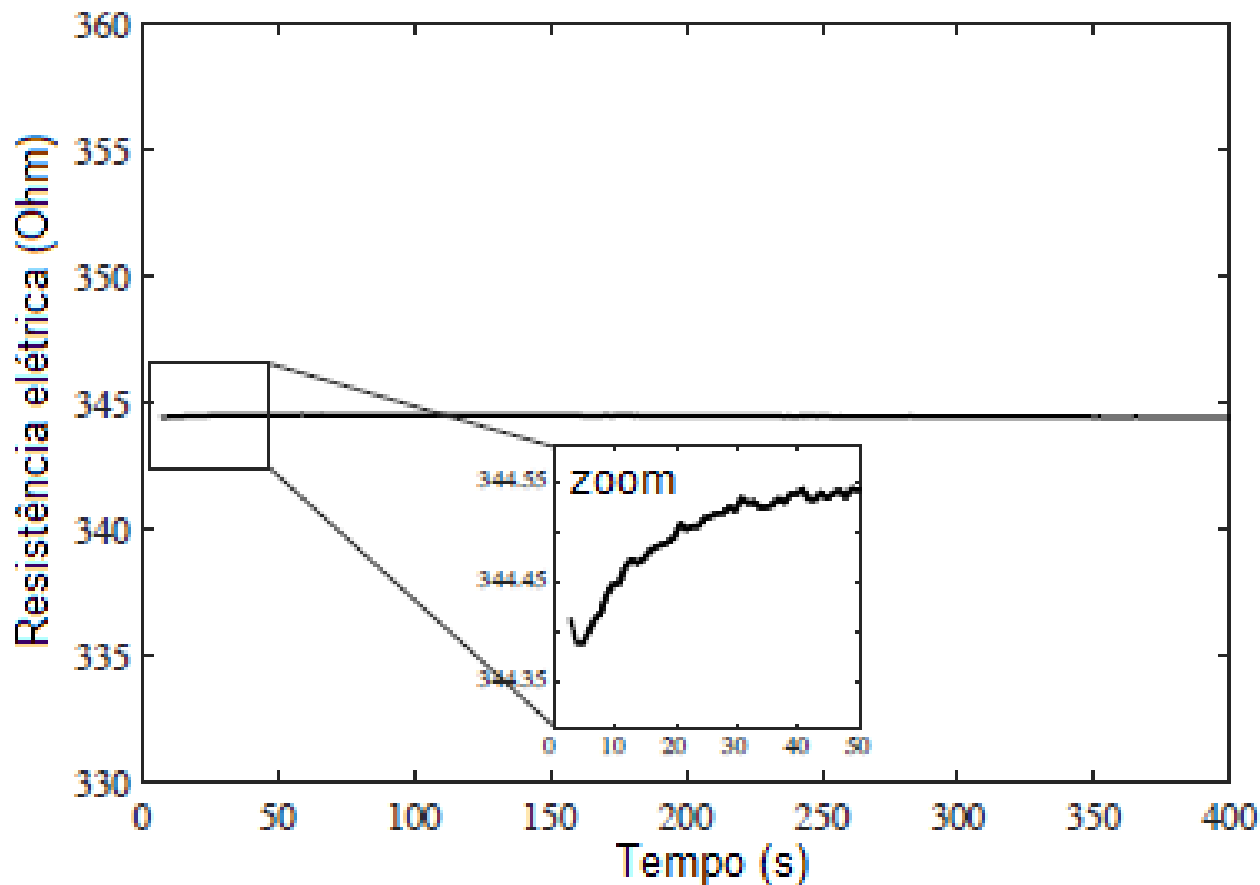


Fonte: Ding *et al.* (2019) apud Silva (2024).

Outro aspecto significativo sobre a condutividade elétrica de compósitos cimentícios, é que esses não exibem um comportamento puramente ôhmico, uma vez que se assemelham as características de materiais dielétricos (D'Alessandro *et al.*, 2014; Downey *et al.*, 2018). Essas características estão

ligadas tanto à resistência quanto à capacitância, resultando em valores instáveis de resistência elétrica (Figura 5) em um determinado período da medição (Chung & Xi, 2022; Chung, 2021a; Chung, 2021b), o que se dá em função da polarização elétrica.

Figura 5 – Variação da resistência elétrica em função do efeito de polarização causado por propriedades capacitivas durante alimentação com corrente contínua



Fonte: Birgin *et al.* (2020) apud Silva (2024).

A movimentação de íons livres presentes na matriz cimentícia acontece devido a aplicação de uma excitação elétrica, criando assim um campo elétrico na direção contrária do fluxo da corrente. Essa situação gera o efeito de polarização elétrica, o que gera o aumento da resistividade por um determinado período (Dehghani & Aslani, 2021).

Assim, a seleção das técnicas e métodos de análise de propriedades elétricas de compósitos cimentícios é uma questão altamente relevante para realização das análises desejadas. Contudo, ainda não há consenso na comunidade acadêmica, gerando diversas formas e modelos diferentes de medição e equipamentos, demonstrando assim ser um campo de pesquisa relevante.

Portando, é essencial não limitar o uso de um material ou de um compósito apenas para uma finalidade, mas sim explorar novas funcionalidades, a fim de torná-lo um agente promotor de desenvolvimento sustentável (Qin *et al.*, 2024). Assim, é crucial entender a situação destes materiais e compósitos multifuncionais, que têm sido foco de diversas pesquisas nos últimos anos. Por tanto, o objetivo deste trabalho é realizar uma breve revisão bibliográfica sobre compósitos cimentícios com propriedades elétricas (CCPEs).

2 Materiais e Métodos

Para compreender a relevância do estudo das propriedades elétricas para compósitos cimentícios na infraestrutura, foi realizada análise bibliométrica por meio de busca pelos termos da Quadro 1, junto ao sistema de pesquisas da plataforma

ScienceDirect (acesso em 23/11/2024) nos campos “Title, abstract or author-specified keywords”, no modo de busca avançada para os últimos 10 anos.

Quadro 1 – Termos e operadores booleanos da pesquisa na plataforma ScienceDirect

Termos Elétricos	Termos cimentícios	Termos de obras de infraestrutura
("electrical properties")	AND (cement OR concrete)	AND (road OR dam OR bridge OR infrastructure)
("electrical conductivity")		
("electrical impedance")		
("electrical resistance")		
("electrical resistivity")		

Fonte: elaborada pelos autores (2024).

Ainda a partir dos resultados da busca em questão, os dados como título, resumo e palavras-chave das publicações identificadas, foram inseridas no software de análise bibliométrica VOSviewer (versão 1.6.20), para análise tipo co-ocorrência, em configuração default, por meio dos arquivos com a extensão “ris” do inglês *Research Information Systems*. Tal análise visou a criação de mapa de baseado em dados bibliográficos.

Por meio dessa análise bibliográfica, os títulos e resumos foram lidos a fim de se selecionar artigos relacionados a aplicação dos CCPEs. Durante a leitura, chamou a atenção as diferentes técnicas de medição de propriedades elétricas que foram brevemente descritas neste artigo.

3 Resultados e Discussões

3.1. Análise Bibliométrica

A partir dos resultados das buscas junto a plataforma *ScienceDirect* em foram localizados um total de 198 publicações (artigos de revisão, de pesquisa e livros), distribuídos conforme valores

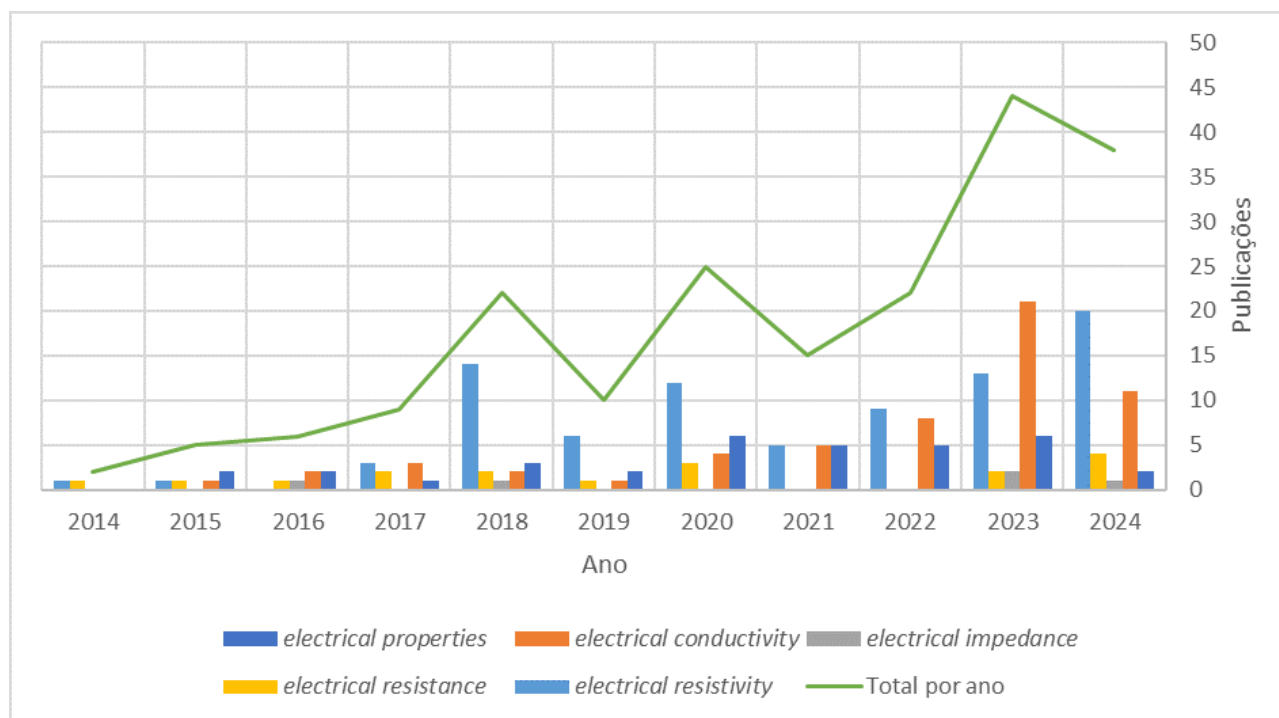
apresentados na Tabela 1. Na análise por ano de publicação os resultados são apresentados na Figura 6. Todos estes resultados levaram em consideração os termos “elétricos”, “cimentícios” e de “obras de infraestrutura”, parametrizados na ferramenta de buscas.

Tabela 1 – Termos e operadores booleanos da pesquisa na plataforma ScienceDirect

Termos elétricos	Quantidade
("electrical properties")	34
("electrical conductivity")	58
("electrical impedance")	5
("electrical resistance")	17
("electrical resistivity")	84
Total de publicações	198

Fonte: elaborada pelos autores (2024).

Figura 6 – Quantidades anuais de publicações na plataforma ScienceDirect para termos pré-definidos

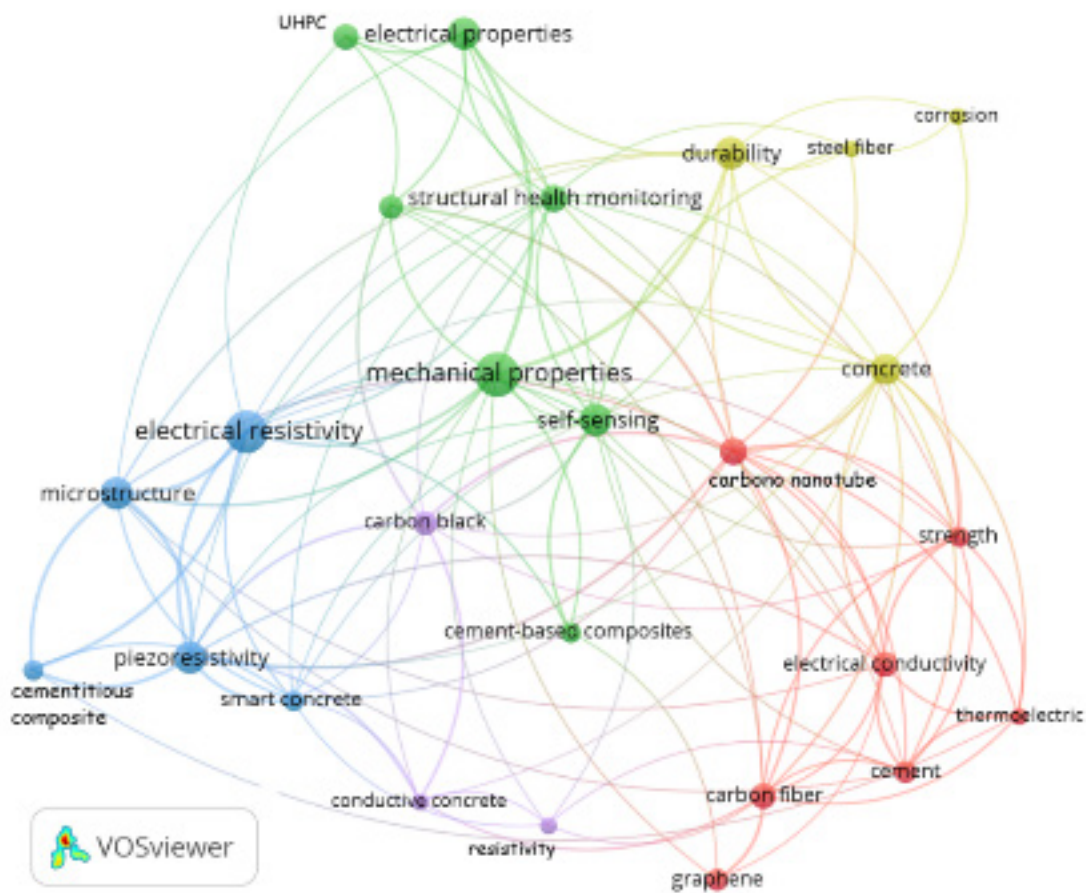


Fonte: elaborado pelos autores (2024).

Observa-se que um número crescente de pesquisas tem sido reportado nos últimos anos na temática dos estudos das propriedades elétricas de compósitos cimentícios aplicados a infraestrutura. Estes números mostram ainda que apesar do crescimento das publicações, em valores absolutos a temática em questão carece de mais pesquisas.

Por meio da rede de conexões gerada pelo software VOSviewer a partir dos dados bibliográficos, foi possível obter o mapa da Figura 7, o qual levou em consideração a co-ocorrência dos principais 26 termos identificados pelo referido software.

Figura 7 – Mapa de rede de conexão dos principais termos de co-ocorrência



Fonte: elaborada pelos autores (2024).

Ainda em relação aos termos da rede de conexão da Figura 7, é possível observar o uso de materiais emergentes na produção de CCPEs como grafeno, negro de fumo e nanotubo de carbono, os quais apresentam alta condutividade elétrica e boas

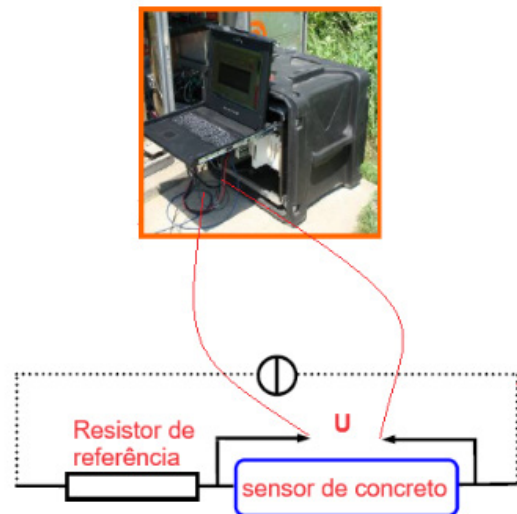
propriedades mecânicas. Entretanto, também são observados materiais convencionais como fibras de aço e de carbono, os quais também conferem melhoras em propriedades elétricas e mecânicas dos compósitos.

3.2. Técnicas de medição de resistência elétrica em compósitos cimentícios

Quanto à forma de medição de resistência elétrica em compósitos cimentícios, nota-se que pode ser realizada por meio de diversas técnicas e métodos. Com isso, o método empregado para medir de grandezas como resistência elétrica pode causar um impacto considerável nos resultados das propriedades elétricas analisadas. Tais métodos podem abranger o uso de circuitos alimentados por corrente alternada (CA), bem como por corrente contínua (CC). Em diversos casos as medições de resistência elétrica envolvem o uso de um circuito que seja alimentado por CC (Figura 8), visando a determinação da queda de tensão elétrica (U), o que possibilita a obtenção do valor da resistência elétrica (Dong *et al.*, 2019; Han *et al.*, 2020; Scholle & Sinapius, 2021).

O Quadro 2 relaciona as principais referências, o tipo de compósito estudado, o material condutivo inserido, a propriedade elétrica estudada e o tipo de corrente e de corpo de prova e eletrodos usados para a medição.

Figura 8 – Medição de tensão elétrica por meio do uso de circuito divisor de tensão para determinação da resistência elétrica em sensor produzido em concreto



Fonte: Adaptado de Han *et al.* (2013)

Quadro 2 – Técnicas e métodos para medição de resistência elétrica em compósitos cimentícios e suas respectivas referências

Referência	Compósito Cimentício	Material Condutivo inserido	Propriedade Elétrica estudada	Modelo de corpo de prova e eletrodo
Silva <i>et al.</i> (2024a)	Argamassa	Resíduo de Lona de Freio	Impedância (CA)	Cúbicos com inserção de eletrodos de placa de alumínio
Silva <i>et al.</i> (2024b)	Argamassa	Resíduo de Lona de Freio	Impedância e Piezorresistividade (CA)	Prismáticos com inserção de eletrodos de placa de cobre
Marçula <i>et al.</i> (2024)	Argamassa	Microfibra de Carbono	Impedância e Piezorresistividade (CA)	Prismáticos com inserção de eletrodos de placa de cobre
Birgin <i>et al.</i> (2023)	Argamassa com cimento e areia	Microfibra de Carbono	Resistividade e Piezorresistividade (CC)	Cúbicos com inserção de eletrodos de cabos de cobre
Dong <i>et al.</i> (2023)	Concreto Asfáltico	Fios e fibras de aço inoxidável	Resistividade (CC e CA)	Cilíndricos, eletrodos externos em fitas adesivas condutoras
Ozaki e Silva <i>et al.</i> (2023)	Argamassa	Grafite em pó	Impedância (CA)	Prismáticos com eletrodos externos de cobre e cúbicos com inserção de eletrodos de placa de alumínio
Cassol <i>et al.</i> (2022)	Concreto	Aditivo compensador de retração à base de óxido de cálcio supercalcinado	Impedância (CA)	Cilíndrico com inserção de eletrodos de placa de aço inoxidável
Ding <i>et al.</i> (2022)	Argamassa	Nanotubo de Carbono	Resistividade e Piezorresistividade (CC)	Cúbicos com inserção de eletrodos de placa de cobre
Wang e Aslani (2021a)	Argamassa	Fibra de Carbono	Resistividade e Piezorresistividade (CC)	Prismáticos com inserção de eletrodos de placa de cobre
Birgin <i>et al.</i> (2020)	Argamassa	Grafite em pó	Resistividade	Cúbico com inserção de eletrodos de rede de aço inoxidável
Sarway <i>et al.</i> (2019)	Argamassa	Fibra e Nanotubo de Carbono	Impedância (CA)	Prismático em larga escala com inserção de eletrodos de bronze
Segura <i>et al.</i> (2019)	Concreto	Fibras de Carbono recicladas	Impedância (CA) Piezorresistividade (CC)	Prismático com inserção de eletrodos cilíndricos de aço inoxidável
Chuang <i>et al.</i> (2017)	Pasta de Cimento	Fibra de Carbono	Resistividade (CC)	Cúbicos com inserção de placa de cobre
Yoo <i>et al.</i> (2017)	Argamassa	Nanotubo de Carbono, Grafeno e Nanofibra de Grafite	Resistividade e Piezorresistividade (CC)	Cúbicos com inserção de eletrodos de placa de cobre

Fonte: elaborado pelos autores (2024).

Cosoli *et al.* (2020) conduziram uma pesquisa que revelou que aproximadamente 65% das referências consultadas por eles, fizeram uso de circuitos com alimentação em CA para medir as propriedades elétricas em compósitos cimentícios. Chuang *et al.* (2017) ressaltam que a utilização de circuitos alimentados por CA é mais complexa do que a utilização de alimentados por CC para medir as propriedades elétricas em compósitos cimentícios. Porém, ocorre o efeito de polarização indicado na Figura 5 no caso de CC.

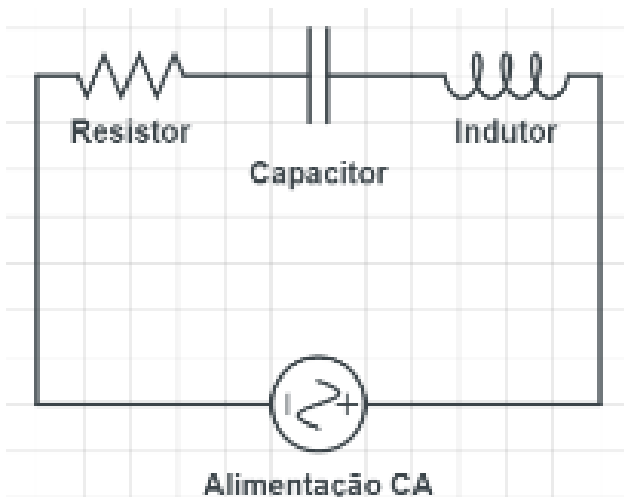
Contudo, no uso dos métodos que envolvem medição com o uso de CA (Figura 9), a impedância elétrica obtida e não a resistência elétrica, uma vez que o circuito equivalente pode conter indutores e/ou capacitores (Figura 10). Isso, promove a ocorrência do efeito de reatância elétrica, uma vez que o pico da corrente e da tensão elétrica não ocorrem simultaneamente (Sarwary *et al.*, 2019).

Figura 9 – Utilização de analisador de impedância em compósito cimentício com dois eletrodos metálicos embutidos



Fonte: Cassol *et al.* (2022) *apud* Silva (2024)

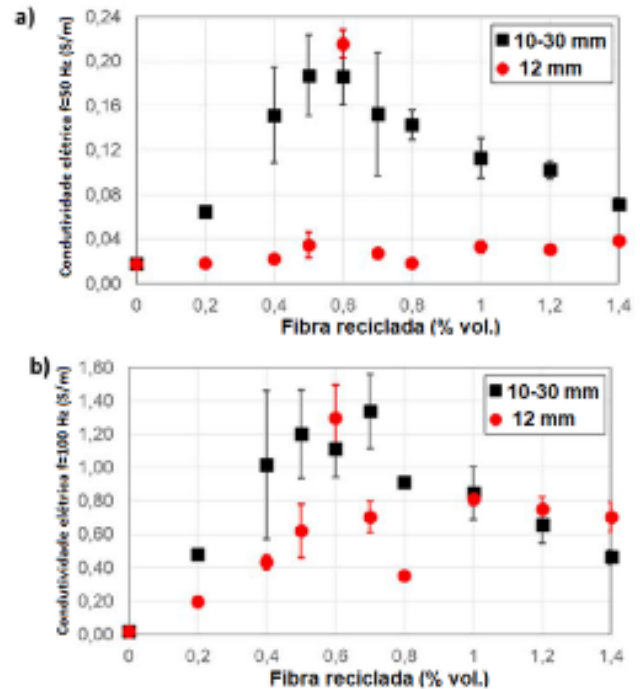
Figura 10 – Circuito elétrico com elementos resistivos e reativos, com alimentação em CA



Fonte: Próprio autor

Ainda no que se refere a análise de compósitos cimentícios por meio de sistemas com alimentação CA, os valores de condutividade elétrica podem ser influenciados pela frequência (Figura 11) da corrente (Segura *et al.*, 2019).

Figura 11 – Influência da variação da frequência da corrente elétrica, entre 50 Hz (a) e 100 kHz (b) na condutividade elétrica de compósito cimentício



Fonte: Segura *et al.* (2019) *apud* Silva (2024)

Seja a medição das propriedades elétricas realizadas com um circuito CA ou CC, essa melhora das propriedades elétricas precisa estar acompanhada ao estudo e compreensão de como a incorporação de materiais condutivos impacta nas propriedades mecânicas dos compósitos para que sejam viabilizados em estruturas. Dessa forma, baseado em diversos estudos da literatura, o grupo de pesquisas dos autores do presente

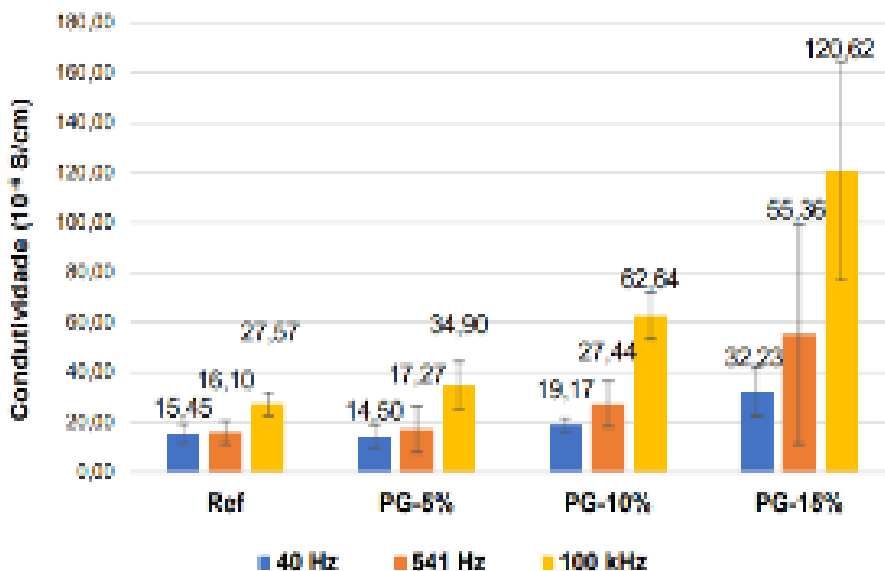
artigo, tem realizado estudos experimentais no campo dos CCPEs. Tais estudos envolvem o uso de grafite (Ozaki e Silva *et al.*, 2023), fibras de carbono Marçula (2024) e resíduo de lona de freio (Silva *et al.*, 2024), os quais visam obter melhor desempenho das propriedades elétricas sem comprometimento significativo das propriedades mecânicas.

Ozaki e Silva (2023), produziu argamassa com o traço 1:0,75:0,5 (cimento:areia:água), com adições de grafite em pó nas proporções de 5%,

10% e 15% em relação a massa do cimento Portland. Isso permitiu o aumento da condutividade elétrica em diversas frequências analisadas, conforme Figura 12.

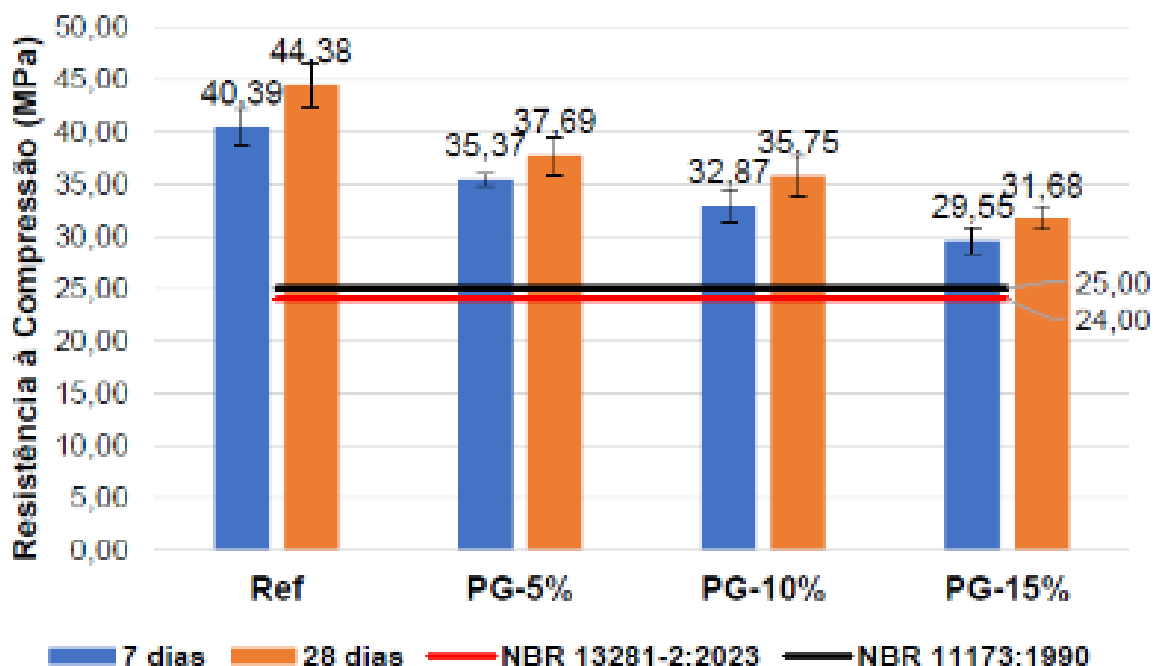
Embora tenha ocorrido perda na resistência à compressão (Figura 13), os resultados do referido estudo se mantiveram dentro dos padrões normativos brasileiros (NBR 13281-2:2023; NBR 11173:1990) quanto a propriedade em referência.

Figura 12 – Valores médios de condutividade elétrica por traço de argamassa com grafite para as medições em frequências de 40 Hz, 541 Hz e 100 kHz



Fonte: Adaptado de Ozaki e Silva (2023).

Figura 13 – Média de valores de resistência à compressão para os traços aos 7 e 28 dias

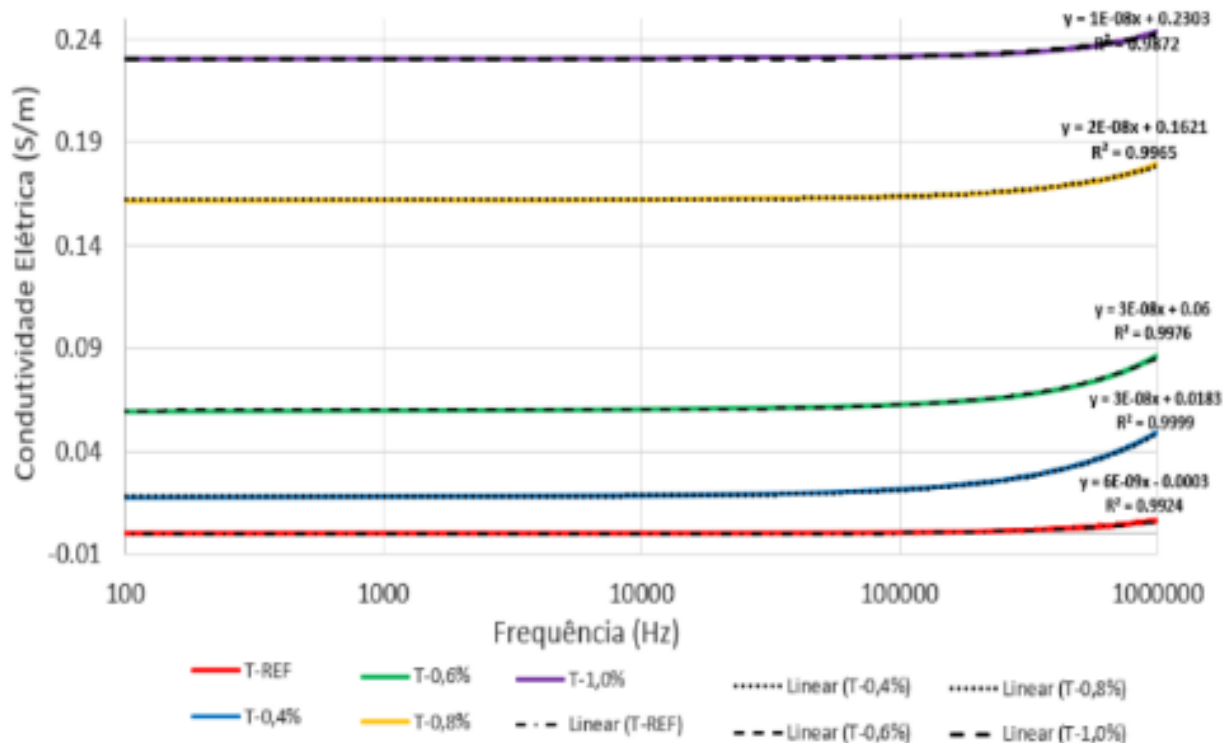


Fonte: Adaptado de Ozaki e Silva (2023).

Marçula (2024), produziu argamassas no traço 1:2:0,45 (cimento:areia:água) com aditivo redutor de água, com adição de fibra de carbono nas proporções de 0,4%, 0,6%, 0,8% e 1% em relação a massa de cimento Portland. Nesse estudo foi obtido o aumento de condutividade elétrica do

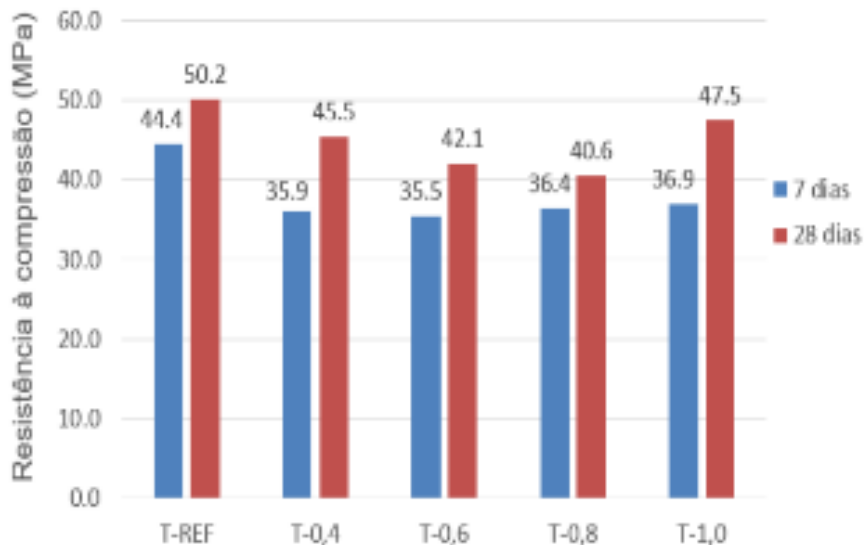
compósito conforme resultados da Figura 14. Em relação as perdas de resistência à compressão (Figura 15) constatadas por Marçula (2024), essas também não ultrapassaram os limites normativos brasileiros.

Figura 14 – Valores médios de condutividade elétrica por traço de argamassa com fibra de carbono para as medições nas frequências de 40 Hz a 1 MHz



Fonte: Adaptado de Marçula (2024).

Figura 15 – Média de valores de resistência à compressão para os traços aos 7 e 28 dias



Fonte: Adaptado de Marçula (2024).

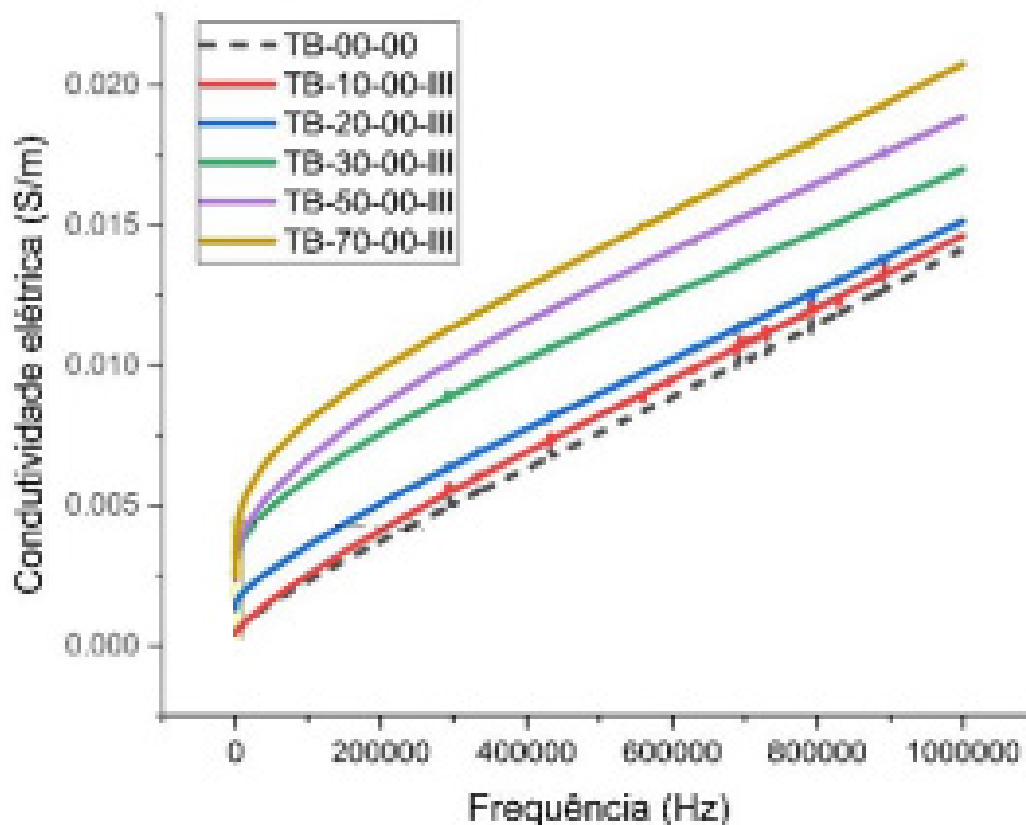
Segundo Frac e Pichór (2020), materiais carbonáceos como fibras, nanotubos e nanografite são de alto custo, o que limita a aplicação dos compósitos, além de causar a diminuição das propriedades mecânicas e da durabilidade. Sendo assim, ao combinar ou substituir por completo por materiais menos nobres (mais baratos e/ou de rejeitos), viabilizar-se-ia sua efetiva utilização em estruturas de larga escala, além de contribuir com a sustentabilidade, tornando-o um material ecofriendly (Silva *et al.*, 2021).

Dessa forma, no campo dos CCPEs com o emprego de materiais de descarte, rejeito e/ou subprodutos, Silva (2024) utilizou resíduo de lona

de freio automotivo na produção de argamassa no traço 1:1:0,37 (cimento:areia:água) com aditivo redutor de água, promovendo a substituição da areia pelo resíduo nas proporções de 10%, 20%, 30%, 50% e 70%. Na referida pesquisa foi obtido o aumento de condutividade elétrica conforme resultados da Figura 16.

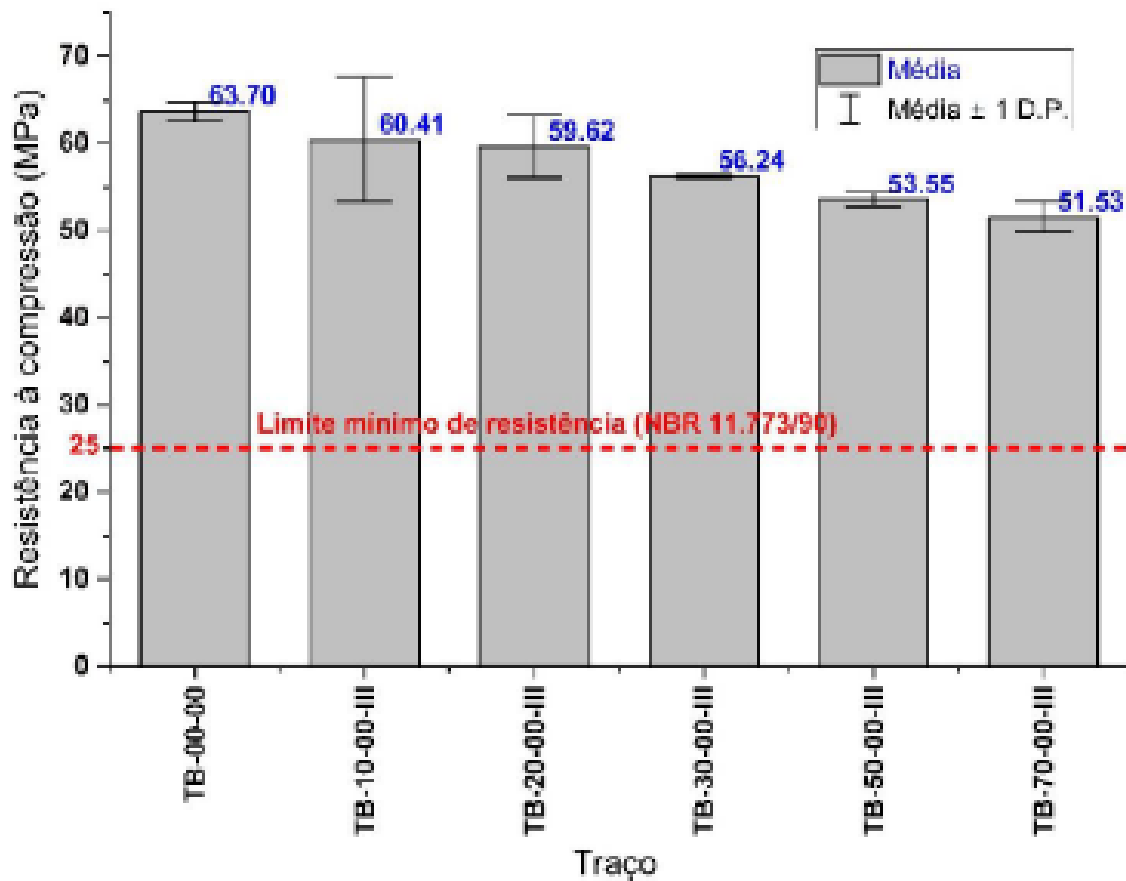
Quanto aos resultados de resistência à compressão (Figura 17) dos compósitos cimentícios com resíduo de lona de freio, Silva (2024) constatou uma diminuição menor em relação ao uso das fibras de carbono, as quais em pequenas quantidades afetaram a resistência em magnitude significativamente maior.

Figura 16 – Valores médios de condutividade elétrica por traço de argamassa com resíduo de lona de freio para as medições nas frequências de 40 Hz a 1 MHz



Fonte: Adaptado de Silva (2024).

Figura 17 – Média de valores de resistência à compressão para os traços aos 28 dias



Fonte: Adaptado de Silva (2024).

3.3. Aplicação de CCPEs e perspectivas futuras

Tais resultados de aumento de condutividade elétrica dos compósitos das pesquisas mencionadas, bem como em alguns casos a pouca diminuição das propriedades mecânicas, indicam quão promissor pode ser o uso de argamassas ou concretos com propriedades elétricas. Além disso, ressalta-se a importância de se pesquisar sobre outros possíveis materiais recicláveis e/ou de reuso, a fim de se implementar também a sustentabilidade e a redução de custos desses novos materiais. Na próxima sessão são apresentadas as possíveis aplicações dos CCPEs.

Várias pesquisas têm objetivado o aperfeiçoamento dos compósitos cimentícios, por meio da incorporação de novos usos para esses, como é o caso dos denominados concretos inteligentes (do inglês smart concrete). A exemplo de infraestrutura rodoviária (Figura 18), esses novos usos podem permitir aplicações como o caso dos pavimentos e estruturas autossensíveis (do inglês self-sensing), autocoletores (do inglês self-harvesting) de energia e degelo (Dong *et al.*, 2023), as quais estão diretamente relacionadas as propriedades elétricas dos compósitos cimentícios.

Os pavimentos e as estruturas autossensíveis, consistem-se na habilidade que o concreto pode possuir em se automonitorar. Nesse caso não há a necessidade do uso de sensores instalados no pavimento ou na estrutura. Tal automonitoramento pode estar relacionado a análise de grandezas como temperatura, pH, umidade, tensão-deformação, entre outros, os quais contribuem para avaliação da situação de uma estrutura ou de um pavimento (Birgin *et al.*, 2023; Mo *et al.*, 2020; Scholle & Sinapius, 2021).

Contudo, ainda são reduzidas as aplicações de CCPEs em construções reais. Han *et al.*, (2013) desenvolveram uma argamassa autossensível, com a incorporação de nanotubos de carbono, visando o uso de sensores cimentícios no pavimento de concreto (Figura 19) de uma rodovia em Albertville-MN, nos Estados Unidos da América, com o objetivo de detectar o tráfego de veículos na referida rodovia. Por meio dos resultados obtidos pelos referidos pesquisadores, constatou-se que os sensores cimentícios podem apresentar vantagens em relação aos convencionais, tais como boa compatibilidade com o pavimento em concreto e maior vida útil.

Figura 18 – Exemplos de aplicações em infraestrutura de pavimentos com compostos multifuncionais

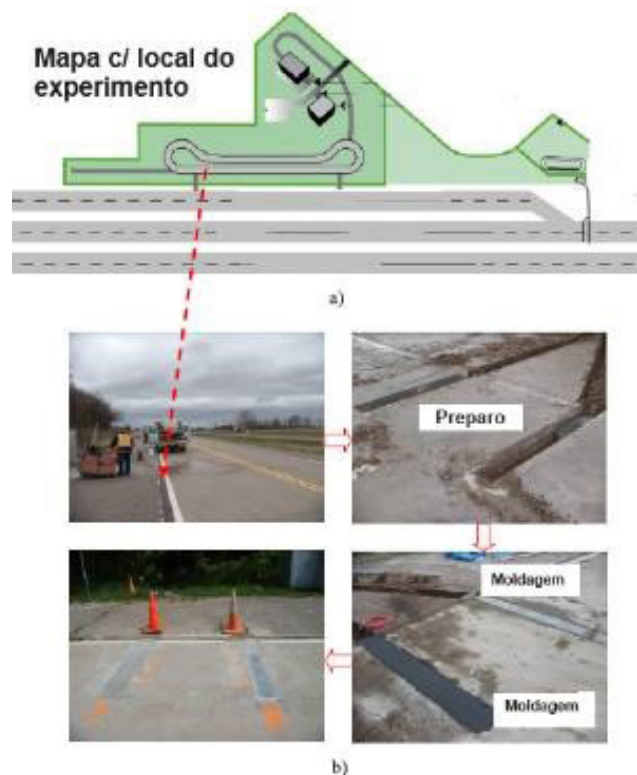


Fonte: Adaptado de Dong *et al.*, 2023.

Em casos mais recentes de aplicações de CCPEs em estruturas reais, ainda que em pequena proporção, como o de Ding *et al.* (2022), foi

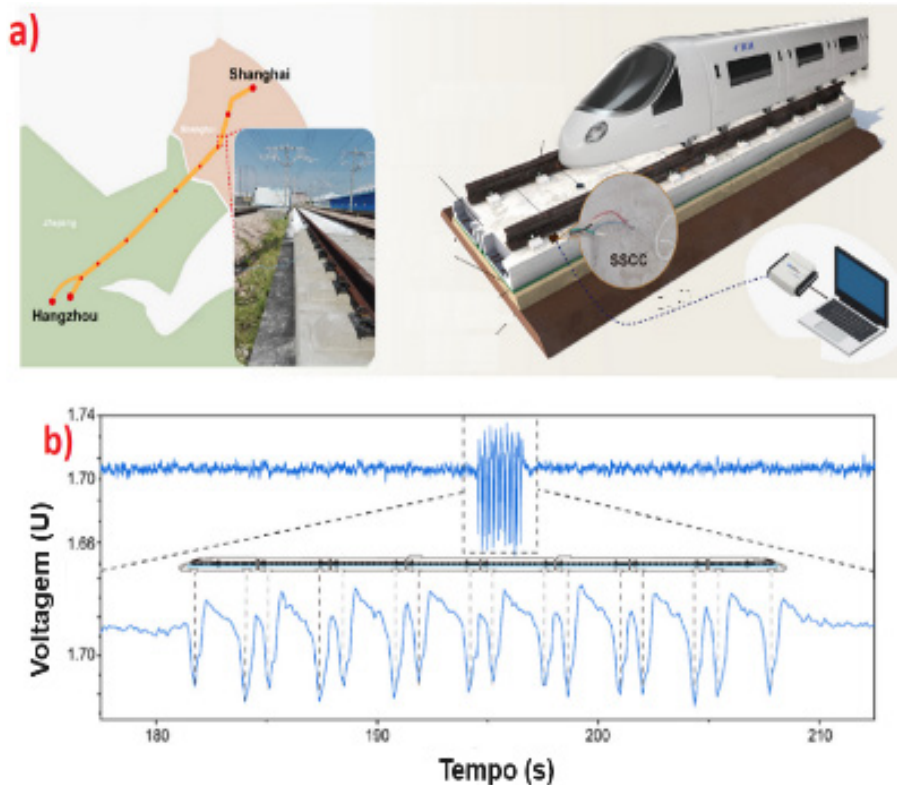
desenvolvida uma pasta cimentícia autossensível com nanotubos de carbono, os quais foram sintetizados diretamente no cimento Portland. O mencionado composto foi aplicado em partes da laje de suporte (Figura 19) dos trilhos da linha ferroviária de alta velocidade que liga Xangai a Hangzhou na China. Segundos os referidos pesquisadores, o composto demonstrou excelentes resultados em termos de repetibilidade e estabilidade das leituras, durante a passagem dos trens. No entanto, de acordo com os autores, é preciso mais empenho para diminuir custos na produção de nanotubos de carbono sintetizados, a fim de permitir sua utilização em larga escala.

Figura 19 – Mapa de localização do experimento (a) e fotos da etapa de preparo e moldagem in loco dos sensores cimentícios (b)



Fonte: Adaptado de Han *et al.* (2013)

Figura 20 – Localização e detalhamento do local de execução do compósito autossensível (a) e resultados gráficos da variação de voltagem com a passagem de trem de alta velocidade (b)

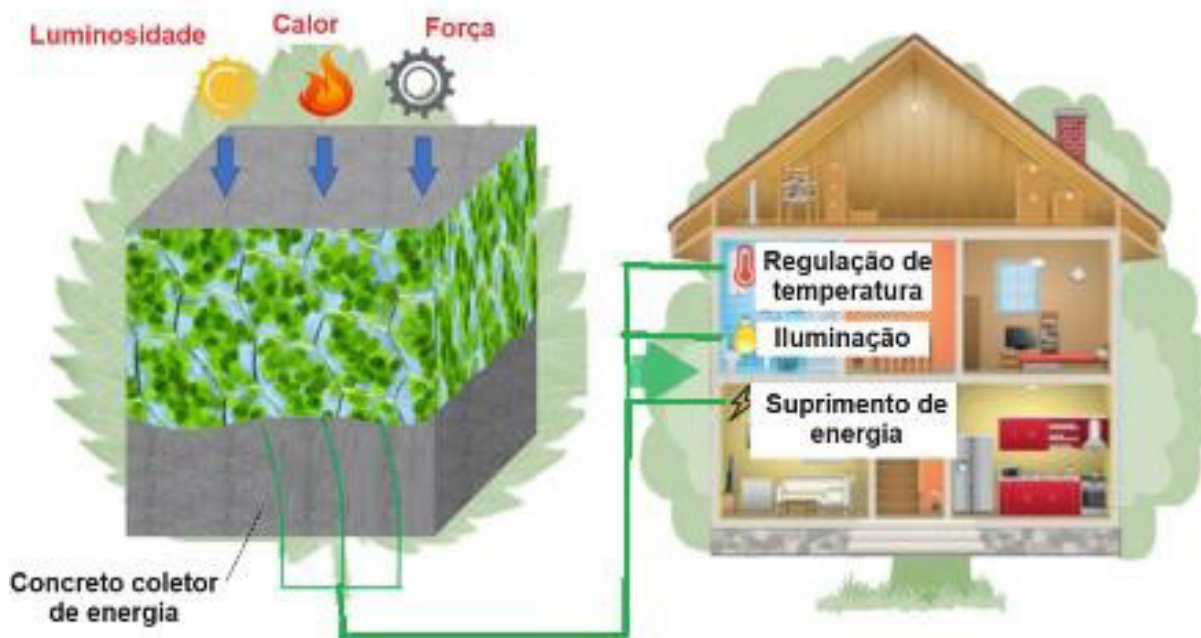


Fonte: Ding *et al.*, 2022.

Qin *et al.* (2024) salientam que vários pesquisadores têm desenvolvido sistemas de captação de energia elétrica a partir de concretos que empregam princípios fotovoltaicos, termoelétricos e piezoelétricos, com o propósito de transformar fenômenos físicos sobre um pavimento de concreto em energia elétrica (Figura 21).

Ainda segundo os autores citados, mesmo com a complexidade e os desafios ainda existentes, a exemplo da utilização das referidas técnicas sem comprometer as propriedades do concreto, esses sistemas de conversão de energia têm potencial para poder colaborar com a redução de emissões de CO₂.

Figura 21 – Esquema de conversão de energia luminosa, térmica e mecânica em energia elétrica por meio de concreto com propriedades multifuncionais



Fonte: Adaptado de Wang *et al.* (2021)

Percebe-se, portanto, grande potencial dos CCPEs para mais segurança e melhor qualidade de vida para o ser humano. Entretanto, para que isso seja possível é necessário a busca pela diminuição do custo deste novo material, bem como a diminuição do consumo de recursos naturais.

4. Considerações Finais

Este trabalho apresentou um panorama geral de como a literatura tem tratado e registrado o estudo dos compósitos cimentícios com propriedades elétricas. Percebe-se que pesquisas para o desenvolvimento e aplicações de compósitos cimentícios com propriedades elétricas têm aumentado significativamente nos últimos anos. Com isso, diversos avanços tecnológicos foram obtidos, os quais indicam que diversas aplicações podem coexistir em um mesmo tipo de compósito. Nota-se que o campo de medição

das propriedades elétricas dos materiais ainda é um desafio, o que demanda um estudo amplo para que seja possível em determinado momento a elaboração de normas e boas práticas sobre o tema.

Contudo, ainda que existam diversas barreiras a serem superadas para que tais compósitos estejam presentes em obras de infraestrutura urbana, ao se adotar soluções ambientalmente amigáveis na produção dos CCPEs, pode-se inclusive colaborar com o atingimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU).

Portanto, são necessárias mais pesquisas para se aprimorar as técnicas de produção e análise dos CCPEs, sem comprometer suas propriedades usuais, como resistência mecânica e durabilidade.

5. Referências

- BIRGIN, H. B.; D'ALESSANDRO, A.; LAFLAMME, S.; UBERTINI, F. Smart Graphite–Cement Composite for Roadway-Integrated Weigh-In-Motion Sensing. *Sensors*, v. 20, 4518, 2020. DOI: 10.3390/s20164518.
- BIRGIN, H. B.; D'ALESSANDRO, A.; UBERTINI, F. A new smart sustainable earth-cement composite doped by carbon microfibers with self-sensing properties. *Developments in the Built Environment*, v. 14, 100168, 2023. DOI: 10.1016/j.dibe.2023.100168.
- BRASIL. SECRETARIA DE COMUNICAÇÃO SOCIAL. Investimentos em infraestrutura voltam a ser prioridade. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/secom/pt-br/assuntos/noticias/2023/12/governo-lula-recupera-investimentos-na-infraestrutura-do-brasil>. Acesso em: 27 ago. 2024.
- CASSOL, D.; RECH, G. L.; THOMAZI, E.; PEROTTONI, C. A.; ZORZI, J. E. Influence of an over calcined calcium oxide-based shrinkage-compensating admixture on some properties of a self-compacting concrete. *Matéria (Rio J)*, v. 27, n. 4, e20220171, 2022. DOI: 10.1590/1517-7076-rmat-2022-0171.
- CHUANG, W.; GENG-SHENG, J.; BING-LIANG, L.; LEI, P.; YING, F.; NI, G.; KE-ZHI, L. Dispersion of carbon fibers and conductivity of carbon fiber-reinforced cement-based composites. *Ceramics International*, v. 43, n. 17, p. 15122-15132, 2017. DOI: 10.1016/j.ceramint.2017.08.041.
- CHUNG, D. D. L. Self-sensing concrete: from resistance-based sensing to capacitance-based sensing. *International Journal of Smart and Nano Materials*, v. 12, n. 1, p. 1-19, 2021a. DOI: 10.1080/19475411.2020.1843560.
- CHUNG, D.D.L. Pitfalls and Methods in the Measurement of the Electrical Resistance and Capacitance of Materials. *J. Electron. Mater.*, v. 50, p. 6567-6574, 2021b. DOI: 10.1007/s11664-021-09223-w.
- CHUNG, D. D. L.; XI, X. A review of the colossal permittivity of electronic conductors, specifically metals and carbons. *Materials Research Bulletin*, v. 148, 111654, 2022. DOI: 10.1016/j.materresbull.2021.111654.
- COSOLI, G.; MOBILI, A.; TITTARELLI, F.; REVEL, G. M.; CHIARIOTTI, P. Electrical Resistivity and Electrical Impedance Measurement in Mortar and Concrete Elements: A Systematic Review. *Appl. Sci.*, v. 10, 9152, 2020. DOI: 10.3390/app10249152.
- D'ALESSANDRO, A.; UBERTINI, F.; MATERAZZI, A. L.; PORFIRI, M. Electrical modelling of carbon nanotube cement-based sensors for structural dynamic monitoring. *AIP Conf Proc.*, 1603, p. 23-30, 2014. DOI: 10.1063/1.4883038.
- DEHGHANI, A.; ASLANI, F. Piezoresistive Sensing of Cementitious Composites Reinforced with Shape Memory Alloy, Steel, and Carbon Fibres. *Construction and Building Materials*, v. 267, 121046, 2021a. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121046.
- DING, S.; DONG, S.; ASHOUR, A.; HAN, B. Development of sensing concrete: Principles, properties and its applications. *Journal of Applied Physics*, v. 126, n. 24, 241101, 2019. DOI: 10.1063/1.5128242.
- DING, S.; XIANG, Y.; NI, Y-Q.; THAKUR, V. K.; WANG, X.; HAN, B.; OU, J. In-situ synthesizing carbon nanotubes on cement to develop self-sensing cementitious composites for smart high-speed rail infrastructures. *Nano Today*, v. 43, 101438, 2022. DOI: 10.1016/j.nantod.2022.101438.
- DONG, S.; ZHANG, W.; D'ALESSANDRO, A.; HAN, B.. Developing highly conductive asphalt concrete by incorporating stainless steel fibers/wires for smart pavement. *Journal Of Materials Science, [S.L.]*, v. 58, n. 27, p. 11062-11084, 2023. DOI: 10.1007/s10853-023-08736-5.

DONG, W.; LI, W.; TAO, Z.; WANG, K. Piezoresistive properties of cement-based sensors: Review and perspective. *Construction and Building Materials*, v. 203, p. 146-163, 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.081.

DOWNEY, A.; D'ALESSANDRO, A.; UBERTINI, F.; LAFLAMME, S. Automated crack detection in conductive smart-concrete structures using a resistor mesh model. *Measurement Science and Technology*, v. 29, n. 3, 035107, 2018. DOI: 10.1088/1361-6501/aa9fb8.

FRANC, M., PICHÓR, W. Piezoresistive properties of cement composites with expanded graphite. *Composites Communications*, v. 19, p. 99–102, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2020.03.005>.

HAGHGOO, M.; ANSARI, R.; HASSANZADEH-AGHDAM, M. K. Prediction of piezoresistive sensitivity and percolation probability of synergetic CNT-GNP conductive network composite. *Sensors and Actuators A: Physical*, v. 336, 113414, 2022. DOI: 10.1016/j.sna.2022.113414.

HAN, B.; ZHANG, K.; BURNHAM, T.; KWON, E.; YU, X. Integration and road tests of a self-sensing CNT concrete pavement system for traffic detection. *Smart Materials and Structures*, 22, 015020, 2013. DOI 10.1088/0964-1726/22/1/015020.

HAN, J.; PAN, J.; CAI, J.; LI, X. A review on carbon-based self-sensing cementitious composites. *Construction and Building Materials*, v. 265, 120764, 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120764.

MARÇULA, S.C. (2024). Análise de Propriedades Elétricas e Mecânicas de Argamassa com Incorporação de Microfibra de Carbono. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Faculdade de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia. Limeira-SP.

MO, Y.L.; GAUTAM, A.; CHEN, Y.; CHEN, J.; JOSHI, B. Electrical impedance of carbon nanofiber aggregates. In: LIEW, M. S.; NGUYEN-TRI, P.;

NGUYEN, T. A.; KAKOOEI, S. *Micro and Nano Technologies, Smart Nanoconcretes and Cement-Based Materials*. [S.l]: Elsevier, 2020. p. 333-349. DOI: 10.1016/B978-0-12-817854-6.00014-3.

OZAKI E SILVA, C.T. (2023). Comparação das propriedades mecânicas e condutividade elétrica de argamassas com adição de grafite em pó. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Faculdade de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia. Limeira-SP.

OZAKI E SILVA, C.T.; SILVA, J.B.L.P.; LINTZ, R.C.C.; GACHET, L.A. Mortars with addition of powdered graphite: Mechanical and electrical properties. *Materials Today: Proceedings* (2023). DOI: 10.1016/j.matpr.2023.03.489.

QIN, H.; DING, S.; ASHOUR, A.; ZHENG, Q.; HAN, B. Revolutionizing infrastructure: The evolving landscape of electricity-based multifunctional concrete from concept to practice. *Progress in Materials Science*, 145, 101310, 2024. DOI 10.1016/j.pmatsci.2024.101310.

SARWARY, M. H.; YILDIRIM, G.; AL-DAHAWI, A.; ANIL, Ö.; KHIAMI, KA.; TOKLU, K.; SAHMARAN, M. Self-Sensing of Flexural Damage in Large-Scale Steel-Reinforced Mortar Beams *ACI Mater. J.*, v. 116, p. 209-221, 2019. DOI: 10.14359/51715581.

SEGURA, I.; FANECÁ, G.; TORRENTS, J. M.; AGUADO, A. Self-sensing concrete made from recycled carbon fibres. *Smart Materials and Structures*, v. 28, n. 10, 105045, 2019. DOI: 10.1088/1361-665x/ab3d59.

SCHOLLE, P.; SINAPIUS, M. A Review on the Usage of Continuous Carbon Fibers for Piezoresistive Self Strain Sensing Fiber Reinforced Plastics. *J. Compos. Sci.*, v. 5, n. 4, 96, 2021. DOI: 10.3390/jcs5040096.

SILVA, J. B. L. P. (2024). Estudo do desempenho físico-mecânico, elétrico e piezorresistivo de compósito cimentício autossensível produzido com resíduo de lona de freio e fibra de carbono. Tese (Doutorado). Universidade Estadual de Campinas

(UNICAMP). Faculdade de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia. Limeira-SP.

SILVA, J.B.L.P.; LINTZ, R.C.C. E; GACHET, L.A. Analysis of the electrical and mechanical properties of cement composite produced with brake lining waste. *Advances in Science And Technology*. 149, 21-29, 2024a. DOI:10.4028/p-dR94lv.

SILVA, J. B. L. P.; LINTZ, R. C. C.; GACHET, L. A. Análise do efeito piezoresistivo em compósito cimentício autossensível sob diferentes disposições de carregamento uniaxial. In: Congresso Nacional Reabilitar & Betão Estrutural 2020, LNEC, Lisboa. p. 849-857, 2021. ISBN: 978-989-53078-1-4 https://reabilitarbe2020.pt/r&be2020_final.pdf.

SILVA, J.B.L.P.; OZAKI E SILVA, C.T.; MARÇULA, S.C.; ROS, P.S.; LINTZ, R.C.C. E; GACHET, L.A. Self-sensing cement composite based on the piezoresistive effect with brake lining waste. *Construction and Building Materials*, v. 456, p. 139273, 2024b. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.139273.

WANG, L.; ASLANI, F. A review on material design, performance, and practical application of electrically conductive cementitious composites. *Construction and Building Materials*, v. 229, 116892, 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116892.

WANG, L.; ASLANI, F. Mechanical properties, electrical resistivity and piezoresistivity of carbon fibre-based self-sensing cementitious composites. *Ceramics International*, v. 47, n. 6, p. 7864-7879, 2021a. DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.11.133.

WANG, X.; DONG, S.; ASHOUR, A.; HAN, B. Energy-harvesting concrete for smart and sustainable infrastructures. *Journal of Materials Science*. 56:16243–16277, 2021. DOI 10.1007/s10853-021-06322-1.

YOO, D-Y.; YOU, I.; LEE, S-J. Electrical Properties of Cement-Based Composites with Carbon Nanotubes, Graphene, and Graphite Nanofibers. *Sensors*, v. 17, 1064, 2017. DOI: 10.3390/s17051064.