XV SBTA Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas
Porto Alegre/RS - 11 a 13 de junho de 2025

DESEMPENHO DE ARGAMASSAS CIMENTÍCIAS CONDUTIVAS COM INCORPORAÇÃO DE FÍLER CALCÁRIO

Performance of electrically conductive cementitious mortars with limestone filler incorporation

EMANOEL CUNHA ARAÚJO[1], ANDRESSA GOBBI[2], MARCELO HENRIQUE FARIAS DE MEDEIROS[3], ANA BLANCO[4]
[1]Doutorando, Universidade Federal do Paraná, emanoelcunhaa@gmail.com
[2] Docente, Universidade Federal do Paraná, andressagobbi@ufpr.br
[3] Docente, Universidade Federal do Paraná, medeiros.ufpr@gmail.com
[4] Docente, Loughborough University, A.Blanco-Alvarez@lboro.ac.uk

RESUMO
O desenvolvimento de materiais multifuncionais é fundamental para aprimorar o monitoramento da integridade estrutural. Este estudo investiga o desempenho de argamassas cimentícias condutivas com a incorporação de fíler calcário, com foco na sustentabilidade. Foram avaliadas propriedades no estado fresco, físicas, mecânicas, elétricas, além de coeficientes de ecoeficiência. Os resultados indicaram que a incorporação de fibra de carbono e fíler calcário reduziu a resistividade elétrica para 0,11 kΩ·cm, adequada para aplicações multifuncionais, mantendo as propriedades físicas e mecânicas. Além disso, a substituição parcial de cimento Portland por fíler calcário aprimorou os índices de ecoeficiência dos compósitos sem comprometer o desempenho elétrico.

Palavras-chave: Grafeno. Fibra de carbono. Resistividade elétrica. Fíler calcário. Argamassa.

ABSTRACT
Developing multifunctional materials is essential for enhancing structural health monitoring of concrete. This study investigates the performance of conductive cementitious mortars incorporating limestone filler, focusing on sustainability. Properties in the fresh state, physical, mechanical, and electrical properties, along with eco-efficiency coefficients, were evaluated. The results showed that incorporating carbon fibre and limestone filler reduced electrical resistivity to 0.11 kΩ·cm, making it suitable for multifunctional applications while maintaining physical and mechanical properties. Additionally, the partial replacement of Portland cement with limestone filler improved the composites' eco-efficiency indices without compromising electrical performance.

Key-words: Graphene. Carbon fiber. Electrical resistivity. Limestone filler. Mortar.

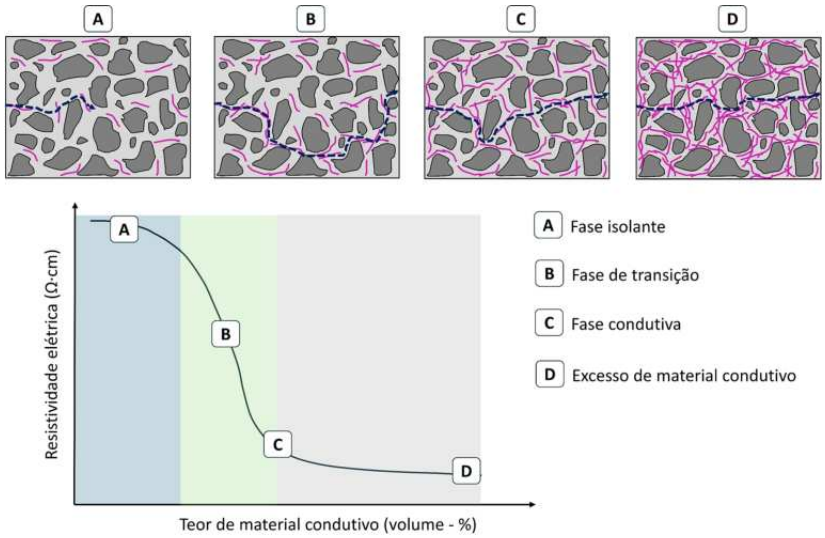
Como citar:
ARAÚJO, E. C.; GOBBI, A.; MEDEIROS, M. H. F.; BLANCO, A. Desempenho de argamassas cimentícias condutivas com a incorporação de fíler calcário. In: XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 2025, Porto Alegre. **Anais**... Porto Alegre: ANTAC, 2025.

INTRODUÇÃO

Materiais multifuncionais têm recebido crescente atenção na construção civil devido às suas aplicações, que incluem proteção catódica, auto aquecimento pelo efeito Joule, auto cicatrização, detecção de fissuras e corrosão, sensores de umidade, temperatura, tráfego e deformações, além de blindagem contra interferência eletromagnética (EMI) [1][2]. Nesse contexto, os compósitos cimentícios multifuncionais destacam-se como soluções promissoras, resultantes da incorporação de materiais condutivos, como fibras de carbono (FC), grafite, grafeno, nanotubos de carbono (NTC), nanofibras de carbono (NFC), fibras de aço, escória de aço, entre outros, à matriz cimentícia convencional. A adição desses materiais altera significativamente o comportamento elétrico do compósito, transformando-o de isolante para condutivo. No entanto, a eficiência desta mudança está diretamente relacionada a fatores como a dispersão, o teor e a morfologia das partículas condutivas empregadas [2].

A teoria da percolação constitui uma abordagem amplamente utilizada para determinar o teor ideal de materiais condutivos necessário para a formação de uma rede condutiva na matriz cimentícia. Como ilustrado na Figura 1, o comportamento elétrico dos compósitos pode ser classificado em diferentes fases, conforme o teor de partículas condutivas.

Figura 1 – Teoria da percolação.

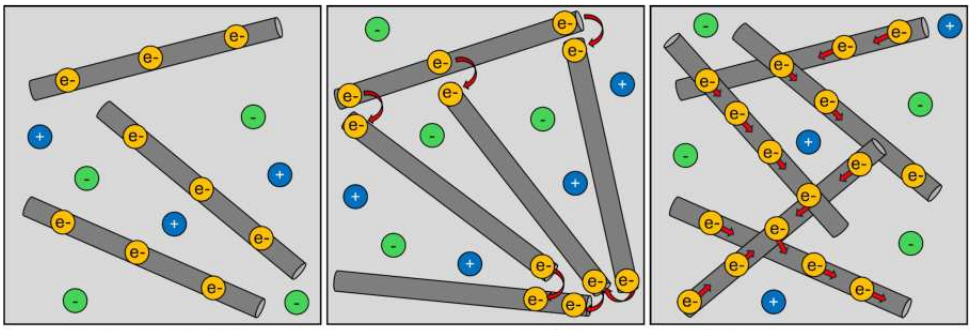


Fonte: Adaptado [3]

Na fase isolante (Figura 1 – A), a quantidade de partículas é insuficiente para formar caminhos condutivos, enquanto na fase de transição (Figura 1 – B), o aumento no teor de partículas provoca um incremento significativo na condutividade elétrica. No limiar de percolação (Figura 1 – C), forma-se uma rede condutiva contínua, que possibilita a condução eficiente de eletricidade. Teores superiores a esse limite (Figura 1 – D) promovem ganhos irrisórios na condutividade [2][3]. Essa abordagem possibilita o uso racional de materiais condutivos, considerando o elevado custo associado a esses componentes quando comparados aos constituintes tradicionais do concreto.

Na Figura 2, são apresentados os mecanismos de condução elétrica em compósitos cimentícios com a adição de partículas condutivas. Em concretos convencionais, a condução ocorre predominantemente pela movimentação de íons presentes na solução dos poros, como Ca^{2+}, Na^{+}, K^{+}, OH^{-}, SO_4^{2-} (Figura 2 – A). Com o aumento do teor de partículas condutivas, reduz-se a distância entre elas, possibilitando a ocorrência do efeito de tunelamento, no qual elétrons transitam entre partículas próximas (Figura 2 – B). Finalmente, na presença de uma rede condutiva contínua, os elétrons podem se mover livremente ao longo da matriz cimentícia (Figura 2 – C), conferindo ao compósito propriedades condutoras [2][4].

Figura 2 – Tipos de condução em compósitos cimentícios: (A) Movimentação iônica; (B) Tunelamento de elétrons; (C) Condução por contato.



Fonte: Os autores (2025).

Entre os materiais condutivos amplamente utilizados, a FC destaca-se por suas propriedades superiores, como elevada resistência mecânica, alto módulo de elasticidade axial e excelente condutividade elétrica [4]. No entanto, seu custo elevado e a dificuldade de dispersão homogênea em soluções aquosas representam desafios para a sua aplicação em larga escala [2]. A incorporação de baixos teores de FC na matriz torna-se essencial, permitindo reduzir custos, manter uma boa trabalhabilidade e preservar o desempenho mecânico do material. Além disso, estratégias para aprimorar sua dispersão têm sido investigadas, como o uso de dispersantes orgânicos, a exemplo do metil celulose, em combinação com materiais cimentícios suplementares (MCS). Essas adições favorecem a dispersão das FC e preservam as propriedades da matriz cimentícia devido ao efeito sinérgico da separação das fibras pela interação com partículas finas, aliado às reações pozolânicas e à ação do dispersante orgânico, melhorando a aglutinação das fibras à matriz [5].

Ademais, as FC apresentam alta resistência à corrosão quando comparadas às fibras de aço, o que contribui para a durabilidade do material, especialmente em ambientes agressivos. Dessa forma, quando adequadamente dispersas, as FC favorecem a formação de redes condutivas monolíticas, devido as suas dimensões macrométricas, otimizando as propriedades elétricas do compósito cimentício [6].

A resistividade elétrica (RE) em materiais à base de cimento é influenciada por fatores como a presença de MCS, a presença de partículas condutivas, o empacotamento de partículas, a relação água/aglomerante, o teor de agregados, o grau de saturação, a temperatura e a idade da amostra [7][8][9][10][11][12]. Deve-se destacar que a RE é utilizada como parâmetro de durabilidade em avaliações estruturais, controle de qualidade e modelos de vida útil. Por

outro lado, a condutividade elétrica é o inverso da RE e representa um parâmetro essencial na caracterização desses compósitos multifuncionais, pois governa a eficiência destes materiais.

Em paralelo ao desenvolvimento de materiais multifuncionais, a indústria da construção civil tem intensificado esforços para expandir o uso de materiais cimentícios mais sustentáveis, dado que a produção do cimento Portland é responsável por uma parcela significativa das emissões de dióxido de carbono equivalente na atmosfera. Nesse cenário, o uso de resíduos industriais, como o fíler calcário, tem ganhado destaque como uma alternativa promissora na produção de materiais cimentícios. Essa abordagem não apenas contribui para a redução dos impactos ambientais ao promover a destinação adequada desses resíduos, mas também melhora as propriedades físicas e mecânicas dos compósitos.

Embora diversos estudos investiguem o impacto de materiais à base de carbono na condutividade elétrica de materiais cimentícios, são escassos os que abordem estratégias voltadas para a redução do consumo de cimento em compósitos desta natureza. Diante disso, surge a questão: é possível desenvolver materiais cimentícios condutivos mais sustentáveis com a incorporação de fíler calcário? Dessa forma, este estudo tem como objetivo avaliar os efeitos da substituição parcial de cimento Portland por fíler calcário nas propriedades mecânicas, físicas e elétricas de compósitos cimentícios multifuncionais contendo FC e grafeno em sua formulação.

PROGRAMA EXPERIMENTAL

Um cimento tipo CP V-ARI (alta resistência inicial) foi utilizado na formulação das argamassas, apresentando massa específica de 3,06 g/cm³ [13]. Para a substituição parcial do aglomerante, empregou-se fíler calcário com massa específica de 2,78 g/cm³ [13]. A caracterização dos finos é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Caracterização dos finos utilizados na formulação das argamassas.

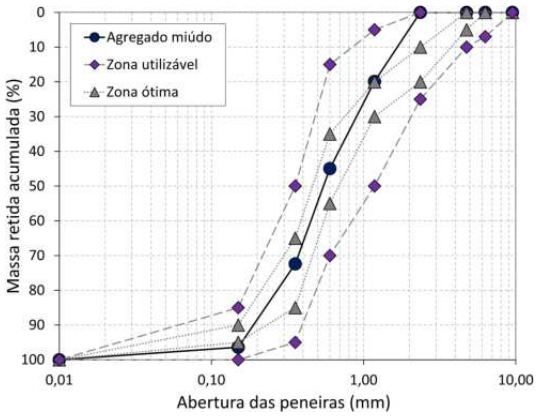
Caracterização química dos finos												
Material	CaO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	SO_3	Fe_2O_3	K_2O	Outros	Perda ao fogo	CaO livre	Resíd. Insol.	Equiv. Alcal.
CP V-ARI (%)	61,31	18.55	4,39	3,37	2,71	3,69	-	-	3,56	1,65	0,83	0,68
Fíler calcário (%)	42,63	9.21	3,02	5,57	0,11	0,63	0,44	0,03	38,37	-	-	-

Caracterização física e mecânica do CP V-ARI						
Blaine	#200	#325	Resistência à compressão (MPa)			
(cm²/g)	(%)	(%)	01 dia	03 dias	07 dias	28 dias
4.404	0,13	0,69	26,9	39,6	45,3	53,5

Fonte: Os autores (2025).

O agregado miúdo utilizado foi uma areia natural de leito de rio, com massa específica de 2,38 g/cm³ [14] e DMC de 2,36 [15]. A distribuição granulométrica do agregado é apresentada na Figura 3.

Figura 3 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo.



Fonte: Os autores (2025).

Partículas de grafeno, com massa específica de 2,38 g/cm³ [16], foram incorporadas devido à sua alta condutividade elétrica e impacto positivo nas propriedades mecânicas, estabilidade dimensional e durabilidade de materiais cimentícios [4][12][17].

As FC utilizadas possuem comprimento de 20 mm e foram incorporadas juntamente aditivo químico orgânico, hidroxipropil metil celulose modificado (HPMC) de baixa viscosidade, com tamanho de partícula inferior a 177 µm, para otimizar a dispersão em meio aquoso.

Um aditivo superplastificante (SP) de terceira geração com massa específica de 1,10 g/cm³ e teor de sólidos de 44% (±2%) foi empregado na composição da solução para dispersão das partículas de grafeno.

As argamassas foram preparadas com a proporção de mistura de 1:2:0,5 (finos[1]:agregado:água). A Tabela 2 apresenta o consumo de materiais das misturas por m³. As proporções de grafeno, HPMC e superplastificante foram mantidas constantes em 0,125%, 0,20% e 1,00%, respectivamente. Os teores de FC variaram entre 0,00%, 0,50% e 1,00%, em relação a massa de finos. O cimento foi parcialmente substituído por fíler calcário nas proporções de 10% e 20%, em massa.

Tabela 2 – Consumo de materiais por m³ das argamassas.

Mistura	Cimento (kg)	Fíler calcário (kg)	Areia (kg)	Água (kg)	Grafeno (kg)[1]	HPMC (kg)[2]	FC (kg)[3]	SP (kg)[4]
REF-0.5	612,28	-	1224,55	306,14	0,77	1,22	-	6,12
F0.5-0.5	612,28	-	1224,55	306,14	0,77	1,22	3,06	6,12
F1.0-0.5	612,28	-	1224,55	306,14	0,77	1,22	6,12	6,12
L10-0.5	549,96	61,11	1222,13	305,53	0,76	1,22	-	6,11
F0.5-L10-0.5	549,96	61,11	1222,13	305,53	0,76	1,22	3,06	6,11
F1.0-L10-0.5	549,96	61,11	1222,13	305,53	0,76	1,22	6,11	6,11
L20-0.5	487,89	121,97	1219,71	304,93	0,76	1,22	-	6,10
F1.0-L20-0.5	487,89	121,97	1219,71	304,93	0,76	1,22	6,10	6,10

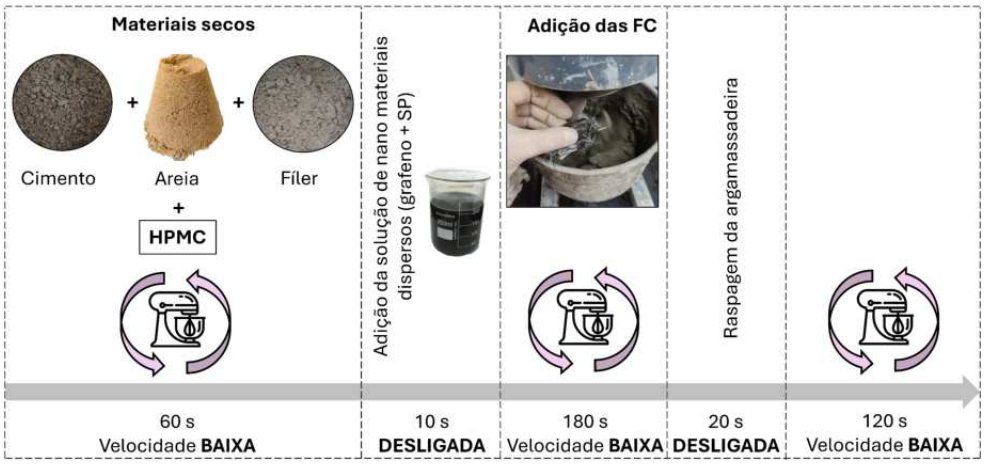
[1,2,3,4]Adicionados pela massa de finos (cimento+fíller calcário)

Fonte: Os autores (2025).

[1] Finos: Cimento + Fíler calcário

A Figura 4 ilustra o método de mistura utilizado. Inicialmente, todos os materiais secos foram homogeneizados. Em seguida, adicionou-se a solução de materiais dispersos (composta por grafeno, água e SP), previamente sonificada em uma lavadora ultrassônica (marca Schuster, Modelo L-100) por 40 minutos operando à 60 Hz e 160W. Após essa etapa, as FC foram adicionadas manualmente, com a argamassadeira em funcionamento. O tempo total de mistura foi de 390 segundos.

Figura 4 – Etapas do método de mistura das argamassas.



Fonte: Os autores (2025).

Após a mistura, as argamassas foram avaliadas no estado fresco quanto à densidade aparente e índice de consistência, de acordo com a NBR 13278 [18] e NBR 13276 [19], respectivamente. As amostras foram moldadas, desformadas após 24 horas e submetidas à cura submersa em água saturada com cal até a idade de análise.

No estado endurecido, a resistência à compressão e à flexão foram avaliadas aos 28 dias em cubos de 40 mm e prismas de 40x40x160 mm, respectivamente, conforme NBR 13279 [20], utilizando uma máquina universal servo controlada da marca INSTRON (modelo 23-300). A absorção de água e índice de vazios foram determinados conforme a NBR 9778 [21], utilizando uma metade dos corpos de prova rompidos no ensaio de resistência à flexão.

A RE foi medida pelo método volumétrico utilizando um gerador de funções com frequência fixa de 700 Hz, conforme arranjo da Figura 5. As medições de tensão e corrente foram realizadas com voltímetro e amperímetro. A resistividade elétrica volumétrica (ρ) foi calculada pelas equações (1), (2) e (3).

Figura 5 – Configuração do ensaio de resistividade elétrica volumétrica.



Fonte: Os autores (2025).

$$R = \frac{V}{I} \tag{1}$$

$$\rho = k \cdot R \tag{2}$$

$$k = \frac{A}{L} \tag{3}$$

Onde, R: resistência elétrica (Ω); V: tensão elétrica (V); I: corrente elétrica (A); ρ: resistividade volumétrica (Ω·cm); k: fator de forma (cm); A: área da seção transversal da amostra (cm²); L: comprimento da amostra.

As medições da resistividade elétrica foram realizadas nas amostras na condição saturada superfície seca, utilizando uma esponja saturada com água e gel condutivo para melhorar o contato entre as faces das amostras e as chapas metálicas. As leituras foram realizadas aos 07, 14, 21 e 28 dias.

A ecoeficiência das argamassas foi avaliada pelo coeficiente *Bi* proposto por Damineli *et al.* [22], que quantifica a eficiência do consumo de ligantes ao indicar a quantidade de aglomerante necessária para atingir 1 MPa de resistência. O cálculo desse coeficiente é apresentado na equação (4). De forma análoga, a eficiência do consumo de ligantes em relação à condutividade elétrica foi expressa pelo coeficiente *Bc*, que representa a quantidade de aglomerante requerida para alcançar 1 S/m de condutividade, conforme a equação (5). A equação (6) descreve a condutividade elétrica (σ) a partir do inverso da resistividade elétrica.

$$Bi = \frac{\frac{kg\ de\ aglomerante}{m^3 de\ argamassa}}{Resistência\ à\ compressão\ aos\ 28\ dias\ (MPa)} \tag{4}$$

$$Bc = \frac{\frac{kg\ de\ aglomerante}{m^3 de\ argamassa}}{Condutividade\ elétrica\ (S/m)} \quad (5)$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (6)$$

Tabela 3 apresenta os ensaios realizados no estado endurecido, incluindo tipos de amostra, quantidades por traço e idades avaliadas.

Tabela 3 – Resumo dos ensaios realizados no estado endurecido.

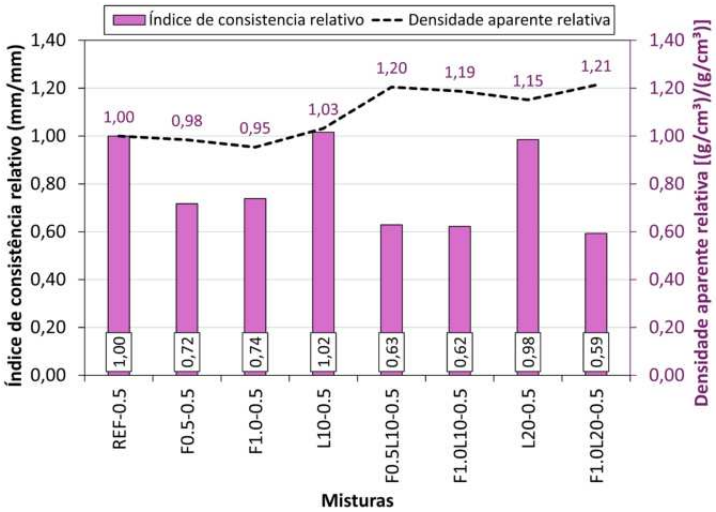
Ensaio	Tipo de amostra	Quantidade de amostras por traço	Idade avaliada
Resistência à compressão	Cubos de 40x40x40 mm	3	28 dias
Resistência à flexão	Prismas de 40x40x160 mm	3	28 dias
Absorção de água e índice de vazios	Metades rompidas no ensaio de flexão, aproximadamente 40x40x80 mm	6	28 dias
Resistividade elétrica volumétrica	Prismas de 40x40x160 mm	3	7, 14, 21 e 28 dias

Fonte: Os autores (2025).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 6 apresenta a caracterização das argamassas no estado fresco, com os resultados expressos em valores relativos do índice de consistência [Índice de consistência(mm)$_{Mix\ -\ "i"}$/Índice de consistência(mm)$_{Mix-Ref}$] e da densidade aparente [Densidade aparente(g/cm³)$_{Mix\ -\ "i"}$/Densidade aparente(g/cm³)$_{Mix-Ref}$].

Figura 6 – Índice de consistência relativo e densidade aparente relativa das argamassas.



Fonte: Os autores (2025).

A incorporação de FC em teores de 0,5% e 1,0% reduziram a consistência em 28% e 26%, respectivamente. Esse efeito é ainda mais pronunciado quando há a presença de fíler calcário, com reduções entre 37% e 41%. Por outro lado, a substituição de cimento Portland por fíler calcário nos teores de 10% (L10-0.5) e 20% (L20-0.5), não apresentou impacto significativo na trabalhabilidade das argamassas.

A Figura 7 apresenta o aspecto visual das argamassas após o ensaio de *flow table*. Nota-se que as misturas contendo apenas FC, bem como aquelas combinando FC com fíler calcário, apresentam comportamento mais viscoso quando comparadas à mistura de referência ou às misturas com apenas fíler.

Quanto a densidade aparente, observa-se que esta propriedade se manteve praticamente inalterada com a adição das FC e com a incorporação de fíler em 10%. Entretanto, a combinação entre ambos os materiais, particularmente com 20% de fíler, resultaram em aumentos da densidade aparente, possivelmente devido ao maior empacotamento de partículas, como observado por Campos *et al*. [23], decorrente da interação entre partículas de diferentes formas e tamanhos.

Figura 7 – Aspecto visual das argamassas no estado fresco após o ensaio do *flow table*.



Fonte: Os autores (2025).

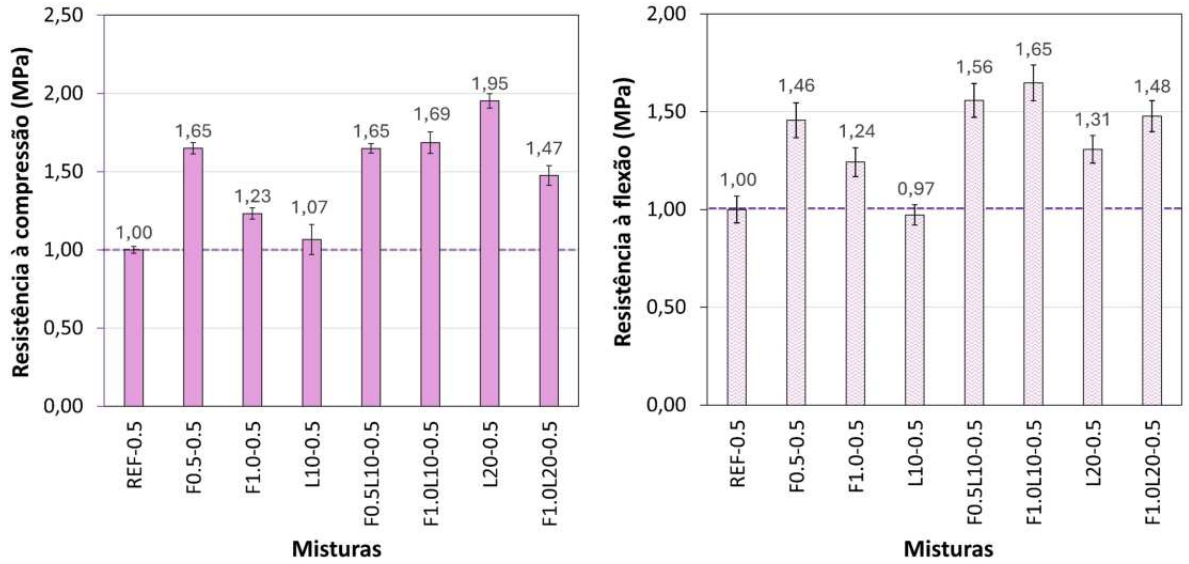
A Figura 8 apresenta os resultados relativos de resistência à compressão e flexão aos 28 dias. Verifica-se um incremento em ambas as propriedades mecânicas com a incorporação de FC e com a combinação das fibras e fíler calcário. Além disso, observa-se uma relação direta entre a resistência à compressão e resistência à flexão em todas as misturas.

Segundo Liu *et al.* [24], as FC podem prevenir a propagação de fissuras, contribuindo para o aumento da resistência mecânica. Adicionalmente, o éter de celulose (HPMC) utilizado pode atuar na aglutinação dos hidratos com os agregados, reforçando a matriz cimentícia. No caso

do uso de fíler, baixos teores (10%) não apresentaram impacto significativo nessas propriedades. Contudo, teores mais elevados (20%) resultaram em melhorias notáveis.

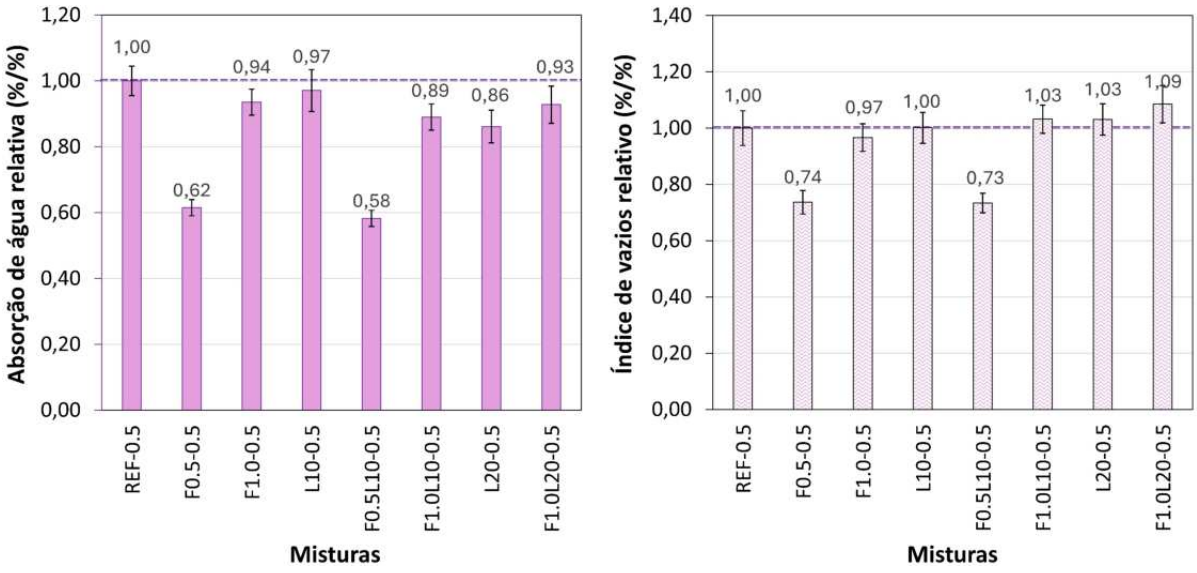
Os resultados relativos de absorção de água e índice de vazios estão apresentados na Figura 9. A incorporação de baixos teores de FC (0,5%) teve o maior impacto nessas propriedades. As misturas F0.5-0.5 e F0.5L10-0.5 apresentaram reduções de 38% e 42% na absorção de água e de 26% e 27% no índice de vazios, respectivamente. Esse comportamento pode ser atribuído à maior eficiência do éter de celulose em baixos teores de FC, promovendo uma dispersão uniforme e aglutinação eficaz na matriz cimentícia.

Figura 8 – Resistências à compressão e flexão relativas aos 28 dias.



Fonte: Os autores (2025).

Figura 9 – Absorção de água e índice de vazios relativo aos 28 dias.



Fonte: Os autores (2025).

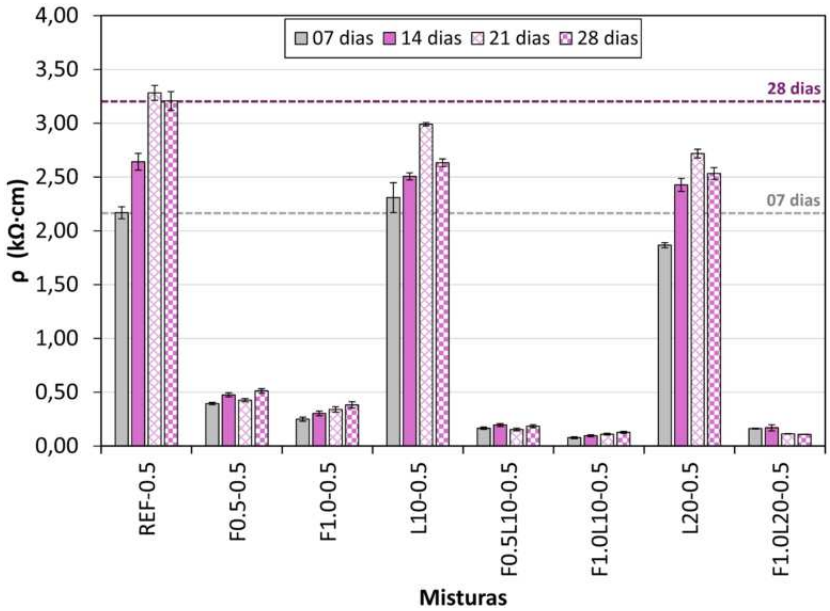
A Figura 10 apresenta os valores de resistividade elétrica volumétrica das argamassas aos 07, 14, 21 e 28 dias. Observa-se um aumento progressivo da resistividade com o avanço da idade, atribuído às reações de hidratação do cimento, que promovem a formação de cristais e a consequente densificação da matriz cimentícia.

Aos 28 dias, as misturas com substituição parcial de cimento por fíler calcário exibiram valores de resistividade semelhantes entre si. Em comparação com a mistura de referência (REF-0.5), as substituições de 10% e 20% resultaram em reduções de resistividade em 18% e 21%, respectivamente. Esse comportamento, deve-se pela redução de hidratos na matriz ocasionada pela menor quantidade de cimento presente na composição.

Ademais, verificou-se uma redução significativa da resistividade com o aumento do teor de FC. Esse comportamento é associado à alta condutividade elétrica das fibras juntamente com a utilização de partículas de grafeno, que podem ter influenciado na formação de redes condutoras. Além disso, o uso combinado de FC e fíler calcário potencializou a condutividade elétrica do material, também associado à redução do teor de aglomerante, reduzindo a formação de cristais na matriz cimentícia.

Os resultados obtidos indicam a possibilidade do desenvolvimento de materiais cimentícios altamente condutivos (<1,0 kΩ·cm) [25] utilizando baixos teores de FC e grafeno, viabilizando, assim, a produção de materiais multifuncionais sem um aumento expressivo nos custos.

Figura 10 – Resistividade elétrica volumétrica aos 07, 14, 21 e 28 dias.



Fonte: Os autores (2025).

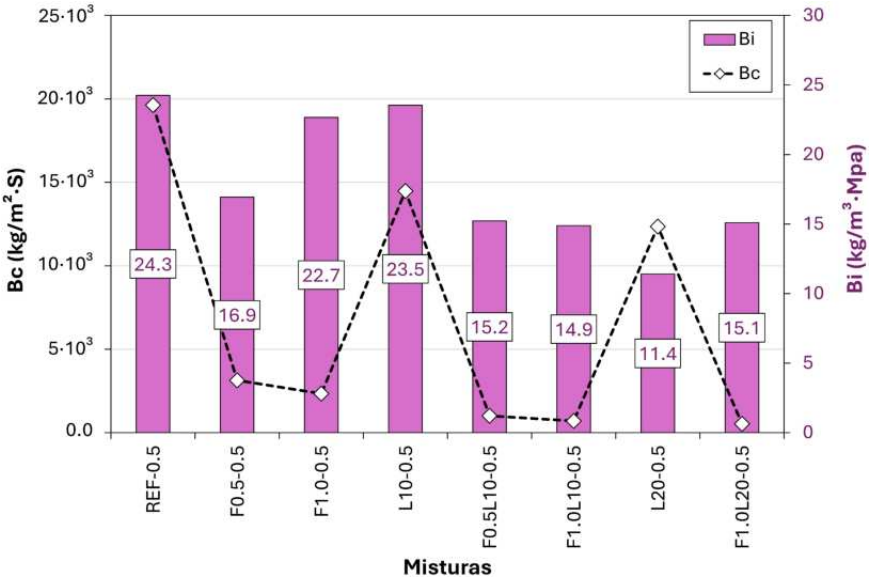
A Figura 11 apresenta os coeficientes de eficiência no uso dos ligantes. Observa-se que teores de 20% de fíler calcário aumentam a ecoeficiência das argamassas, pois reduzem o consumo de cimento necessário para alcançar 1 MPa de resistência. Quanto à eficiência na melhoria da condutividade elétrica, todas as misturas contendo FC apresentaram redução no coeficiente *Bc*, indicando um aumento na eficiência dos materiais condutivos. Assim, pode-se inferir que a substituição parcial do cimento Portland por fíler calcário melhora a ecoeficiência das

argamassas e, quando combinada com FC, também potencializa a eficiência na condução elétrica, uma propriedade essencial para o desenvolvimento de materiais multifuncionais.

A Fonte: Os autores (2025).

Tabela 4 resume o desempenho das argamassas em todas as propriedades avaliadas, evidenciando a manutenção das principais propriedades mecânicas mesmo com a incorporação de materiais condutivos na formulação. Entre as combinações analisadas, a mistura F1.0L10-0.5 (10% de substituição de cimento Portland por fíler calcário e com 1,0% de FC) apresentou o melhor desempenho mecânico e elétrico, destacando-se como a opção mais promissora para compósitos multifuncionais.

Figura 11 – Coeficientes de ecoeficiencia no consumo de ligantes para a resistência à compressão (*Bi*) e condutividade elétrica (*Bc*) aos 28 dias.



Fonte: Os autores (2025).

Tabela 4 – Desempenho das argamassas avaliadas em relação à mistura de referência nas características e propriedades avaliadas.

Mistura	Índice de consistência	Densidade aparente	Resistência à compressão	Resistência à flexão	Absorção	Índice de vazios	Resistividade elétrica
F0.5-0.5	- - -	=	++++++	+++++	----	---	--------
F1.0-0.5	- - -	=	++	++	-	=	---------
L10-0.5	=	=	+	=	=	=	--
F0.5L10-0.5	- - - -	++	++++++	++++++	----	---	---------
F1.0L10-0.5	- - - -	++	+++++++	++++++	-	=	----------
L20-0.5	=	+	+++++++++	+++	-	=	--
F1.0L20-0.5	- - - -	++	+++++	+++++	-	+	----------

(-): redução; (+): aumento; (=): manutenção

Fonte: Os autores (2025).

CONCLUSÕES

O presente estudo teve como objetivo desenvolver argamassas condutivas mais sustentáveis por meio da incorporação de FC e fíler calcário. As principais conclusões obtidas foram:

- A incorporação de FC e sua combinação com fíler calcário reduziu a trabalhabilidade das argamassas em até 37%. No entanto, a utilização apenas de fíler calcário não afetou essa propriedade. Observou-se que a densidade aparente foi impactada apenas nas misturas contendo FC e fíler ou em substituições elevadas de fíler (20%);
- O uso de FC, isoladamente ou em combinação com fíler calcário, aprimorou as propriedades mecânicas das argamassas. Esse comportamento pode ser atribuído à capacidade das FC de limitar a formação e propagação de fissuras, aliada aos efeitos do éter de celulose (HPMC), que auxiliou na dispersão e aglutinação das fibras na matriz cimentícia;
- A absorção de água e índice de vazios foram influenciados apenas em misturas com baixos teores de FC (0,5%), indicando que essas propriedades permanecem estáveis em compósitos com maiores proporções de FC e fíler calcário;
- As misturas contendo FC apresentaram reduções na resistividade elétrica de até 97%, comprovando a eficácia desse material na formulação de compósitos cimentícios condutivos;
- Os resultados dos coeficientes de ecoeficiência demonstraram que o uso de fíler calcário como substituto parcial do cimento é uma estratégia viável para aumentar a sustentabilidade dos materiais, reduzindo o impacto ambiental sem comprometer o desempenho mecânico ou elétrico;
- A combinação de 0,125% de grafeno e 1,0% de FC, associada à substituição de 10% do cimento Portland por fíler calcário, apresentou um desempenho satisfatório para uso como compósito multifuncional (resistividade elétrica <1,00 kΩ·cm), viabilizando sua aplicação;

Para avançar no desenvolvimento de compósitos cimentícios multifuncionais com a incorporação de fíler calcário, recomenda-se investigar a adição de outros tipos de materiais condutivos (nano ou micro materiais), com o objetivo de otimizar as propriedades mecânicas e elétricas, além de avaliar a viabilidade econômica e ambiental, bem como as possíveis aplicações práticas desse tipo de compósito, como aquecimento, proteção catódica, sensores, entre outros.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Laboratório de Materiais e Estruturas (LaME), Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Centro de Estudos em Engenharia Civil (CESEC), Universidade Federal do Paraná (UFPR), Loughborough University (UK), Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela estrutura física e financeira fornecida para desenvolvimento deste trabalho e a Cia. de Cimento Itambé pela doação do aglomerante.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] LI *et al*. Advances in multifunctional cementitious composites with conductive carbon nanomaterials for smart infrastructure. **Cement and Concrete Composites**, v. 128, 104454, 2022. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104454

[2] LU *et al*. A critical review of carbon materials engineered electrically conductive cement concrete and its potential applications. **International Journal of Smart and Nano Materials**, v. 14, n. 2, 2023. https://doi.org/10.1080/19475411.2023.2199703

[3] 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. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116892

[4] HAN *et al*. A review on carbon-based self-sensing cementitious composites. **Construction and Building Materials,** v. 265, 120764, 2020. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120764

[5] CAO, J.; CHUNG, D. D. L. Carbon fiber reinforced cement mortar improved by using acrylic dispersion as an admixture. **Cement and Concrete Research**, v. 31, pp. 1633-1637, 2001. https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00599-3

[6] DEHGHANPOUR, H. Electrical and microstructural characterization of carbon nanotube-carbon fiber added cementitious conductive surface coating. **Construction and Building Materials,** v. 406, 133449, 2023. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133449

[7] ARAÚJO, E. C. **Eficiência de argamassas de reparo com nano materiais: Propriedades mecânicas, durabilidade e microestrutura**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2022.

[8] ARAÚJO *et al*. Influência da densidade de empacotamento de partículas na resistividade elétrica de pastas compostas por sílica ativa. **Congresso Brasileiro de Patologia das Construções**, Fortaleza-CE, 2024. https://doi.org/10.5281/zenodo.12784188

[9] ARAÚJO, E. C.; MACIOSKI, G.; MEDEIROS, M. H. F. Concrete surface electrical resistivity: Effects of sample size, geometry, probe spacing and SCMs. **Construction and Building Materials**, v. 324, 126659, 2022. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126659

[10] AZARSA, P.; GUPTA, R. Electrical resistivity of concrete for durability evaluation: A review. **Advances in Materials Science and Engineering,** 8453095, 2017. https://doi.org/10.1155/2017/8453095

[11] LAYSSI *et al*. Electrical resistivity of concrete. **Concrete International**, v. 37, n. 5, pp. 41-46, 2015.

[12] ARAÚJO *et al.* Influência da incorporação de grafeno e sílica ativa nas propriedades físicas e de durabilidade de argamassas cimentícias. **4° Seminário Baiano de Durabilidade e Desempenho das Construções (BADUCON)**, Ilhéus-BA, 2022.

[13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR **16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

[14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NM 52**: Agregado miúdp – Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

[15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

[16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.

[17] ARAÚJO *et al*. Estabilidade dimensional de argamassas de reparo com nanomateriais. **Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ENTAC)**, Maceió-AL, 2024. https://doi.org/10.46421/entac.v20i1.6064

[18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

[19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

[20] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

[21] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

[22] DAMINELI *et al.* Measuring the eco-efficiency of cement use. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 8, pp. 555-562, 2010. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.07.009

[23] CAMPOS *et al*. Determinação do teor ótimo de substituição do cimento Portland por pó de pedra usando métodos de empacotamento de partículas e análise do excesso de água na consistência de pastas. **IBRACON Structures and Materials Journal,** v. 12, n. 2, pp. 221-232, 2019. https://doi.org/10.1590/S1983-41952019000200002

[24] LIU *et al*. Properties and road engineering application of carbon fiber modified-electrically conductive concrete. **Structural Concrete**, v. 22, n. 1, pp. 410-421, 2021. https://doi.org/10.1002/suco.201900510

[25] FULHAM-LEBRASSEUR, R.; SORELLI, L.; CONCIATORI, D. Development of electrically conductive concrete and mortars with hybrid conductive inclusions. **Construction and Building Materials,** v. 237, 117470, 2020. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117470