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

ANÁLISE DE PROPRIEDADES ELÉTRICAS DE ARGAMASSA ARMADA COM MICROFIBRAS DE CARBONO

Analysis of electrical properties of mortar reinforced with carbon microfibers

JOÃO BATISTA LAMARI PALMA E SILVA[1], CAMILA TIEMI OZAKI E SILVA [2], STEPHANIE CUCOLO MARÇULA [3], ROSA CRISTINA CECCHE LINTZ[4], LUÍSA ANDRÉIA GACHET[5]

[1]Doutor, Pesquisador Colaborador, Universidade Estadual de Campinas, jblamari@unicamp.br
[2] Mestra, Doutoranda, Universidade Estadual de Campinas, c210427@dac.unicamp.br
[3] Mestra, Doutoranda, Universidade Estadual de Campinas, s237360@dac.unicamp.br
[4] Doutora, Professora Titular, Universidade Estadual de Campinas, rosalint@unicamp.br
[5] Doutora, Professora Titular, Universidade Estadual de Campinas, gachet@unicamp.br

RESUMO

Argamassas multifuncionais têm sido desenvolvidas para aplicações em sistemas de autossensoriamento, blindagem eletromagnética, proteção catódica, entre outras. Nesta pesquisa foi produzida argamassa baseada nos limites da norma NBR 11173 (argamassas armadas), com microfibra de carbono. Foram analisadas propriedades de resistências mecânicas e módulo de elasticidade, bem como elétricas, por meio da impedância e ângulo de fase. A partir dos resultados obtidos, constatou-se um aumento na resistência à tração na flexão, bem como na condutividade elétrica. Com isso, pode-se concluir que o traço estudado tem potencial para o desenvolvimento de mais pesquisas que visem a aplicação de argamassas com propriedades elétricas.

Palavras-chave: Argamassa. Impedância elétrica. Condutividade. Carbono.

ABSTRACT

Multifunctional mortars have been developed for applications in self-sensing systems, electromagnetic shielding, cathodic protection, and other areas. In this research, mortar was produced based on the limits of standard NBR 11173 (reinforced mortars), with carbon microfiber. Mechanical strengths and modulus of elasticity properties were analyzed, as well as electrical properties, through impedance and phase angle. From the results obtained, an increase in tensile strength was observed, as well as in electrical conductivity. Therefore, it can be concluded that the studied trait has potential for the development of further research aimed at the application of mortars with electrical properties.

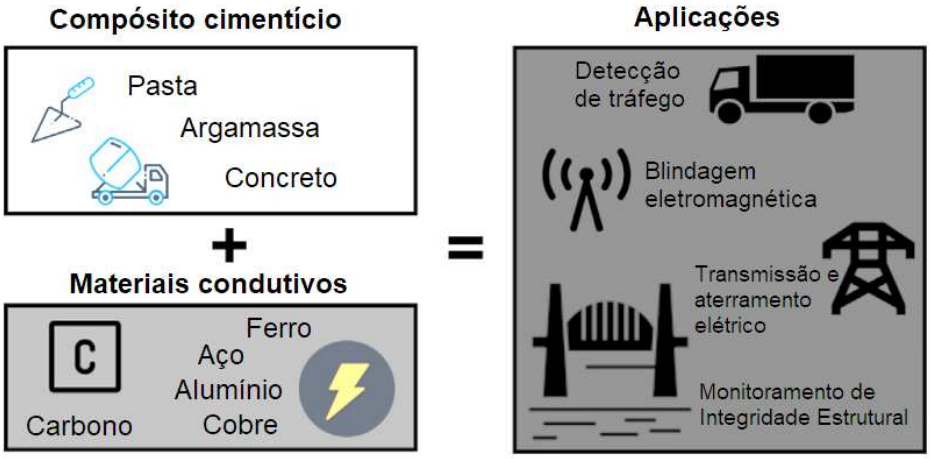
Key-words: Mortar. Electrical impedance. Conductivity. Carbon.

Como citar:
SILVA, J. B. L. P.; SILVA, C. T. O.; MARÇULA, S. C.; LINTZ, R. C. C.; GACHET, L. Análise de propriedades elétricas de argamassa armada com microfibras de carbono. In: XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 2025, Porto Alegre. **Anais**... Porto Alegre: ANTAC, 2025.

INTRODUÇÃO

Os compósitos cimentícios com propriedades elétricas (CCPEs) são considerados multifuncionais, pois os estudos de suas aplicações evolvem usos como por exemplo, aterramento elétrico, proteção catódica, derretimento de gelo e neve, blindagem contra interferência eletromagnética, monitoramento de tráfego de veículos, monitoramento de integridade estrutural (MIE), entre outras funcionalidades, o que pode torna-los mais eficientes, ambientalmente amigáveis e economicamente viáveis quando comparados aos métodos tradicionais [1]. Contudo, um compósito cimentícios convencional, seja ele na forma de concreto, argamassa ou pasta, é considerado eletricamente isolante, por ser um mau condutor de eletricidade. Com isso, para que sua condutividade seja modificada, é necessária a incorporação de materiais eletricamente condutores (Figura 1) em sua composição [2].

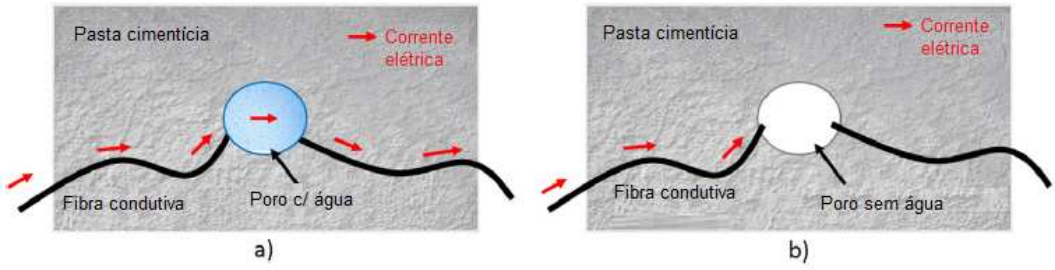
Figura 1 – Compósitos cimentícios com propriedades elétricas (CCPEs) e exemplos de suas aplicações.



Fonte: Adaptado de [3,4].

Entretanto, não é apenas a presença de materiais eletricamente condutores que modificam a condutividade dos compósitos cimentícios, mas também a presença ou não de água encapsulada nos poros. Essa água pode servir como um elemento de conexão entre as partículas condutoras (Figura 2) que eventualmente não mantenham contato direto, pois permite que os íons hidratados se movam livremente na água, como portadores de corrente elétrica [5,6].

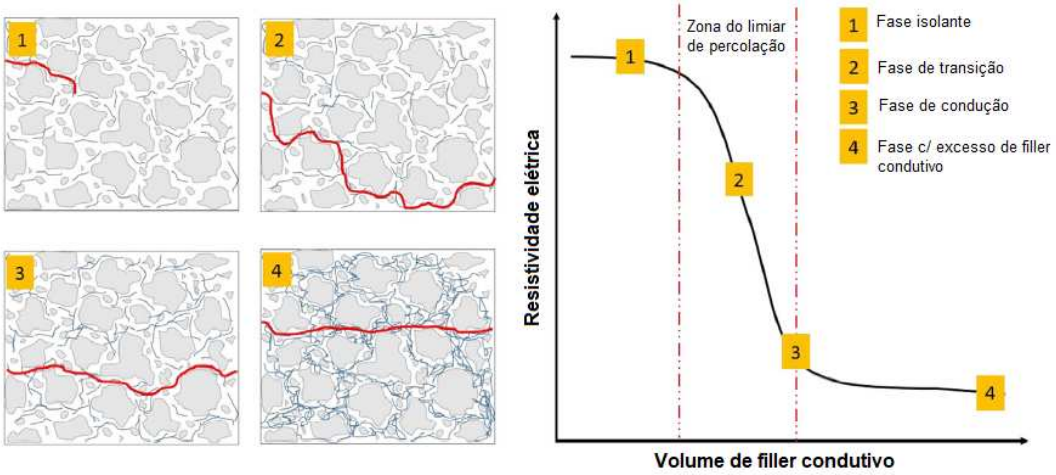
Figura 2 – Esquema ilustrativo de pasta de cimento com caminho condutivo (a); e sem caminho condutivo (b) em função do encapsulamento de água nos poros do compósito.



Fonte: Adaptado de [1].

O mecanismo de condutividade elétrica vai além da presença da água e de materiais condutores, pois abrange questões como o efeito do limiar de percolação e do tunelamento quântico, os quais estão presentes na literatura para explicar tal mecanismo de condutividade elétrica nos compósitos cimentícios [7]. O limiar de percolação da eletricidade pode ser definido como uma zona de transição abrupta (zona 2 da Figura 3) entre a fase isolante e a de aumento significativo da condutividade elétrica. Nesse caso há a redução da resistividade elétrica, mediante o aumento da incorporação do material eletricamente condutor [8].

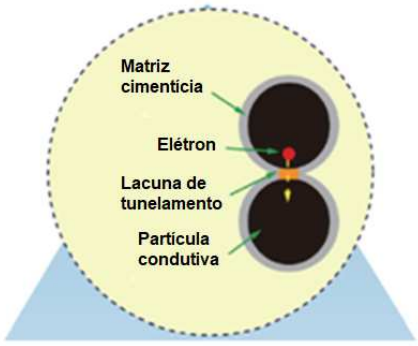
Figura 3 – Correlações gráficas de caminhos condutivos (vermelho) e variação da adição de material condutivo no compósito cimentício.



Fonte: Adaptado de[1].

Devido a aleatoriedade da distribuição dos materiais eletricamente condutivos em um compósito cimentício, muitas vezes tais materiais estão próximos entre si, mas não conectados. Se essa proximidade for extremamente pequena, pode vir a ocorrer o efeito do tunelamento quântico [6]. Esse efeito permite que um elétron salte de uma partícula condutora até outra, mesmo que não exista um contato direto entre tais partículas (Figura 4). Contudo, tal efeito gera uma resistividade elétrica maior do que se fosse um contato direto entre partículas [9,10].

Figura 4 – Esquema ilustrativo de tunelamento quântico entre duas partículas condutoras sem contato direto.



Fonte: Adaptado de [11].

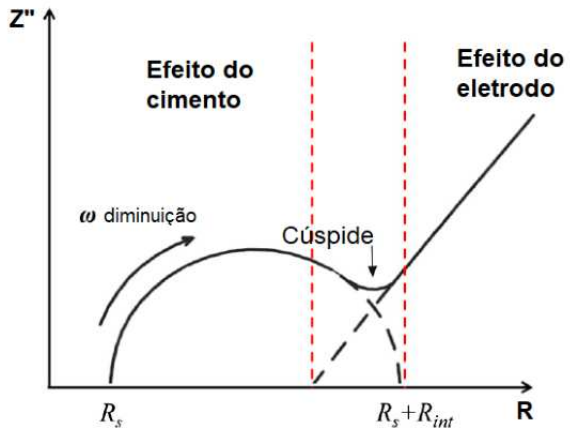
Outro fator extremamente relevante no comportamento elétrico dos compósitos cimentícios é o fato de que estes não têm comportamento puramente ôhmico. Tais compósitos têm um comportamento similar ao de materiais dielétricos [12,13]. Nesse sentido, a avaliação de suas propriedades elétrica pode ser influenciada pelo tipo de corrente elétrica utilizada, ou seja, corrente contínua (CC) ou corrente alternada (CA).

O uso do método de alimentação por CC em sistema de medição de propriedades elétricas de compósitos cimentícios é considerada mais simples e mais econômica financeiramente [6] que por CA. Porém, o método por CC tem a desvantagem da ocorrência do efeito de polarização que afeta negativamente a estabilidade das leituras iniciais de resistência. Esse efeito ocorre em razão das propriedades dielétricas de alguns materiais, as quais estão relacionadas a resistência e capacitância elétrica [14-16]. A movimentação de íons livres presentes na matriz cimentícia, mediante uma excitação elétrica provoca o efeito da polarização. Tal efeito produz um campo elétrico na direção contrária do fluxo da corrente, levando a um aumento da resistividade por um determinado tempo [17].

No caso do uso de CA para análise de propriedades elétrica de compósitos cimentícios, a condutividade elétrica pode ser influenciada pela capacitância elétrica do compósito [18]. Com a alimentação por CA, o resultado obtido na medição é a impedância elétrica e não necessariamente a resistência elétrica. Isso se dá pela possibilidade da existência de indutores e/ou capacitores, os quais provocam a reatância [19].

Assim, a análise de parâmetros elétricos dos compósitos cimentícios pode colaborar com o estudo de propriedades como porosidade, hidratação, corrosão, permeabilidade [20] e condutividade elétrica. Uma das formas de se analisar o comportamento elétrico de materiais sob diferentes frequências (ω) de CA é por meio da construção do digrama de *Nyquist* (Figura 5). No referido diagrama para um compósito cimentício tem-se a resistência elétrica do sólido e líquido (R_s) e a resistência elétrica de interface (R_{int}), sendo essa em razão do eletrodo.

Figura 5 – Diagrama de *Nyquist* para pasta cimentícia.



Fonte: Adaptado de [21].

Com isso, o estudo de propriedades elétricas em compósitos cimentícios, permite desenvolver novas aplicações de usos multifuncionais, bem como correlacionar tais propriedades elétricas a parâmetros físicos e mecânicos, visando análises indiretas de suas características. Nesse

sentido, essa pesquisa teve por objetivo produzir e analisar as propriedades elétricas e mecânicas de argamassa cimentícia com incorporação de microfibra de carbono, dada a relevância do tema.

PROGRAMA EXPERIMENTAL

MATERIAIS

Como aglomerante, foi utilizado o cimento Portland CPV, de alta resistência inicial (ARI), produzido pela empresa Holcim, com massa específica determinada em 3,06 kg/dm³, conforme norma técnica ABNT NBR 16605 [22]. A escolha por esse tipo de cimento se deu pela alta pureza, bem como pelo fato de Carísio *et al*. [23] terem utilizado esse tipo de cimento, para produção de compósito cimentício com propriedades elétricas.

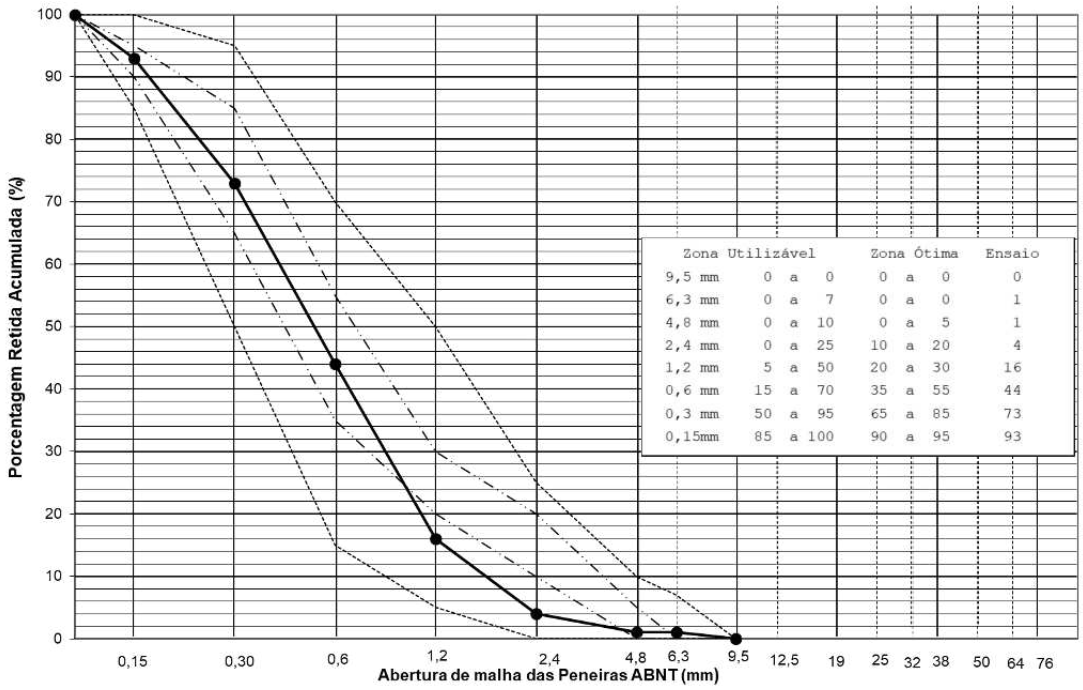
Como agregado miúdo, foi utilizada areia quartzosa da região de Limeira-SP, à qual passou por processo de redução da umidade mediante secagem em estufa por 24 horas à 105±5 ºC. A referida areia foi caracterizada conforme parâmetros e resultados da Tabela 1 e Figura 6.

Tabela 1 – Resultados da caracterização da areia.

Parâmetro	Resultado	Norma Técnica
Densidade	2,57 g/cm³	ABNT NBR NM 16916 [24]
Massa unitária	1,52 g/cm³	ABNT NBR 16972 [25]
Diâmetro máximo	2,40 mm	ABNT NBR 17054 [26]
Módulo de finura	2,31	

Fonte: Os autores (2025).

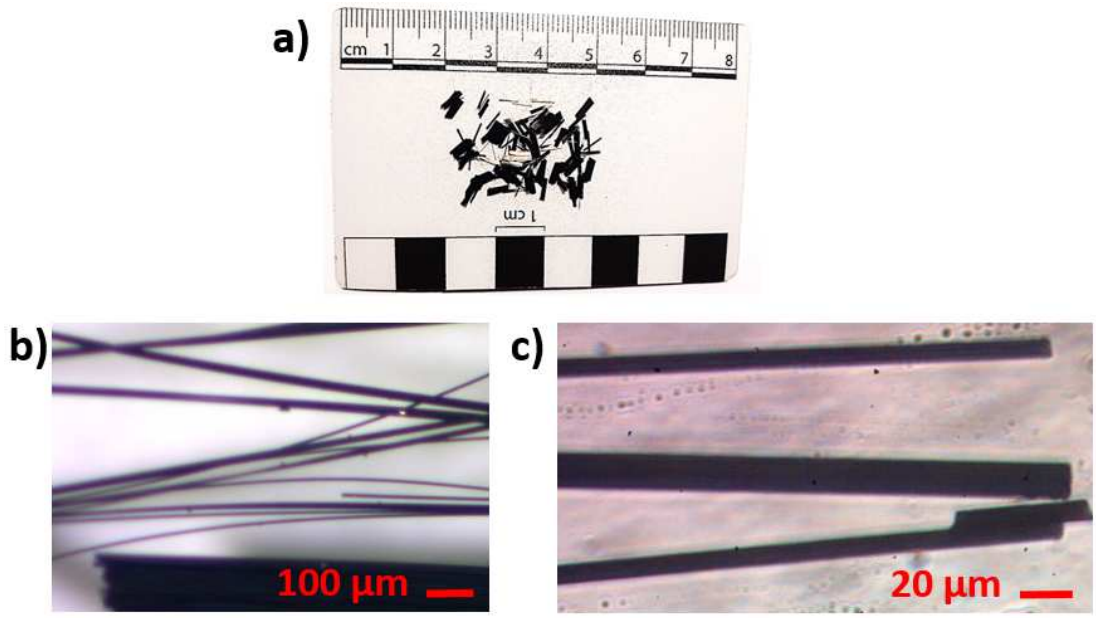
Figura 6 – Curva granulométrica da areia.



Fonte: Os autores (2025).

A microfibra de carbono (Figura 7) utilizada possui comprimento de ≈4 mm, tipo 12k (filamentos), com teor de pureza ≥ 94%, comercializada pela empresa TEXIGLASS®. Sua espessura é de ≈6-7 µm, conforme imagens obtidas por meio do uso do microscópio invertido modelo Axiovert 40 CFL (marca Zeiss), com câmera modelo Axiocam ERc 52, do mesmo fabricante.

Figura 7 – Microfibra de carbono cortada (a); Microfibra de carbono em ampliação (b e c).



Fonte: Os autores (2025).

A água utilizada para produção da argamassa foi proveniente da rede pública de abastecimento do município de Limeira-SP, à qual atende aos requisitos de potabilidade [27]. Além da água da rede pública, foi utilizado aditivo redutor de água, do fabricante MC-Bauchemie Brasil, tipo TechniFlow 520, visando a melhora da trabalhabilidade da argamassa, devido à incorporação das microfibras em questão.

MÉTODOS

Devido a adição da microfibra de carbono, o preparo da argamassa seguiu os procedimentos da ABNT NBR 16541 [28], com as seguintes alterações, para garantir uma melhor homogeneidade da mistura:

1. Mistura anidra do cimento e areia;
2. Adição de 75% massa de água com aditivo, seguido pela mistura mecânica por 1 minuto e 30 segundos conforme referida norma e repouso por tempo igual;
3. Adição de 25% de água com aditivo, seguido pela adição da fibra de carbono de forma gradual, durante a mistura mecânica por mais 2 minutos.

O traço escolhido foi baseado nos limites máximos estabelecidos pela ABNT NBR 11173 [29] para argamassas armadas, ou seja, 1:2:0,45 (cimento : areia : relação água/cimento). A adição da microfibra nas proporções de 0,2, 0,4, 0,6, 0,8, 1,0 e 1,2% (Tabela 2) em relação a massa de cimento, foram baseadas nos valores utilizados por Baeza *et al*. [30] e Wang e Aslani [2],

que pesquisaram propriedades elétricas em compósitos cimentícios com adição de fibra de carbono. O uso do aditivo redutor de água, baseou-se no mesmo critério utilizado pelos pesquisadores Donnini, Bellezze e Corinaldesi [31], os quais empregaram o mesmo percentual que o de fibras de carbono.

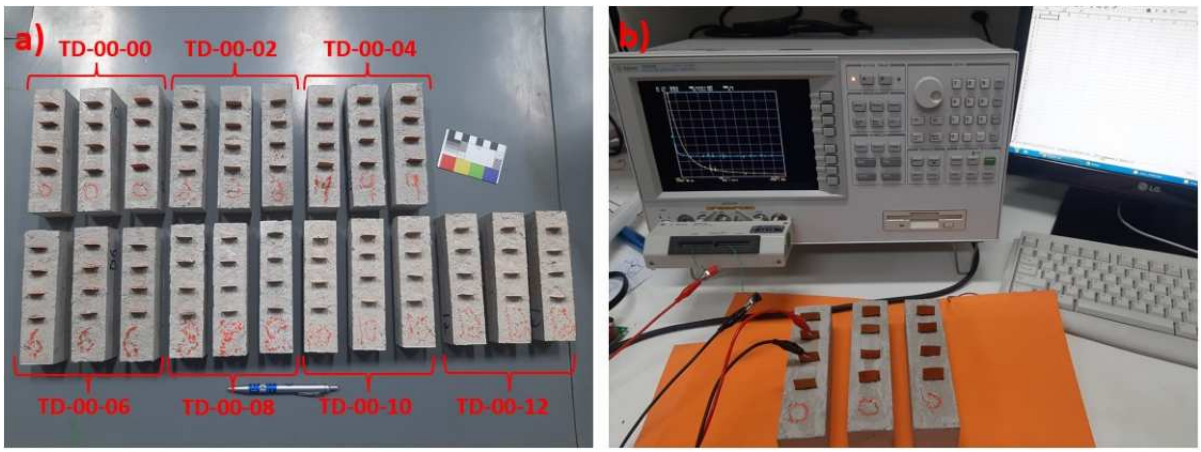
Tabela 2 – Traços em relação à massa de cimento Portland com adição da microfibra de carbono.

Traço	Cimento	Areia	Fibra de Carbono	Água	Aditivo
TD-00-00	1	2	-	0,45	-
TD-00-02	1	2	0,002	0,45	0,002
TD-00-04	1	2	0,004	0,45	0,004
TD-00-06	1	2	0,006	0,45	0,006
TD-00-08	1	2	0,008	0,45	0,008
TD-00-10	1	2	0,010	0,45	0,010
TD-00-12	1	2	0,012	0,45	0,012

Fonte: Os autores (2025).

Foram moldados corpos de prova prismáticos, nas dimensões de 40 x 40 x 160 mm³, dimensões essas já utilizadas para medições de grandezas elétricas em compósitos cimentícios, conforme reportado na literatura [31,32]. Nos corpos de provas utilizados para análises de propriedades elétricas, foram instalados quatro eletrodos em chapas de cobre, com espessura de aproximadamente 0,1 mm, conforme adotado por Carísio *et al*. [23], com largura de 20,0 mm, embutidos em 40 mm, bem como distanciados entre si em 3,0 cm conforme adotado por Buasiri *et al*. [33] e Qi *et al*. [34], conforme Figura 9a.

Figura 9 – Corpo de prova com eletrodos (a) e uso do analisador de impedância elétrica (b).



Fonte: Os autores (2025).

A cura e a desmoldagem dos corpos de prova seguiram os parâmetros estabelecidos na ABNT NBR 13279 [35], mediante cura nas condições de temperatura de 23 ± 2 ºC, umidade relativa do ar de 60 ± 5% em câmara úmida, bem como desmoldagem em 48 ± 24 horas.

A determinação de resistência à compressão e à tração na flexão seguiu os procedimentos da norma ABNT NBR 13279 [35]. A determinação da densidade aparente da argamassa ocorreu conforme norma ABNT NBR 13280 [36]. Quanto a determinação do módulo de elasticidade,

essa se deu por meio de onda ultrassônica, conforme procedimentos estabelecidos na norma ABNT NBR 15630 [37], mediante uso do equipamento modelo USLab da marca Agricef.

Para determinação das propriedades elétricas, os corpos de prova foram ensaiados com idade ≥28 dias, bem como após secagem em estufa (temperatura de 105±5 ºC) por 24 horas, procedimento esse de secagem adotado por Nalon *et al*. [38]. Foi mensurada a impedância elétrica (Z) e ângulo de fase (θ), por meio do uso de um analisador de impedância modelo 4294A da marca Agilent, conforme Figura 9b. As mensurações se deram em frequências de 40 Hz (mínimo do equipamento) a 1 MHz [18,39], numa amplitude de tensão de 1,00 volt, com registro de 800 leituras no intervalo de frequências mencionado.

A partir das medições de impedância elétrica (|Z|) e ângulo de fase (θ), foram determinados os valores de impedância imaginária (Z") e resistência elétrica (R), respectivamente por meio das Equações 1 [40] e 2 [41,42].

$$Z'' = |\mathrm{Z}| \sin(\theta) \tag{1}$$

$$R = |\mathrm{Z}| \cos(\theta) \tag{2}$$

Com isso, por meio da segunda Lei de Ohm, foi determinada à resistividade elétrica (ρ) do compósito a partir da resistência elétrica (R), da área (A) da seção transversal e da distância entre eletrodos (l), conforme Equação 3 [43-45].

$$\rho = R\frac{A}{l} \tag{3}$$

Por fim, a condutividade elétrica (σ_e) foi obtida por meio da Equação 4 [46].

$$\sigma_e = \frac{1}{\rho} \tag{4}$$

Tanto os resultados mecânicos quanto elétricos, foram objeto de análise de significância estatística por meio da análise de variância do tipo *One Way ANOVA* e *Tukey Test*.

RESULTADOS

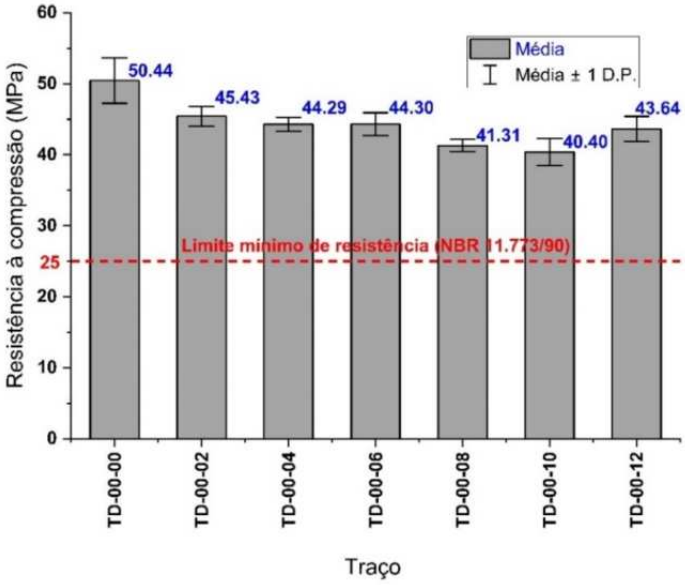
PROPRIEDADES MECÂNICAS

Em relação aos resultados mecânicos, a resistência à compressão (Figura 10) apresentou redução com o acréscimo da microfibra de carbono. Essa redução já foi reportada na literatura [47] e pode estar relacionada com a dificuldade de compactação na matriz cimentícia em função da adição da fibra [31].

Foi obtido P-valor da análise de variância constante da Tabela 3, a partir dos resultados individuais de resistência à compressão. Esse valor consolidou a hipótese alternativa de que há diferença entre os grupos para um nível crítico de significância de 0,05.

Na análise de *Tukey Test* (Figura 11) dos resultados de resistência à compressão, todos os traços apresentaram diferença estatisticamente significativa na perda de resistência em relação ao traço de referência (TD-00-00).

Figura 10 – Resultados de resistência à compressão.



Fonte: Os autores (2025).

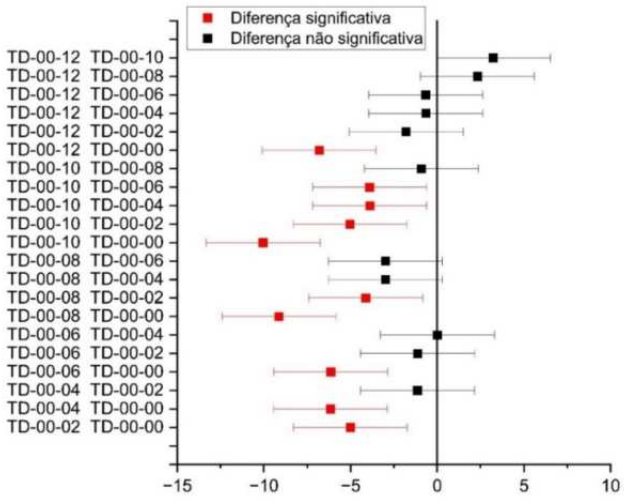
Tabela 3 – Análise de variância (ANOVA) dos resultados de resistência à compressão.

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F*	P-valor
1	6	381,39232	63,56539	19,16795	<0,0001
2	35	116,06813	3,31623		

*Razão entre as médias quadradas; 1) Entre grupos; 2) Dentro dos grupos (Residual)

Fonte: Os autores (2025).

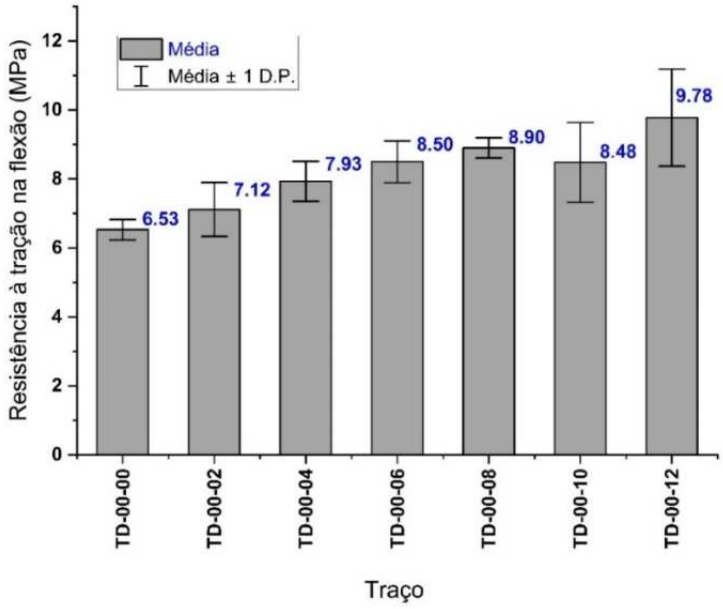
Figura 11 – Teste de comparações múltiplas (*Tukey Test*) de resistência à compressão.



Fonte: Os autores (2025).

Em relação aos resultados de resistência à tração na flexão (Figura 12), ocorreu um aumento de resistência. O referido aumento é frequentemente reportado na literatura, no que se refere ao uso de fibras de carbono em compósitos cimentícios [31,39,48,49].

Figura 12 – Resultados de resistência à tração na flexão.



Fonte: Os autores (2025).

Foi obtido P-valor da análise de variância constante da Tabela 4 a partir dos resultados individuais de resistência à tração na flexão, o que consolidou a hipótese alternativa de que há diferença entre os grupos para um nível crítico de significância de 0,05.

Tabela 4 – Análise de variância (ANOVA) dos resultados de resistência à tração na flexão.

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F*	P-valor
1	6	21,57486	3,59581	5,2273	0,00513
2	14	9,63047	0,68789		

*Razão entre as médias quadradas; 1) Entre grupos; 2) Dentro dos grupos (Residual)

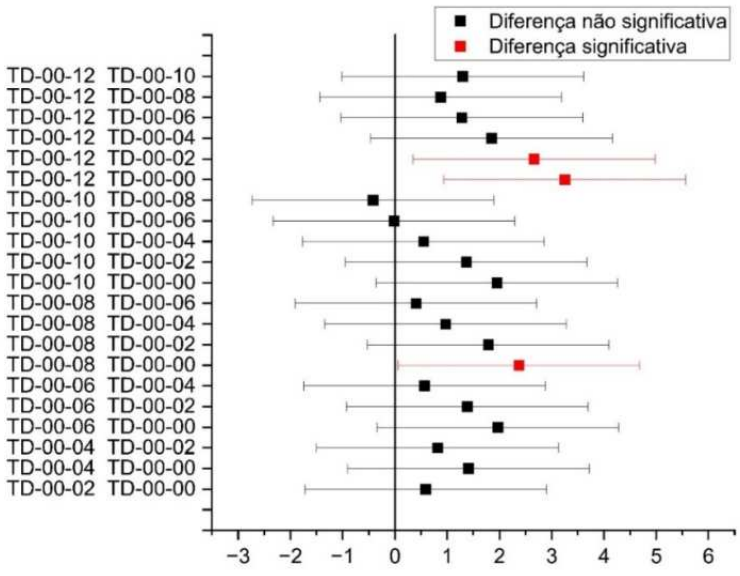
Fonte: Os autores (2025).

Na análise de *Tukey Test* (Figura 13) os traços TD-00-08 e TD-00-12 apresentaram diferença estatisticamente significativa no ganho de resistência à tração na flexão, em relação ao traço de referência (TD-00-00).

No caso do módulo de elasticidade e a densidade (Figura 14), além da redução de ambos, foi observada uma correlação de Pearson de 0,82 entre os resultados de ambas as grandezas. Tal situação pode estar associada à diferença de densidade entre a fibra de carbono e de eventuais vazios provocados pela adição dessa.

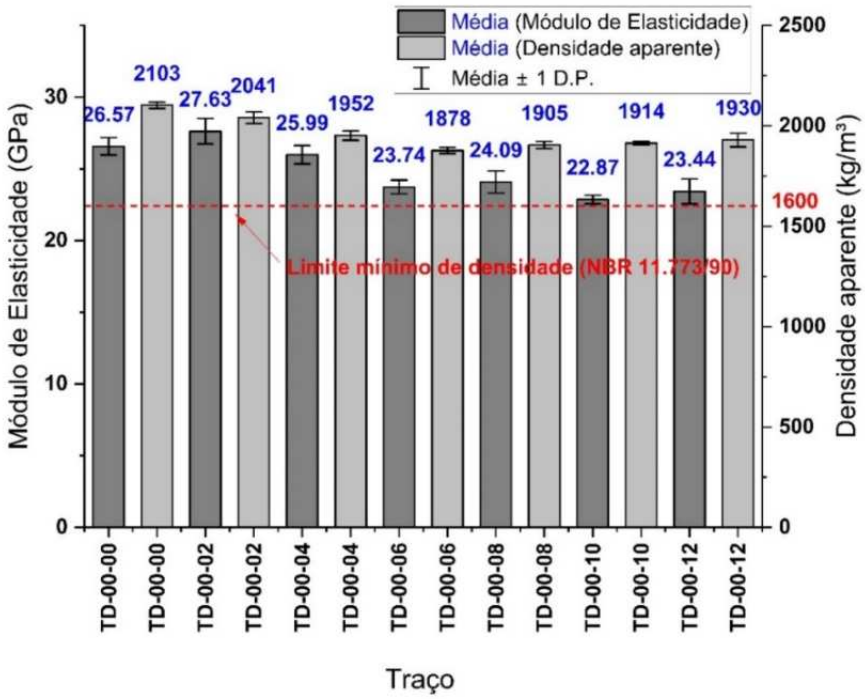
Foi obtido P-valor da análise de variância constante da Tabela 5, a partir dos resultados individuais de módulo de elasticidade. Esse valor consolidou a hipótese alternativa de que há diferença entre os grupos para um nível crítico de significância de 0,05.

Figura 13 – Teste de comparações múltiplas (*Tukey Test*) de resistência à tração na flexão.



Fonte: Os autores (2025).

Figura 14 – Resultados do módulo de elasticidade dinâmico e densidade de massa aparente



Fonte: Os autores (2025).

Tabela 5 – Análise de variância (ANOVA) dos resultados de módulo de elasticidade dinâmico.

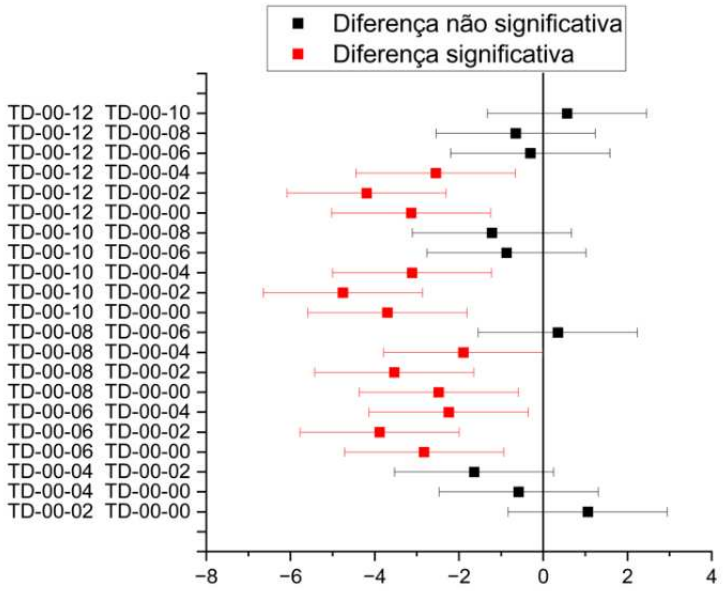
Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F*	P-valor
1	6	59,01057	9,83509	21,42237	<0,0001
2	14	6,42745	0,4591		

*Razão entre as médias quadradas; 1) Entre grupos; 2) Dentro dos grupos (Residual)

Fonte: Os autores (2025).

Em relação a análise de *Tukey Test* (Figura 15) os traços TD-00-02 e TD-00-04 não apresentaram diferença estatisticamente significativa na alteração do módulo de elasticidade dinâmico, em relação ao traço de referência (TD-00-00).

Figura 15 – Teste de comparações múltiplas (*Tukey Test*) de módulo de elasticidade.

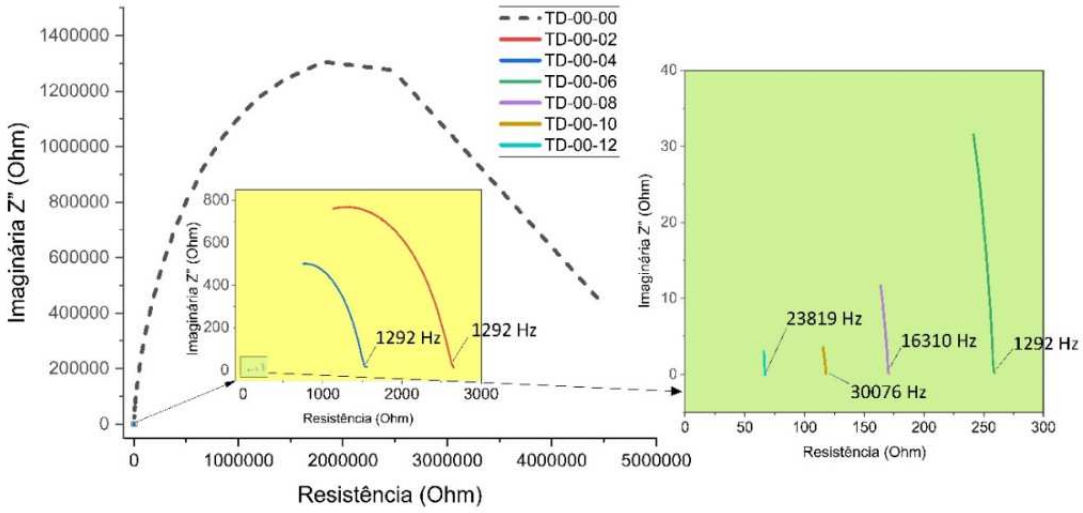


Fonte: Os autores (2025).

PROPRIEDADES ELÉTRICAS

Pelo diagrama de *Nyquist* (Figura 16) foi possível observar que a partir do traço TD-06-00 houve um comportamento distinto dos demais traços com menos microfibra de carbono. A sua verticalidade, bem como dos traços TD-00-08 a TD-00-12, mostram pouca variação da resistência elétrica com o aumento da frequência. Isso pode ser um indicativo de que houve menor influência da reatância do compósito cimentício, predominando assim o comportamento da microfibra.

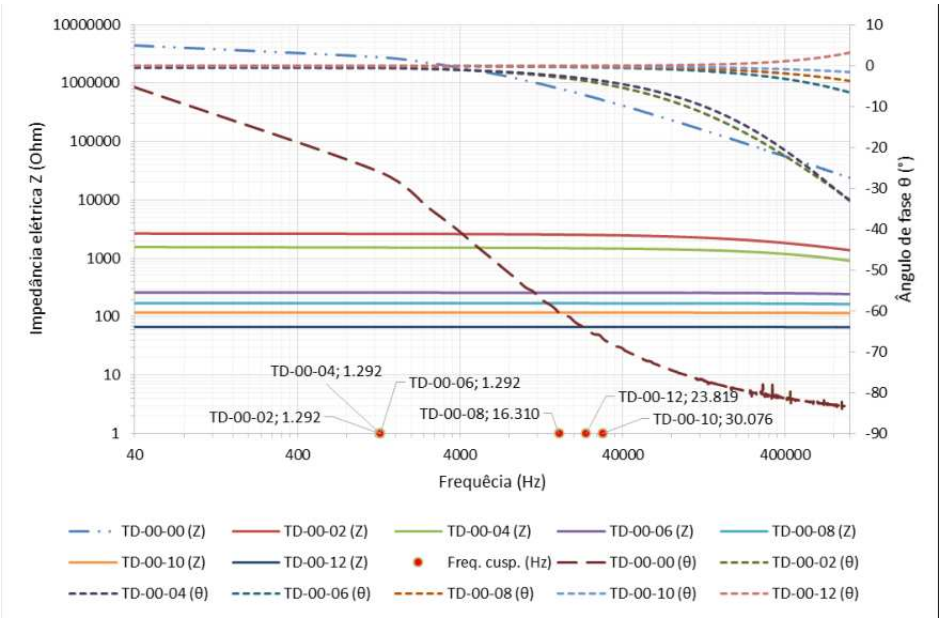
Figura 16 – Análise de resistência elétrica (R) e impedância imaginária (Z") por meio do diagrama de *Nyquist* com frequência no ponto de cúspide.



Fonte: Os autores (2025).

Ao analisar o diagrama de *Bode* (Figura 17) é possível observar que a partir do traço TD-06-00 houve pouca variação da impedância (Z) em função do aumento de frequência, diferentemente do que se observou em relação ao ângulo de fase (θ). Ainda em relação a impedância (Z), foi possível observar redução significativa a partir do traço TD-00-02, em relação ao traço de referência (TD-00-00), independentemente da frequência analisada.

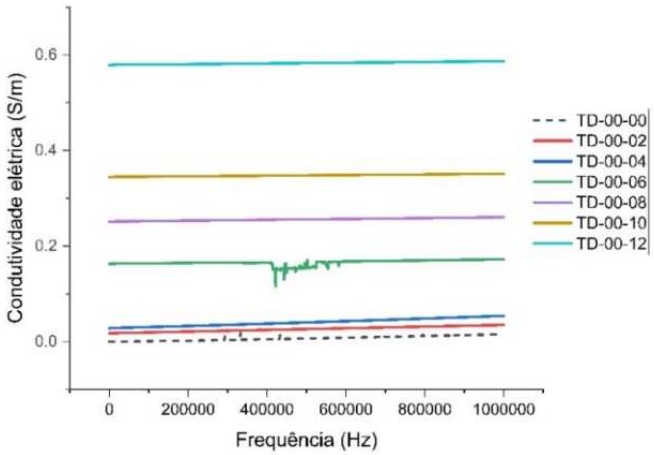
Figura 17 – Análise da impedância (Z) e do ângulo de fase (θ) por meio do diagrama de *Bode* com frequência no ponto de cúspide.



Fonte: Os autores (2025).

Na análise da condutividade elétrica (Figura 18), apesar de não ser possível observar uma mudança significativa com o aumento da frequência, o traço TD-00-00 teve sua condutividade aumentada em aproximadamente 1470 vezes entre 40 Hz a 1 MHz. Isso mostra a influência da frequência, a qual provoca alteração nos resultados de reatância capacitiva do material. Já nos demais traços, os aumentos de condutividade entre 40 Hz a 1 MHz foram de apenas uma a duas vezes, o que mostra a baixa influência da matriz cimentícia sobre a condutividade da microfibra de carbono.

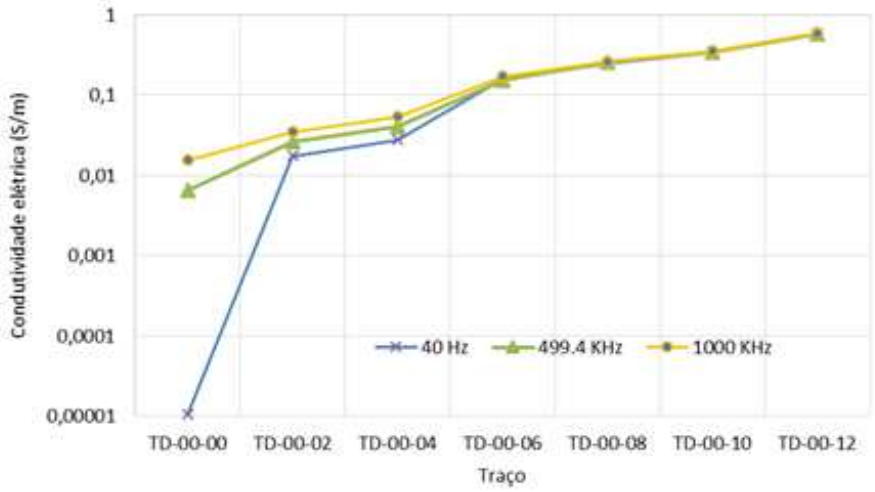
Figura 18 – Resultados de condutividade elétrica (de 40 Hz a 1 MHz)



Fonte: Autores(as)

Foi realizada uma análise de condutividade segmentada na frequência mínima (40 Hz), média (499,4 kHz) e máxima (1 MHz) do intervalo de mensuração. Os resultados da referida análise (Figura 19) mostram uma possível ocorrência do limiar de percolação entre os traços TD-00-02 e TD-00-06, bem como pouca influência da frequência na condutividade a partir do traço TD-00-06.

Figura 19 – Resultados de condutividade elétrica por traços, na frequência mínima, média e máxima das medições.



Fonte: Os autores (2025).

Foi obtido o P-valor da análise de variância para os casos constantes da Tabela 6, a partir dos resultados individuais que subsidiaram os valores médios de condutividade elétrica da Figura 19, consolidando a hipótese alternativa de que há diferença entre os grupos para um nível crítico de significância de 0,05.

Tabela 6 – Análise de variância (ANOVA) da condutividade elétrica segmentada por frequências.

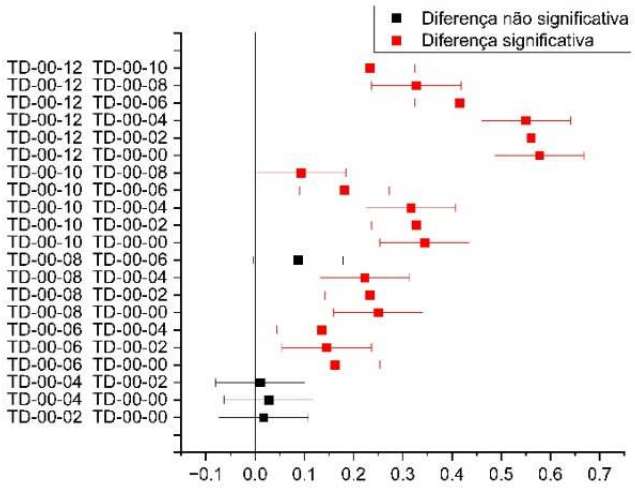
Freq.	Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F*	P-valor
40 Hz	1	6	2,43792	0,40632	102,2688	<0,0001
	2	56	0,22249	0,00397		
499,4 kHz	1	6	2,40294	0,40049	93,79661	<0,0001
	2	56	0,23911	0,00427		
1 MHz	1	6	2,33022	0,38837	99,34876	<0,0001
	2	56	0,21891	0,00391		

*Razão entre as médias quadradas; 1) Entre grupos; 2) Dentro dos grupos (Residual)

Fonte: Os autores (2025).

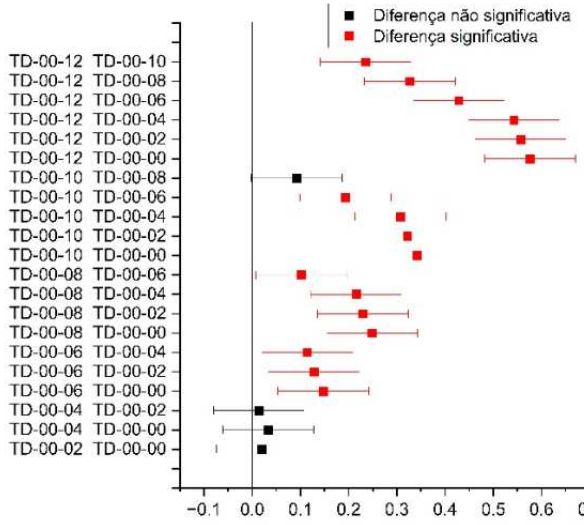
Por fim, por meio da análise de *Tukey Test* (Figuras 20 a 22) da condutividade elétrica nas frequências de 40 Hz, 499,4 kHz e 1 MHz todos os traços a partir da adição de 0,6% de fibra (TD-00-06) apresentaram diferença estatisticamente significativa no aumento da condutividade elétrica em relação à referência (TD-00-00).

Figura 20 – Teste de comparações múltiplas (Tukey Test) de condutividade elétrica (40 Hz).



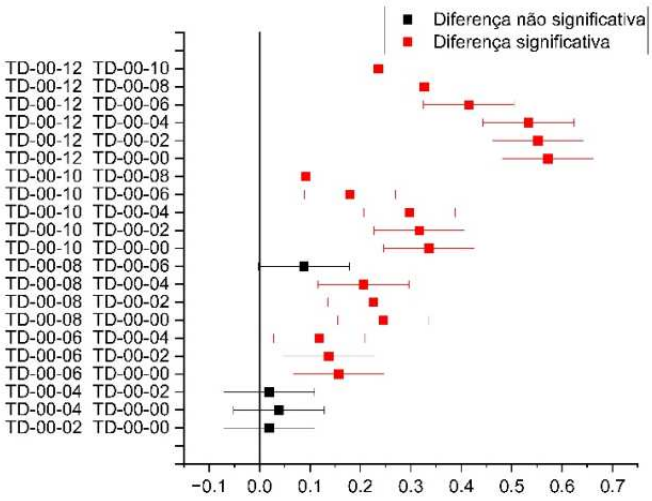
Fonte: Os autores (2025).

Figura 21 – Teste de comparações múltiplas (*Tukey Test*) de condutividade elétrica (499,4 kHz).



Fonte: Os autores (2025).

Figura 22 – Teste de comparações múltiplas (*Tukey Test*) de condutividade elétrica (1 MHz)



Fonte: Os autores (2025).

CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos na presente pesquisa foi possível concluir que para o traço limite da norma ABNT NBR 11173 [29] com adição de microfibra de carbono, a resistência à compressão, bem como a densidade aparente atenderam os parâmetros preconizados pela referida norma. Ademais, foi possível concluir que:

1. Com o aumento da incorporação da microfibra de carbono, o comportamento da reatância capacitiva comum a compósitos cimentícios foi sendo reduzido, e assim prevalecendo as propriedades elétricas da microfibra de carbono;

2. Embora a avaliação de propriedades elétricas de microfibras de carbono em argamassas já tinha sido reportada na literatura, o seu uso baseado em traço e parâmetros da norma ABNT NBR 11173 [29] denota emprego promissor para aplicações que possam envolver o uso de argamassas multifuncionais com propriedades elétricas;
3. O traço TD-00-06 pode ser considerado como o resultado mais otimizado do presente estudo, visto que apresentou aumento estatisticamente significativo de resistência à tração na flexão e de condutividade elétrica, sem extremo comprometimento das demais propriedades analisadas.

Por fim, o aperfeiçoamento de argamassas com propriedades elétricas, permite a obtenção de avanços em suas aplicações de forma com que se colabore com o desenvolvimento de tecnologias que permitam o uso destas argamassas em construções reais. Tal uso, na forma de compósitos cimentícios multifuncionais pode colaborar com o aumento da vida útil das construções e consequentemente na redução do consumo de matérias primas, o que vai ao encontro dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU).

AGRADECIMENTOS

Esse trabalho foi financiado pelas seguintes agências de pesquisa: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - Código de financiamento 001; Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) proc. 310375/2020-7 e proc. 309102/2023-5; e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) proc. 2023/05479-4. Os autores também agradecem ao programa de pós-graduação e à equipe de técnicos do Laboratório de Materiais da Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] 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.

[2] 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.

[3] OZAKI E SILVA, CT.; SILVA, J. B. L. P. E; LINTZ, R. C. C.; GACHET, L. A. Mortars with addition of powdered graphite: Mechanical and electrical properties. **Materials Today: Proceedings**, 2023. Advanced online publication. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.03.489.

[4] LUO, T.; WANG, Q. Effects of Graphite on Electrically Conductive Cementitious Composite Properties: A Review. **Materials**, v. 14, 4798, 2021. DOI: 10.3390/ma14174798

[5] 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.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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.

[9] GARCÍA-MACÍAS, E.; D'ALESSANDRO, A.; CASTRO-TRIGUERO, R.; PÉREZ-MIRA, D.; UBERTINI, F. Micromechanics modeling of the electrical conductivity of carbon nanotube cement-matrix composites. **Composites Part B: Engineering**, v. 108, p. 451-469, 2017. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.10.025.

[10] IRFAN, M. S.; KHAN, T.; HUSSAIN, T.; LIAO, K.; UMER, R. Carbon coated piezoresistive fiber sensors: From process monitoring to structural health monitoring of composites – A review. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 141, 106236, 2021. DOI: 10.1016/j.compositesa.2020.106236.

[11] 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.

[12] 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.

[13] 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.

[14] 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.

[15] 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.

[16] 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.

[17] 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.

[18] SEGURA, I.; FANECA, 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.

[19] SARWARY, M. H.; YILDIRIM, G.; AL-DAHAWI, A.; ANIL, Ö.; KHIAVI, 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.

[20] RAMACHANDRAN, K.; VIJAYAN, P.; MURALI, G.; VATIN, N. I. A Review on Principles, Theories and Materials for Self Sensing Concrete for Structural Applications. **Materials**, v. 15, 3831, 2022. DOI: 10.3390/ma15113831.

[21] ZHU, Y.; ZHANG, H.; ZHANG, Z.; YAO, Y. Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) of hydration process and drying shrinkage for cement paste with W/C of 0.25 affected by high range water reducer. **Construction and Building Materials**, v. 131, p. 536-541, 2017. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.099.

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

[23] CARÍSIO, DE A. P.; DOS SANTOS MENDONÇA, Y. G.; SOARES, C. F. T.; REALES, O. A. M.; DE MORAES REGO FAIRBAIRN, E.; FILHO, R. D. T. Dispersion of Carbon Nanotubes with Different Types of Superplasticizer as a Dispersing Agent for Self-Sensing Cementitious Materials. **Appl. Sci.**, v. 11, 8452, 2021. DOI: 10.3390/app11188452.

[24] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR **NM 16916**: Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

[25] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT **NBR 16972**: Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021.

[26] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT **NBR 17054**: Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022.

[27] BRK AMBIENTAL LIMEIRA S.A (Limeira). **Relatório Anual de Qualidade da Água 2023**: Limeira - ETA. 2023. Disponível em: https://www.brkambiental.com.br/storage/rebranding/relatorio-de-qualidade-da-agua/relatorio-anual-qualidade-2023-eta-limeira.pdf. Acesso em: 14 abr. 2024.

[28] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT **NBR 16541**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro, 2016.

[29] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT **NBR 11173**: Projeto e execução de argamassa armada - Procedimento. Rio de Janeiro, 1990.

[30] BAEZA, F. J.; GALAO, O.; ZORNOZA, E.; GARCÉS, P. Effect of aspect ratio on strain sensing capacity of carbon fiber reinforced cement composites. **Materials & Design**, v. 51, p. 1085-1094, 2013. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.05.010.

[31] DONNINI, J.; BELLEZZE, T.; CORINALDESI, V. Mechanical, electrical and self-sensing properties of cementitious mortars containing short carbon fibers. **Journal of Building Engineering**, v. 20, p. 8-14, 2018. DOI: 10.1016/j.jobe.2018.06.011.

[32] DEHGHANI, A.; ASLANI, F. Piezoelectric behaviour of hybrid engineered cementitious composites containing shape-memory alloy, steel, and carbon fibres under compressive stress cycles. **Construction and Building Materials**, v. 273, 121671, 2021b. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121671.

[33] BUASIRI, T.; HABERMEHL-CWIRZEN, K.; KRZEMINSKI, L.; CWIRZEN, A. Piezoresistive Load Sensing and Percolation Phenomena in Portland Cement Composite Modified with In-Situ Synthesized Carbon Nanofibers. **Nanomaterials**, v. 9, n. 4, 594, 2019. DOI: 10.3390/nano9040594.

[34] QI, G.; WANG, Q.; ZHANG, R.; GUO, Z.; ZHAN, D.; LIU, S. Effect of rGO/GNP on the electrical conductivity and piezoresistance of cement-based composite subjected to dynamic loading. **Construction and Building Materials**, v. 368, 130340, 2023. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130340.

[35] 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, 2005.

[36] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT **NBR 13280**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.

[37] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT **NBR 15630**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica. Rio de Janeiro, 2008.

[38] NALON, G. H.; LOPES RIBEIRO, J. C.; PEDROTI, L. G.; DUARTE DE ARAÚJO, E. N.; FRANCO DE CARVALHO, J. M.; SOARES DE LIMA, G. E.; DE MOURA GUIMARÃES, L. Residual piezoresistive properties of mortars containing carbon nanomaterials exposed to high temperatures. **Cement and Concrete Composites**, v. 121, 104104, 2021. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104104.

[39] BELLI, A.; MOBILI, A.; BELLEZZE, T.; TITTARELLI, F. Commercial and recycled carbon/steel fibers for fiber-reinforced cement mortars with high electrical conductivity. **Cement and Concrete Composites**, v. 109, 103569, 2020. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103569.

[40] LAZANAS, A. C.; PRODROMIDIS, M. I. Electrochemical Impedance SpectroscopyA Tutorial. **ACS Meas. Sci. Au**, v. 3, p. 162-193, 2023. DOI: 10.1021/acsmeasuresciau.2c00070.

[41] AL-DAHAWI, A.; SARWARY, M. H.; ÖZTÜRK, O.; YILDIRIM, G.; AKIN, A.; ŞAHMARAN, M.; LACHEMI, M. Electrical percolation threshold of cementitious composites possessing self-sensing functionality incorporating different carbon-based materials. **Smart Materials and Structures**, v. 25, n. 10, 105005, 2016. DOI: 10.1088/0964-1726/25/10/105005.

[42] ÇELIK, D. N.; YILDIRIM, G.; AL-DAHAWI, A.; ULUGÖL, H.; HAN, B.; ŞAHMARAN, M. Self-monitoring of flexural fatigue damage in large-scale steel-reinforced cementitious composite beams. **Cement and Concrete Composites**, v. 123, 104183, 2021. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104183.

[43] 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.

[44] MONTEIRO, A. O.; CACHIM, P. B.; COSTA, P. M. F. J. Self-sensing piezoresistive cement composite loaded with carbon black particles. **Cement and Concrete Composites**, v. 81, p. 59-65, 2017. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2017.04.009.

[45] DENG, L.; MA, Y.; HU, J.; YIN, S.; OUYANG, X.; FU, J.; LIU, A.; ZHANG, Z. Preparation and piezoresistive properties of carbon fiber-reinforced alkali-activated fly ash/slag mortar. **Construction and Building Materials**, v. 222, 738-749, 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.134.

[46] ZHANG, X.; WANG, J.; YANG, S.; FENG, H. The growth of in-situ CNTs on slag to enhance electromagnetic interference shielding effectiveness of cement-based composite. **Construction and Building Materials**, v. 411, 134643, 2024. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134643.

[47] BELLI, A.; MOBILI, A.; BELLEZZE, T.; TITTARELLI, F.; CACHIM, P. Evaluating the Self-Sensing Ability of Cement Mortars Manufactured with Graphene Nanoplatelets, Virgin or Recycled Carbon Fibers through Piezoresistivity Tests. **Sustainability**, v. 10, 4013, 2018. DOI: 10.3390/su10114013.

[48] SAFIUDDIN, M.; ABDEL-SAYED, G.; HEARN, N. Flexural and Impact Behaviors of Mortar Composite Including Carbon Fibers. **Materials**, v. 15, 1657, 2022. DOI: 10.3390/ma15051657.

[49] MUTHUKUMARANA T. V.; ARACHCHI M. A. V. H. M.; SOMARATHNA H. M. C. C.; RAMAN S. N. A review on the variation of mechanical properties of carbon fibre-reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 366, 130173, 2023. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.130173.