



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Tecnologia

JOÃO BATISTA LAMARI PALMA E SILVA

**ESTUDO DO DESEMPENHO FÍSICO-MECÂNICO, ELÉTRICO E
PIEZORRESISTIVO DE COMPÓSITO CIMENTÍCIO AUTOSSENSÍVEL
PRODUZIDO COM RESÍDUO DE LONA DE FREIO E FIBRA DE CARBONO**

**STUDY OF THE PHYSICAL-MECHANICAL, ELECTRICAL AND PIEZORESISTIVE
PERFORMANCE OF A SELF-SENSING CEMENT COMPOSITE PRODUCED WITH
BRAKE LINING WASTE AND CARBON FIBER**

Limeira
2024

JOÃO BATISTA LAMARI PALMA E SILVA

**ESTUDO DO DESEMPENHO FÍSICO-MECÂNICO, ELÉTRICO E
PIEZORRESISTIVO DE COMPÓSITO CIMENTÍCIO AUTOSSENSÍVEL
PRODUZIDO COM RESÍDUO DE LONA DE FREIO E FIBRA DE CARBONO**

*Tese apresentada à Faculdade de Tecnologia
da Universidade Estadual de Campinas como
parte dos requisitos para a obtenção do título
de Doutor em Tecnologia, na Área de Ciência
dos Materiais.*

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Luísa Andréia Gachet

ESTE TRABALHO CORRESPONDE À VERSÃO
FINAL DA TESE DEFENDIDA POR JOÃO BATISTA
LAMARI PALMA E SILVA E ORIENTADO PELA
PROF^a. DR^a. LUÍSA ANDREA GACHET.

Limeira
2024

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Faculdade de Tecnologia
Felipe de Souza Bueno - CRB 8/8577

Si38a Silva, João Batista Lamari Palma e, 1981-
Estudo do desempenho físico-mecânico, elétrico e piezorresistivo de compósito cimentício autossensível produzido com resíduo de lona de freio e fibra de carbono / João Batista Lamari Palma e Silva. – Limeira, SP : [s.n.], 2024.

Orientador: Luísa Andréia Gachet.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Tecnologia.

1. Compósito cimentício. 2. Condutividade elétrica. 3. Piezorresistividade. 4. Resíduo de lona de freio. 5. Fibras de carbono. I. Gachet, Luísa Andréia, 1970-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Tecnologia. III. Título.

Informações Complementares

Título em outro idioma: Study of the physical-mechanical, electrical and piezoresistive performance of a self-sensing cement composite produced with brake lining waste and carbon fiber

Palavras-chave em inglês:

Cementitious composite

Electric conductivity

Piezoresistivity

Brake lining waste

Carbon fibers

Área de concentração: Ciência dos Materiais

Titulação: Doutor em Tecnologia

Banca examinadora:

Luísa Andréia Gachet [Orientador]

Rosa Cristina Cecche Lintz

Edson Luiz Ursini

Jose Luiz Ramirez Bohorquez

Nádia Cazarim da Silva Forti

Data de defesa: 21-03-2024

Programa de Pós-Graduação: Tecnologia

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0001-7115-6385>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/9261746168064448>

FOLHA DE APROVAÇÃO

Abaixo se apresentam os membros da comissão julgadora da sessão pública de defesa de tese para o Título de Doutor em Tecnologia na área de concentração Ciência dos Materiais, a que se submeteu o aluno João Batista Lamari Palma e Silva, em 21 de março de 2024 na Faculdade de Tecnologia – FT/UNICAMP, em Limeira/SP.

Profa. Dra. Luísa Andréia Gachet
Presidente da Comissão Julgadora
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)

Profa. Dra. Rosa Cristina Cecche Lintz
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)

Prof. Dr. Edson Luiz Ursini
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)

Dr. Jose Luis Ramirez Bohorquez
Instituto de Pesquisas Eldorado

Profa. Dra. Nádia Cazarim da Silva Forti
Pontifícia Universidade Católica de Campinas

Ata da defesa, assinada pelos membros da Comissão Examinadora, encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria de Pós-graduação da Faculdade de Tecnologia.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha mãe Ligia, ao meu pai Julio (*in memoriam*);

À memória de meus avós Zoraide, Alzira, Romeu e Julio;

Aos meus alunos e minhas alunas, com os(as) quais aprendo constantemente.

AGRADECIMENTOS

À tudo que creio.

À minha família e aos meus amigos por sempre me lembrarem que somos capazes.

À Profa. Dra. Luísa Andréia Gachet pela oportunidade, apoio, ensinamentos, parceria, confiança e amizade.

À Profa. Dra. Rosa Cristina Cecche Lintz pela atenção, ensinamentos, parceria e amizade.

À Comissão Examinadora de Defesa pelo tempo despendido e pelas importantes contribuições prestadas.

Ao Prof. Dr. Omar Carvalho Branquinho pela importante colaboração no exame de qualificação.

Ao Prof. Dr. Amauri Ernesto Gomes pela ajuda na realização dos ensaios pelo método das frequências naturais de vibração.

À Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) por todo apoio material e imaterial concedido para consecução desta pesquisa.

Ao Laboratório de Materiais de Construção da Faculdade de Tecnologia da UNICAMP, nas pessoas dos técnicos Emerson Verzegnassi, Reginaldo Ferreira, Diego Thomaz e Ivonei Teixeira, por todo apoio e ajuda no decorrer desta pesquisa.

Ao Laboratório de Telecomunicações da Faculdade de Tecnologia da UNICAMP, nas pessoas do Prof. Dr. Francisco José Arnold e dos técnicos Rodrigo Ximenes e João Viana, pela ajuda durante os ensaios de espectroscopia de impedância elétrica.

Ao Laboratório Multidisciplinar de Microscopia Eletrônica da Faculdade de Tecnologia da UNICAMP, na pessoa da técnica Josiane Vendemiatti, bem como da colega Ariane Becker, pelo apoio na realização dos ensaios atinentes ao referido laboratório.

Ao Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da UNICAMP, nas pessoas do Prof. Dr. Carlos Eduardo Marmorato Gomes e do técnico André Campanholi, pelo apoio para realização de ensaios em agosto de 2022.

Ao Espaço Plasma da UNICAMP, na pessoa do técnico Marcelo Guedes pelo auxílio no uso de ferramentas e equipamentos.

Ao Laboratório de Ecotoxicologia e Genotoxicidade da Faculdade de Tecnologia da UNICAMP, nas pessoas da técnica Ádria de Oliveira e da pesquisadora Dra. Amanda dos Santos, pelo auxílio nas atividades de microscopia digital.

À Secretaria de Pós-Graduação da Faculdade de Tecnologia da UNICAMP, nas pessoas da Danielle Ribeiro e da Elaine Boim, pelo apoio nas ações atinentes a referida secretaria.

À Secretaria de Pesquisa da Faculdade de Tecnologia da UNICAMP, na pessoa do Thiago Rosa, pelo apoio nas ações atinentes a referida secretaria.

As(os) colegas do grupo de pesquisa, nas pessoas da Adriana Gomes, Ariane Becker, Augusto Silva, Camila Ozaki, Lucas Batista, Lucas Pereira e Stephanie Marçula, pela incansável ajuda.

Aos incontáveis bolsistas SAE-UNICAMP por toda ajuda no decorrer desta pesquisa.

À MC-Bauchemie Indústria e Comércio Ltda. por doar o aditivo redutor de água utilizado nesta pesquisa.

A todas as pessoas que de alguma forma contribuíram com essa pesquisa, meu muito obrigado, pois ciência não se faz sozinho.

Pelo apoio recebido no âmbito do processo nº 2023/05479-4, da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

“Ciência é [também] conhecimento organizado [...]"

Immanuel Kant

RESUMO

Grandes construções como túneis, barragens, pontes e arranha-céus, necessitam de avaliações frequentes para que suas condições de integridade e funcionalidade sejam preservadas. Para isto, existem sistemas de Monitoramento de Integridade Estrutural (MIE), os quais empregam o uso de sensores instalados na estrutura. Uma alternativa ou complemento ainda em estudo, tem sido o desenvolvimento de Compósitos Cimentícios Autossensíveis (CCAs), os quais são capazes de se automonitorarem sem o emprego de sensores. Muitos destes CCAs são baseados no efeito piezorresistivo, os quais necessitam que materiais eletricamente condutores sejam empregados na produção do concreto ou da argamassa. Ocorre que esses materiais em muitos casos comprometem as propriedades mecânicas do compósito, ou possuem alto custo. Nesse sentido, esta pesquisa teve por objetivo desenvolver um CCA na forma de argamassa estrutural mediante incorporação de resíduo de lona de freio e de fibra de carbono. Foram analisadas as propriedades físico-mecânicas, elétricas e piezorresistivas do CCA. Com isto foi possível constatar que o CCA com resíduo de lona de freio apresentou aumento em sua condutividade elétrica, bem como melhor resposta piezorresistiva, na comparação com o traço de referência, sem que houvesse perda significativa da resistência mecânica em substituições de até 40% da areia pelo resíduo. Em determinadas proporções o resíduo ajudou a atenuar a perda de resistência à compressão do CCA provocada pela fibra de carbono. O uso das técnicas de microscopia eletrônica de varredura e de espectroscopia de raios X por dispersão em energia, colaboram dentre outras questões na identificação das fibras presentes no resíduo, as quais foram responsáveis pelo ganho de resistência à tração na flexão do CCA. Com isto é possível concluir que o uso do resíduo de lona de freio tem potencial para produção experimental de CCA, visando inclusive reduzir o consumo de agregados naturais e o descarte das lonas de freio usadas. Isso pode representar uma redução de custos na produção do CCA e uma solução ambientalmente amigável, colaborando assim com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU). Outras pesquisas são necessárias para verificar de forma integral a viabilidade e a segurança para uso dos resíduos de lona de freio em compósitos cimentícios.

Palavras-chave: Compósito cimentício, condutividade elétrica, piezorresistividade, resíduo de lona de freio, fibra de carbono.

ABSTRACT

Several constructions such as tunnels, dams, bridges, and skyscrapers need frequent assessments so that their integrity and functionality conditions are preserved. In this case, there are Structural Health Monitoring (SHM) systems, which use sensors installed in the structure. An alternative, or complement still being studied, has been the development of Self-Sensing Cementitious Composites (SSCCs), which are able of self-monitoring without the use of sensors. Many of these SSCCs are based on piezoresistive effect, which require electrically conductive materials to be used in the production of concrete or mortar. It happens when these materials in many cases compromise the mechanical properties of the composite or have a high cost. In this sense, this research aimed to develop a SSCC in the form of structural mortar by incorporating brake lining waste and carbon fibers. The physical-mechanical, electrical, and piezoresistive properties of the SSCC were analyzed. Consequently, it was possible to verify that the SSCC with brake lining waste showed an increase in its electrical conductivity, as well as a better piezoresistive response, in comparison with the reference mix proportion, where there was no significant loss of mechanical strength in replacements of up to 40% of sand by waste. However, in certain proportions, the waste helped to mitigate the loss of compressive strength of the SSCC caused by the carbon fiber. The use of scanning electron microscopy and energy-dispersive X-ray spectroscopy techniques helped, among other things, to identify the fibers present in the waste, which were responsible for the increase in flexural strength of the SSCC. Therefore, it is possible to conclude that using of brake lining waste has the potential for experimental production of SSCC, even aiming to reduce the consumption of natural aggregates and the disposal of used brake linings. This can represent a cost reduction in the production of SSCC and an environmentally friendly solution, thus collaborating with the Objectives of Sustainable Development (SDGs) of the United Nations (UN). Further research is necessary to fully verify the viability and safety of using brake lining waste in cementitious composites.

Key-words: Cement composite, electrical conductivity, piezoresistivity, brake lining waste, carbon fiber.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Relevância e justificativa da escolha do tema	15
1.2	Objetivos	17
2	REVISÃO DA LITERATURA	18
2.1	Compósitos Cimentícios Autossensíveis (CCAs)	18
2.1.1	Fundamentos e aplicações	18
2.1.2	Resistência elétrica e piezorresistência	22
2.1.3	Piezorresistividade em compósitos cimentícios	27
2.1.4	Técnicas de medição de resistência elétrica	33
2.1.5	Produção de CCAs	45
2.1.6	CCA produzido com resíduos de materiais	54
2.2	Resíduos de lona de freio	59
2.2.1	Materiais de fricção aplicados a freios automobilísticos	59
2.2.2	Utilização de resíduos de lona de freio	65
3	METODOLOGIA	71
3.1	Desenvolvimento do CCA com incorporação de resíduo e fibra	71
3.1.1	Materiais	72
3.1.1.1	Aglomerante	72
3.1.1.2	Agregado Miúdo	73
3.1.1.3	Água	73
3.1.1.4	Aditivo redutor de água	73
3.1.1.5	Resíduo de lona de freio	74
3.1.1.6	Fibra de carbono	78
3.1.2	Métodos	79
3.1.2.1	Caracterização dos materiais	79
3.1.2.2	Requisitos, dosagem e preparo do CCA	83

3.1.2.3	Ensaio do CCA no estado fresco e endurecido.....	92
3.1.2.4	Determinação de propriedades elétricas e piezorresistividade	99
3.1.2.5	Análise da microestrutura do CCA	111
3.1.2.6	Análise estatística	112
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	113
4.1	CCA desenvolvido com resíduo e fibra de carbono	113
4.1.1	Caracterização dos materiais	113
4.1.2	Caracterização do CCA	121
4.1.3	Análise das propriedades elétricas	142
4.1.4	Análise da piezorresistividade	159
4.1.5	Análise da microestrutura do CCA.....	189
5	CONCLUSÕES	204
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	207
	APÊNDICE A.....	225
	APÊNDICE B.....	250

1 INTRODUÇÃO

Devido às diversas vantagens em suas propriedades como baixo custo, boa resistência mecânica e boa durabilidade, o concreto é frequentemente usado nas estruturas das obras de construção civil (You *et al.*, 2017). Essa realidade torna o uso do concreto quase que inevitável nas construções em geral (Erdem; Hanbay; Blankson, 2017), o que faz do concreto o material mais usado na construção das estruturas (Mo *et al.*, 2020) de pontes, viadutos, tuneis, barragens e edifícios.

Contudo, durante seu ciclo de vida a estrutura de concreto está sujeita a diversos fatores que podem afetar sua integridade estrutural, reduzindo assim o seu desempenho ou até mesmo causando sérios danos à estrutura, o que pode levar ao colapso total, inclusive podendo ocorrer perda de vidas humanas. Os fatores que podem afetar a estrutura costumam se manifestar na forma de eventos ambientais extremos como terremotos e vendavais, bem como fatores decorrentes de aplicações de carregamentos excessivos. Ou seja, além daqueles para qual a estrutura foi projetada, ou ainda devido a explosões, choques de veículos e incêndios (Mo *et al.*, 2020; Nalon *et al.*, 2018, 2022; Dong *et al.*, 2019; Hong *et al.*, 2018).

Ainda que as estruturas sejam projetadas para serem seguras, duráveis, utilizáveis e sustentáveis, durante sua existência as mesmas necessitam ser constantemente supervisionadas para se acompanhar suas condições de integridade. Essa necessidade de supervisão levou ao desenvolvimento das técnicas de Monitoramento de Integridade Estrutural (MIE) (Kekez; Kubica, 2020).

O MIE consiste no desenvolvimento e no uso de técnicas e métodos para supervisão das condições da estrutura. Em alguns tipos de estruturas, como pontes e arranha-céus, o monitoramento é realizado de forma contínua, pois os custos com manutenção e reparo dessas estruturas são altos. Com isto, o MIE colabora para que haja um aumento da vida útil das estruturas, o que conseqüentemente reduz os custos com manutenção das mesmas, além diminuir os riscos de acidentes (Sofi *et al.*, 2022).

Um sistema computadorizado de MIE é composto basicamente por redes de sensores, bem como por sistemas de aquisição, processamento, transmissão e armazenamento de dados (Figura 1), visando que tais dados sejam interpretados e o

diagnóstico da estrutura seja possível de ser realizado. Num sistema de MIE os sensores são os coletores de informação, os quais transformam fenômenos físicos e químicos em variações de tensões elétricas. Esses fenômenos costumam ser variações de temperatura, umidade, deslocamento, deformação, pressão e aceleração (Basto; Pelà; Chacón, 2021).

Figura 1 – Esquema de etapas do monitoramento estrutural automatizado

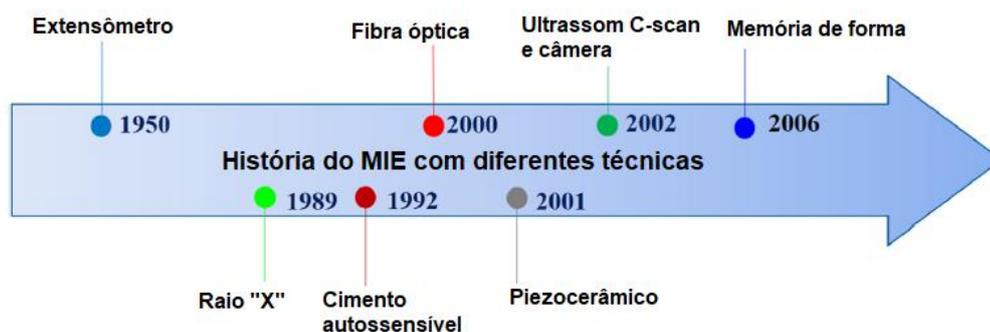


Fonte: Adaptado de Basto, Pelà e Chacón (2021)

Porém, em alguns casos como no uso de sensores em larga escala para o monitoramento estrutural de grande amplitude, pode-se demandar um alto custo para sua implantação (Maier, 2020; Meoni *et al.*, 2019). O uso de sensores acoplados e/ou embutidos na estrutura, pode até mesmo impactar negativamente nas propriedades mecânicas da estrutura (Sarwary *et al.*, 2019; Dong *et al.*, 2019), especialmente no local em que forem instalados, devido algum tipo de incompatibilidade com o concreto.

Esse cenário de necessidade de melhora das técnicas de monitoramento, fez com que nas últimas décadas pesquisadores tenham se dedicado ao aperfeiçoamento do MIE (Dong *et al.*, 2019), o que levou a evolução das técnicas utilizadas no referido monitoramento conforme ilustra a Figura 2.

Figura 2 – Cronologia histórica da evolução das técnicas de monitoramento estrutural



Fonte: Adaptado de Dong *et al.* (2019)

Com o intuito de resolver algumas desvantagens quanto ao uso de sensores embutidos ou acoplados, estudos recentes têm focado o desenvolvimento de materiais inteligentes¹ (Bekzhanova; Memon; Kim, 2021), aplicados a estruturas de construção civil. Um concreto inteligente² é considerado multifuncional, pois além de suportar esforços, o que é a sua principal função, também pode ser um material responsivo, ou seja, funciona como um material que pode monitorar suas próprias tensões em resposta às solicitações que a estrutura sofre, sem o uso de sensores (Huo *et al.*, 2019; Demircilioğlu *et al.*, 2022)

Um concreto inteligente, capaz de ser usado para monitorar sua própria integridade estrutural, mediante o monitoramento de parâmetros como tensão-deformação, temperatura, pH, umidade, entre outros, pode ajudar na detecção de falhas na estrutura, para que seja reparada a tempo de se evitar danos (Birgin; Alessandro; Ubertini, 2023; Mo *et al.*, 2020).

Uma das maneiras mais difundidas para que compósitos cimentícios possam dispor de habilidades de autodetecção, também conhecida como autossensibilidade, necessita que sejam incorporados materiais eletricamente condutores ao compósito durante sua produção (Segura *et al.*, 2019).

A autossensibilidade de um material ou compósito, pode ser compreendida como a habilidade de um objeto físico em se monitorar, sem a necessidade de se instalar um sensor específico (Scholle; Sinapius, 2021).

1.1 Relevância e justificativa da escolha do tema

Pesquisadores têm avaliado a incorporação de diferentes tipos de materiais eletricamente condutores (grafite, fibra de carbono, fibra de aço, pó de cobre, etc.) na produção de Compósitos Cimentícios Autossensíveis (CCAs). No caso dos materiais nobres, o grande destaque tem sido para os nanomateriais à base de carbono, que ainda representam um alto custo na produção de tais compósitos. Neste sentido, para que os CCAs sejam utilizados em larga escala na construção civil, é necessário que

¹ do inglês *smart materials*.

² do inglês *smart concrete*.

sua produção seja simplificada e seu custo seja reduzido (Tian *et al.*, 2019; Wang; Aslani, 2019; Franç; Pichór, 2020).

Além do custo para produção de CCAs, questões como a influência de fatores ambientais, ainda são desafios para implantação em estruturas reais, as quais estão sujeitas a inúmeros fatores como variações de temperatura, umidade, cloretos e dióxidos de carbono, bem como submetidas a múltiplas formas de tensões mecânicas ao decorrer de seu ciclo de vida (Han *et al.*, 2020; Das *et al.*, 2019).

As inovações com o desenvolvimento dos CCAs têm acompanhado tendências tecnológicas atuais, como é o caso dos sensores de compósitos cimentícios produzidos pelos pesquisadores Wang e Aslani (2023) em impressoras 3D e testados em vigas de concreto armado.

Há também pesquisas que buscam inovar com a utilização de materiais de rejeito e/ou reciclados, ou ainda subprodutos, na produção dos CCAs, como por exemplo, cinzas volantes, lama vermelha e escória de aço, não somente visando a redução de custos, mas também com vistas ao desenvolvimento sustentável da construção civil (Nalon *et al.*, 2022).

Neste sentido há um apelo para que pesquisas na área de Ciência do Materiais possam contribuir para com o desenvolvimento de compósitos cimentícios multifuncionais (inclusive os capazes de se automonitorarem), que possibilitem reduzir as emissões de carbono, tanto na fase de sua produção, quanto de sua utilização (Birgin; Alessandro; Ubertini, 2023).

Questões ambientais como estas vão ao encontro dos itens de Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU), como por exemplo, os objetivos: 9 - Indústria, inovação e infraestrutura; 11 - Cidades e comunidades sustentáveis; e 12 - Consumo e produção responsáveis (ONU, [2020]).

Com isto, existe a clara necessidade de se aprofundar a compreensão sobre CCAs ambientalmente amigáveis, especialmente no que se refere às propriedades mecânicas e elétricas (Konkanov *et al.*, 2020), visto inclusive que existem resíduos ainda não empregados no desenvolvimento de novos CCAs.

Neste sentido, a originalidade desta pesquisa se consiste essencialmente no desenvolvimento de um compósito cimentício autossensível com resíduo de lona de freio.

Face ao exposto, constata-se que a temática dos compósitos cimentícios autossensíveis aplicada ao MIE ainda carece de mais pesquisas como esta, de forma que possam contribuir com o avanço do desenvolvimento e da utilização dos CCAs, frente a todos os desafios que ainda não foram plenamente superados.

1.2 Objetivos

Como objetivo geral, esta pesquisa de caráter interdisciplinar busca produzir e caracterizar um compósito cimentício autossensível na forma de argamassa para fins estruturais, mediante incorporação de resíduo de lona de freio e de fibra de carbono.

Para tanto, os objetivos secundários consistem em:

1. Caracterizar e analisar os materiais constituintes do CCA, quanto as propriedades físico-mecânicas e elétricas;
2. Realizar estudo de dosagem da incorporação do resíduo de lona de freio e da fibra de carbono na produção do CCA, na forma de argamassas, para fins estruturais;
3. Caracterizar e analisar o CCA nos estados fresco e endurecido, quanto as propriedades físico-mecânicas;
4. Analisar propriedades elétricas e a autossensibilidade dos diferentes traços de resíduo de lona de freio e fibra de carbono, para obtenção do teor ideal para melhora da condutividade elétrica e da resposta piezorresistiva do CCA, sem comprometimento significativo das propriedades mecânicas;
5. Propor a análise da piezorresistividade do CCA em três direções (0° , 45° e 90°), visando emular um extensômetro tipo roseta.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Compósitos Cimentícios Autossensíveis (CCAs)

2.1.1 Fundamentos e aplicações

O estudo da condutividade elétrica em compósitos cimentícios é algo que remonta do fim do século XIX, a exemplo das pesquisas realizadas por St. Lindeck, que resultaram na publicação do trabalho intitulado “Condutividade elétrica do cimento e do concreto” (tradução livre) no ano de 1896, com dados acerca da influência da umidade e dos agregados na condutividade elétrica dos compósitos cimentícios (Caulk, 1897; Lindeck, 1896).

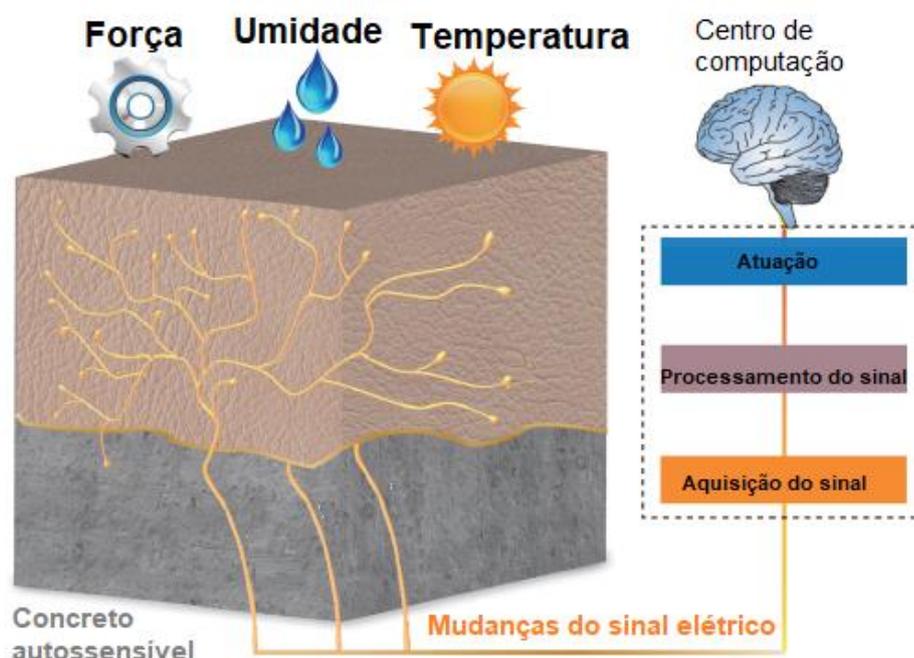
Porém, somente na década de 80 do século XX, pesquisadores começaram a vislumbrar a variação da condutividade elétrica em concretos, como uma forma de se avaliar a detecção de fissuras numa estrutura (Whittington; McCarter; Forde, 1981). Já a década de 90 é comumente mencionada na literatura como um marco do desenvolvimento dos CCAs, o que se deu mediante a incorporação de fibras de carbono, para avaliação do efeito piezorresistivo (Muto *et al.*, 1992; Chen; Chung, 1993; Wang *et al.*, 2016a; Segura *et al.*, 2019), com o intuito de se promover a autossensibilidade em concretos e argamassas.

Pesquisas sobre o tema autossensibilidade dos compósitos cimentícios têm aumentado cada vez mais e são comumente referenciadas na literatura de língua inglesa pela expressão *self-sensing*. Contudo, alguns autores utilizam outras expressões como: *self-diagnosing*, *self-stress*, *self-test*, *self-detection* e *self-monitoring*, ou ainda *smart cement sensor*, como formas de adjetivos à autossensibilidade dos compósitos cimentícios (Chen; Chung, 1993; Makul, 2020; Ubertini *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2021; Dimou *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2015; Nalon *et al.*, 2021).

Um sistema de sensoriamento, como o sistema nervoso sensorial humano, é capaz de detectar e codificar estímulos físicos, os quais são transmitidos na forma de sinais sensoriais para o sistema nervoso central (Wang *et al.*, 2020). Ou seja, o compósito autossensível, de forma análoga à pele humana, não necessita da instalação de sensores específicos para que seja possível perceber a aplicação de força, ou ainda,

a presença de umidade ou variação de temperatura, por meio da variação de um sinal elétrico, conforme ilustra a Figura 3.

Figura 3 – Analogia entre a pele humana e materiais autossensíveis

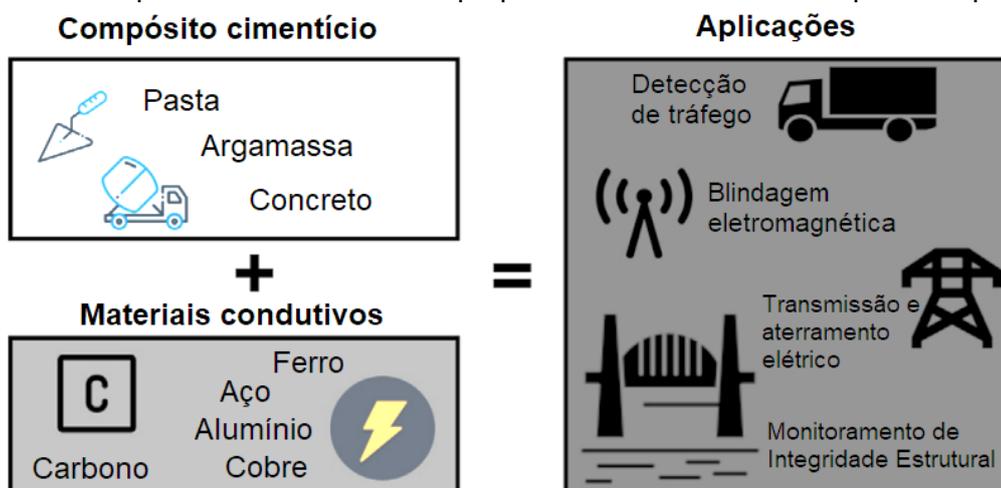


Fonte: Adaptado de Ding *et al.* (2019)

Ainda em relação à Figura 3, a sensibilidade à aplicação de forças em uma estrutura de concreto, ajuda no estudo do comportamento mecânico, colaborando assim com o MIE.

Além da autossensibilidade, o compósito cimentício eletricamente condutivo, seja ele na forma de pastas de cimento, argamassas e concretos, pode ter várias aplicações, como por exemplo, aterramento elétrico, proteção catódica, blindagem contra interferência eletromagnética, monitoramento de tráfego de veículos, MIE, entre outras funcionalidades (Wang; Aslani, 2019), conforme Figura 4. Tais aplicações também requerem a incorporação de materiais eletricamente condutores, para aumento da condutividade elétrica do compósito cimentício.

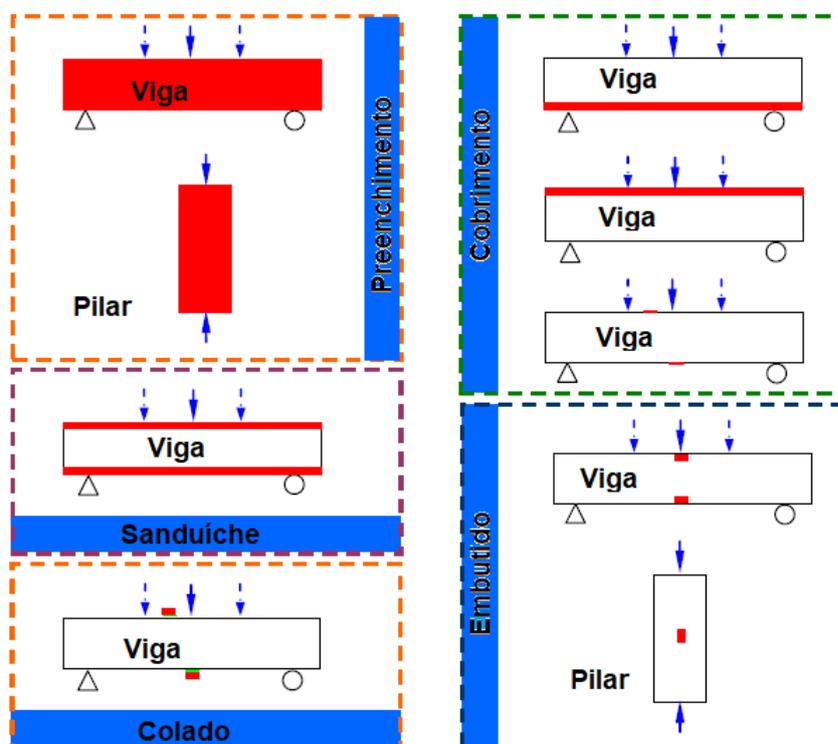
Figura 4 – Compósitos cimentícios com propriedades elétricas e exemplos de aplicações



Fonte: Adaptado de Ozaki e Silva *et al.* (2023); Luo e Wang (2021)

Os CCAs podem ser aplicados em elementos estruturais como vigas e pilares (Figura 5) a granel, ou seja, o concreto autossensível preenche toda a volumetria do elemento, ou ainda, na forma superficial (sanduiche ou cobertura) e de sensores, sejam estes embutidos ou colados sobre a estrutura de concreto convencional (Tian *et al.*, 2019).

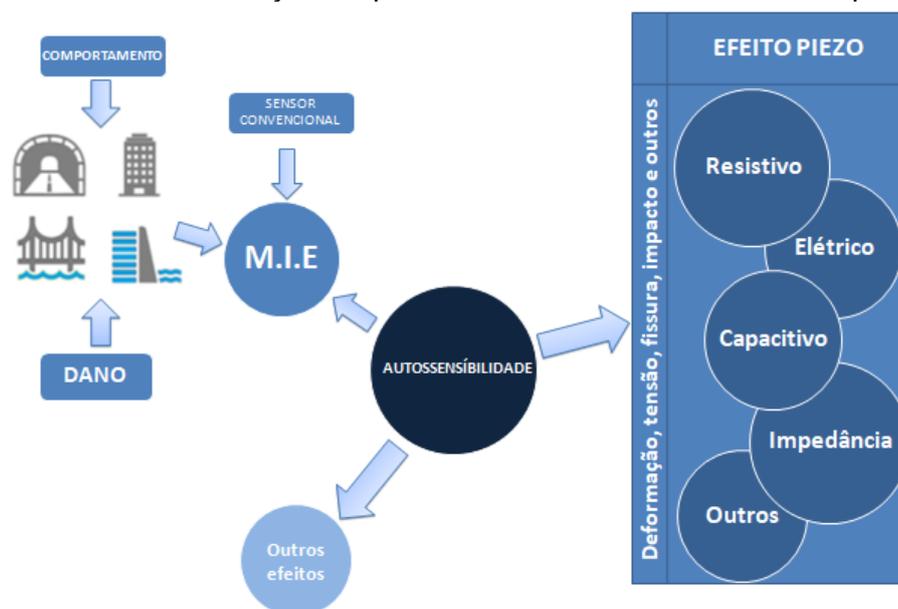
Figura 5 – Formas de aplicação de compósitos autossensíveis (em vermelho) em elementos estruturais de concreto



Fonte: Adaptado de Han, Ding e Yu (2015)

Para avaliar autossensibilidade em compósitos, vários princípios eletromecânicos como os da Figura 6, baseados em efeitos piezorresponsivos³ são utilizados, tais como piezoelectricidade, resistividade, capacitância e impedância (Scholle; Sinapius, 2021; Lee; Le; Kim, 2019; Balam *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2021).

Figura 6 – Diferentes efeitos piezorresponsivos aplicados ao monitoramento de integridade estrutural das construções, a partir da autossensibilidade dos compósitos



Fonte: Próprio autor

Contudo, entre os princípios mais comuns utilizados para avaliação dos CCAs, são os baseados nos efeitos piezorresistivo e capacitivo. Porém, o segundo é mais dependente da umidade do compósito e sua medição é dificultada pela contribuição da capacitância na interface de cada eletrodo embutido no compósito (Xi; Ozturk; Chung, 2022; Han; Ding; Yu, 2015; Chung, 2021a).

Outra vantagem do efeito piezorresistivo em relação a outros piezo-efeitos, é que este possui saída linear, ou seja, a variação de tensão elétrica é proporcional a variação de deformação mecânica (Jaeger *et al.*, 1995; Ramirez; Fruett, 2019).

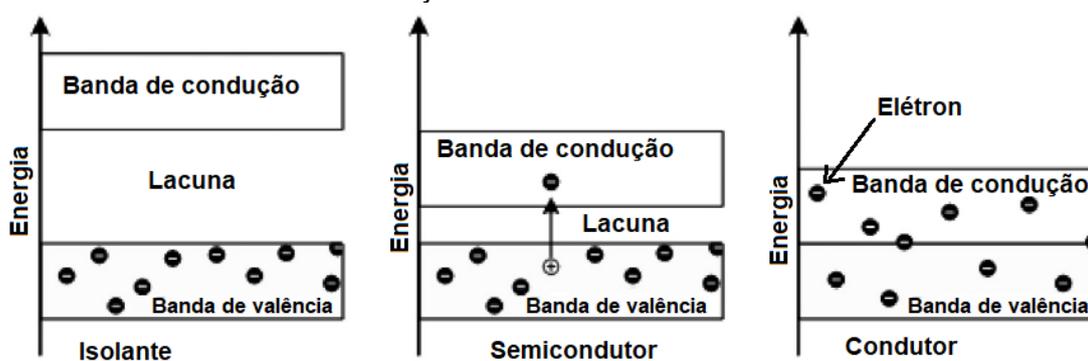
Isto posto, optou-se por utilizar o princípio da piezorresistividade para avaliação do CCA desenvolvido nesta pesquisa.

³ tradução livre do autor a partir da etimologia dada em <https://en.wiktionary.org/wiki/piezoresponse> para a expressão *piezoresponse*.

2.1.2 Resistência elétrica e piezorresistência

Um material possui em sua estrutura eletrônica dois tipos de bandas, sendo elas a de Condução e a de Valência (Figura 7). Quando essas duas bandas estão muito distantes o material é classificado como isolante [mau condutor]. À medida que tais bandas se aproximam, mas sem se tocarem, pode ocorrer a movimentação de alguns elétrons da banda de Valência para banda de Condução, o que caracteriza o material como semicondutor. Por fim, quando tais bandas estão juntas ou sobrepostas, ocorre o movimento livre dos elétrons, o que é uma característica do material condutor de eletricidade (Le; Kim; Yoon, 2017).

Figura 7 – Esquema de comportamento dos elétrons entre as bandas de Valência e de Condução nos diferentes materiais



Fonte: Adaptado de Ameta *et al.*, (2018)

Um condutor possui elétrons livres na estrutura nuclear do átomo, ao contrário de outros materiais que possuem elétrons firmemente retidos nessa estrutura. No caso dos metais, tais elétrons estão na banda de Valência e sofrem um fluxo contínuo quando ocorre aplicação de um campo elétrico, que promove a condutividade nos mesmos. Isso se dá pelo fato de não haver um vazio entre as duas bandas (Chung; Xi, 2022; Sundarkrishnaa, 2015; Gueye *et al.*, 2019), o que reduz a resistência elétrica (R).

A resistência elétrica pode ser definida como um atributo de um determinado material em dificultar a passagem de corrente elétrica (I), ou seja, a capacidade em se opor ao fluxo ordenado de carga elétrica. Sendo a referida corrente diretamente proporcional à tensão elétrica (U) (Crovador, 2020), no caso dos materiais eletricamente condutores.

Essa relação entre a corrente e a tensão elétrica, foi descoberta em 1826 pelo físico Georg Simon Ohm (1789-1854) e atualmente sua formulação é representada pela Equação 1, também conhecida como primeira Lei de Ohm (Heering; Keck; Rohlf, 2020; Sarwary *et al.*, 2019).

$$R = \frac{U}{I} \quad (1)$$

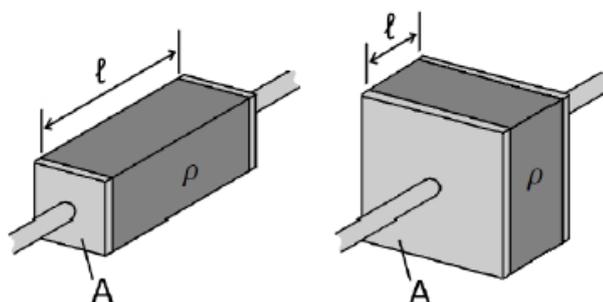
A segunda Lei de Ohm, diz respeito à resistividade elétrica (ρ) de um determinado material, a qual é determinada a partir da resistência elétrica (R), da área (A) da seção transversal e do comprimento (l), conforme Equação 2 (Scholle; Sinapius, 2021; Monteiro; Cachim; Costa, 2017; Deng *et al.*, 2019), o que é ilustrado na Figura 8.

$$\rho = R \frac{A}{l} \quad (2)$$

Ou ainda reescrita na forma da Equação 3.

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (3)$$

Figura 8 – Influência geométrica do elemento na resistência elétrica



Fonte: Adaptado de Monteiro (2017) *apud* Pereira (2018)

A partir da resistividade (Equação 3), é possível se obter a condutividade elétrica (σ_e) por meio da Equação 4 (Zhang *et al.*, 2024).

$$\sigma_e = \frac{1}{\rho} \quad (4)$$

A mudança de resistência elétrica pode então ser atribuída a dois fatores, sendo eles a mudança de resistividade do material e a mudança geométrica (Scholle; Sinapius, 2021).

A relação entre a mudança de resistência elétrica (R) e a deformação mecânica ($\epsilon = \Delta l/l$) foi descoberta em 1856 por William Thomson, mais conhecido como Lorde Kelvin. A partir de experimentos envolvendo fios de cobre e de ferro, observou-se a variação de resistência elétrica à medida que os fios se deformavam. Contudo, o termo piezorresistência foi definido somente em 1935 por J. W. Cookson, a partir da expressão piezo que provém do grego, com o significado de pressão (Keil, 2017; Park, 2016).

Mesmo que por ventura não haja mudança de resistividade elétrica (ρ), a mudança de resistência (R) ainda pode ocorrer devido a mudanças de geometria da estrutura, ou seja, mediante a ocorrência de deformação (Chung, 2021a). Contudo, Bohorquez (2019) destaca que, para semicondutores, sua deformação pode mudar a resistividade elétrica (ρ) de forma significativa.

Para tanto, a Equação 3 deve ser objeto de aplicação de logaritmos naturais conforme Equações 5 e 6, visando a obtenção da mudança relativa de resistência (Andolfato, Camacho; Brito, 2004) em razão das variações geométrica.

$$\ln R = \ln \left(\rho \frac{l}{A} \right) \quad (5)$$

$$\ln R = \ln \rho + \ln l - \ln A \quad (6)$$

A partir da diferenciação parcial da Equação 6 e divisão pela resistência elétrica (R), bem como considerando um material isotrópico nas duas direções transversais ao seu comprimento (l) tem-se a Equação 7 (Keil, 2017; Chung, 2020).

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta A}{A} \quad (7)$$

O termo $\Delta A/A$ representa a mudança (redução no caso de tração no sentido longitudinal) na seção transversal decorrente da deformação transversal associada ao Coeficiente de Poisson (ν), o que corresponde à Equação 8 (Keil, 2017).

$$\frac{\Delta A}{A} = -2\nu \frac{\Delta l}{l} \quad (8)$$

Realizando a substituição de $\Delta A/A$ da Equação 8 na Equação 7, obtêm-se as Equações 9 e 10.

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} + 2\nu \frac{\Delta l}{l} \quad (9)$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} (1 + 2\nu) \quad (10)$$

Ou seja, ainda conforme a Equação 10, tanto a deformação quanto a resistividade elétrica (ρ) contribuem para alteração na resistência elétrica (R), o que pode ser analisado em 3 casos: 1º $\frac{\Delta \rho}{\rho} \gg \frac{\Delta l}{l}$; 2º $\frac{\Delta \rho}{\rho} \sim \frac{\Delta l}{l}$; e 3º $\frac{\Delta \rho}{\rho} \ll \frac{\Delta l}{l}$ (Chung, 2020).

No 1º caso despreza-se a menor parcela e a variação de resistência fica apenas em função da variação da resistividade, ou seja, conforme Equação 11.

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (11)$$

Ainda para o 1º caso, a relação entre variação de resistência é dada pela Equação 12 onde o coeficiente de sensibilidade (K) é a relação entre as grandezas elétricas e mecânicas (Chung, 2020).

$$K = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta l}{l}} = \frac{\frac{\Delta \rho}{\rho}}{\frac{\Delta l}{l}} \quad (12)$$

Para que os valores do fator de sensibilidade sejam considerados válidos, os mesmos devem ser obtidos em deformações cujas alterações de resistências elétricas sejam

totalmente reversíveis em relação a uma alteração microestrutural. Caso contrário, os valores do fator de sensibilidade serão demasiadamente altos, não necessariamente correspondendo a um valor coerente com a relatividade entre variações de resistência elétrica e deformação mecânica (Chung, 2020).

Para o 2º caso, o valor da variação de resistência leva em consideração a similaridade envolvendo as variações de resistividade e deformação, conforme Equação 13 (Chung, 2020).

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} (2 + 2\nu) \quad (13)$$

A Equação 13 pode ser reescrita, para este 2º caso, conforme Equação 14 (Chung, 2020).

$$K = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta l}{l}} = (2 + 2\nu) \quad (14)$$

Por fim, para o 3º caso, o valor da variação de resistência é obtido conforme Equação 15 (Chung, 2020).

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} (1 + 2\nu) \quad (15)$$

Podendo assim, a Equação 15 ser reescrita, agora para o 3º Caso, conforme Equação 16.

$$K = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta l}{l}} = (1 + 2\nu) \quad (16)$$

Com isto, a deformação mecânica associada à variação de resistência ou resistividade elétrica, pode ser obtida por meio do coeficiente de sensibilidade (K), conforme Equação 17, adaptada de Nalon *et al.* (2020). Sendo as deformações muito pequenas,

as variações de resistência e de resistividade podem ser consideradas equivalentes (Del Moral *et al.*, 2021).

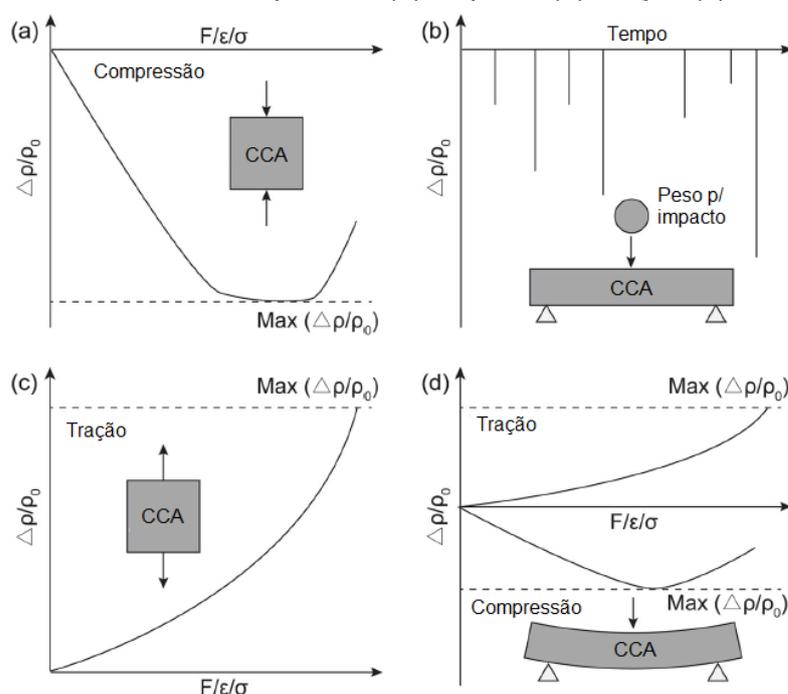
$$K = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta l}{l}} \approx \frac{\frac{\Delta \rho}{\rho}}{\frac{\Delta l}{l}} \quad (17)$$

Neste caso, ΔR e $\Delta \rho$ correspondem às variações elétricas em decorrência dos esforços mecânicos. Essa variação de resistividade elétrica provocada por deformação caracteriza a ocorrência do efeito da piezorresistividade (Nalon *et al.*, 2020; Dong *et al.*, 2019; Chung, 2020).

2.1.3 Piezorresistividade em compósitos cimentícios

Os diversos tipos de esforços mecânicos tais como compressão, tração e flexão aplicados em CCAs, podem provocar diferentes tipos de comportamentos nas respostas de variação de resistividade elétrica (Han; Ding; Yu, 2015), conforme ilustra a Figura 9.

Figura 9 – Diferentes comportamentos de variação de resistividade elétrica em função dos esforços mecânicos de: compressão (a); impacto (b); tração (c); e flexão (d)

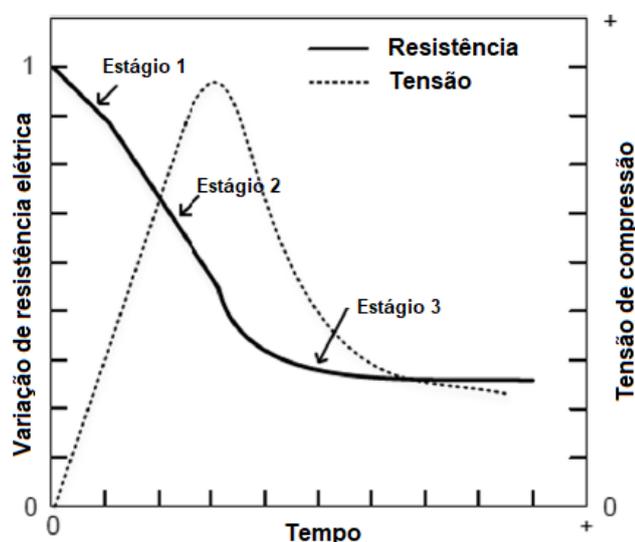


(ρ = resistividade; F = força; ϵ = deformação; σ = tensão mecânica)

Fonte: Adaptado de Ding *et al.* (2019)

Quando o CCA é submetido a esforços de até 30% de sua resistência mecânica de ruptura, ou seja, dentro do regime elástico, há total reversibilidade tanto da variação de resistência elétrica quando da deformação. A partir de 30% até 75% da resistência de ruptura, ocorrem pequenos danos na matriz, promovendo alteração da linha de base da resistividade de forma irreversível, contudo ainda há reversibilidade da resistividade elétrica. Já acima de 75%, ocorrem maiores danos na matriz, comprometendo a rede condutora, fazendo com que a resistividade elétrica seja totalmente irreversível (Han; Ding; Yu, 2015). Esses três estágios são ilustrados na Figura 10, com as variações de resistência elétrica e tensão de compressão num CCA.

Figura 10 – Resposta eletromecânica típica de um CCA sob compressão

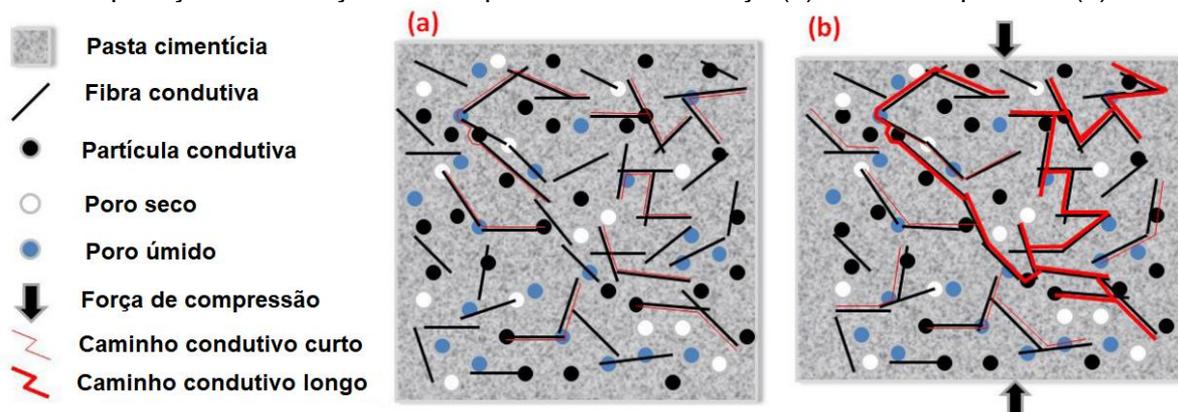


Fonte: Adaptado de Kim *et al.* (2021)

A deformação provocada por esforços externos num CCA altera a geometria da estrutura ou do corpo de prova, bem como a resistência elétrica das vias condutoras, com base no efeito piezorresistivo, o que pode alterar o fluxo da corrente elétrica e assim se avaliar a autossensibilidade do compósito (You *et al.*, 2017).

Essas vias condutoras são formadas pela incorporação de materiais condutores no compósito cimentício, uma vez que este é considerado isolante [mau condutor] para eletricidade. Quanto mais próximos entre si estiverem os materiais condutores, menor será a resistividade elétrica do compósito. Essa alteração da distância entre as partículas condutoras modifica as vias condutoras, seja aumentando ou reduzindo as mesmas em decorrência da deformação da estrutura ou do corpo de prova, conforme ilustra a Figura 11 (Monteiro; Cachim; Costa, 2017; Wang; Aslani, 2021a).

Figura 11 – Esquema típico da piezorresistividade em compósitos cimentícios mediante aplicação de esforços de compressão. Sem esforço (a) e sob compressão (b)

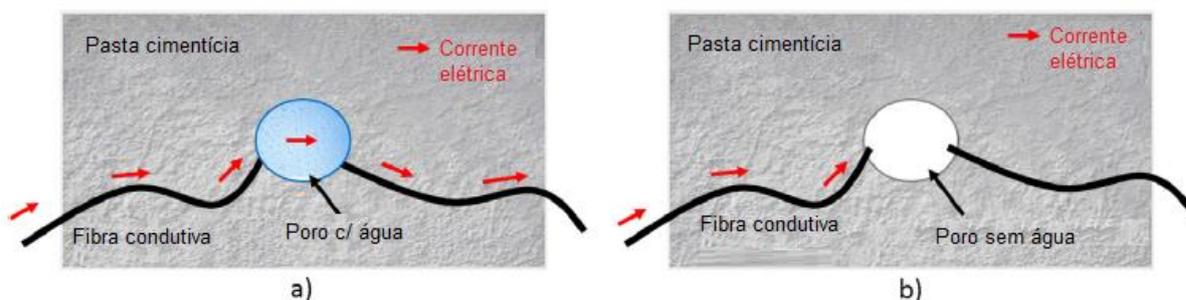


Fonte: Adaptado de Silva, Lintz e Gachet (2023)

Ainda na ilustração da Figura 11, pode ser observado que o efeito de Poisson também influencia na alteração das vias condutivas, contudo no sentido transversal ao da aplicação do esforço mecânico (Chung, 2002).

A via condutora também pode ser influenciada pela presença ou não de água encapsulada nos poros, a qual pode atuar como uma conexão entre as partículas condutoras (Figura 12) que não mantém contato direto (Yoo; You; Lee, 2017).

Figura 12 – Esquema ilustrativo de pasta de cimento com caminho condutivo (a); e sem caminho condutivo (b) em função do encapsulamento de água nos poros



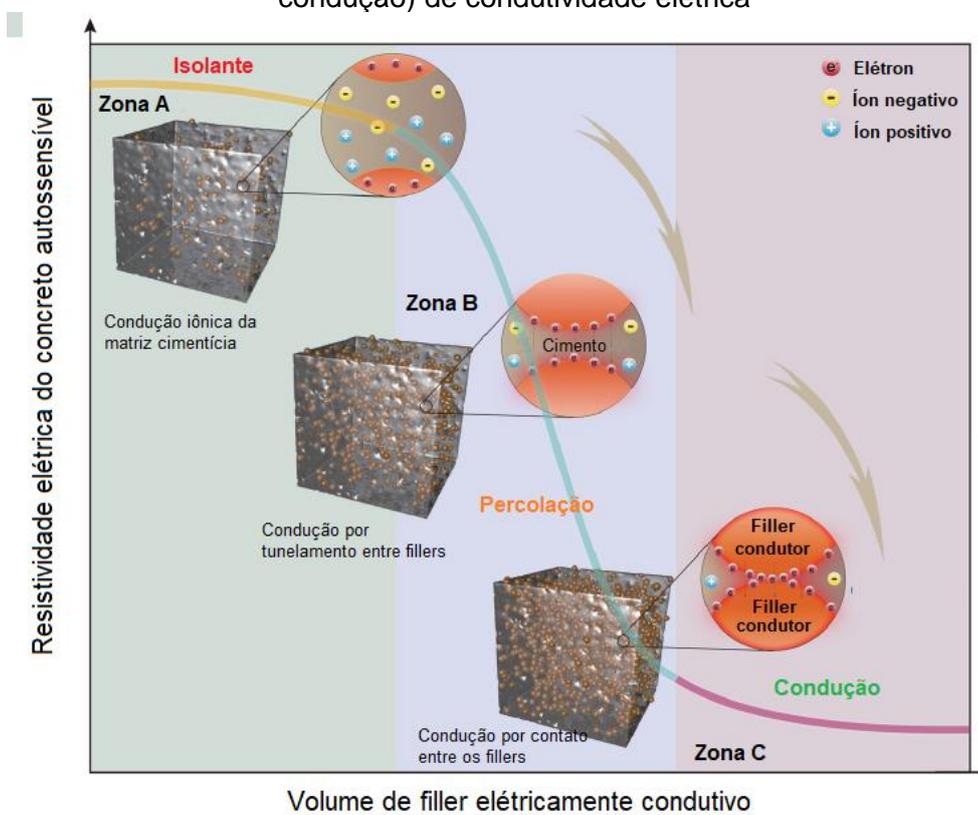
Fonte: Adaptado de Wang e Aslani (2019)

Os poros com água encapsulada permitem que íons hidratados se movam livremente na água, na forma de portadores de corrente elétrica. Esse mesmo mecanismo ocorre, por exemplo, em duas fibras de condutivas, que estejam envoltas por um filme de água (Chuang *et al.*, 2017).

Outras teorias, como limiar de percolação e efeito de tunelamento quântico estão consagradas na literatura para explicar a condutividade elétrica nos CCAs (Han *et al.*, 2020). O limiar de percolação da eletricidade pode ser definido como a condutividade elétrica que o compósito necessita para promover sua habilidade de

autossensibilidade. Em outras palavras, trata-se de uma zona abrupta de transição entre a fase isolante e a de aumento significativo da condutividade, ou seja, redução da resistividade elétrica, devido ao acréscimo da incorporação do material condutor. O limiar de percolação, denominado como Zona B na Figura 13, também se relaciona com o intervalo em que ocorre a mudança da rede condutora, quando o compósito é submetido a uma deformação, o que caracteriza sua resposta eletromecânica (Al-Dahawi *et al.*, 2016; Haghgo; Ansari; Hassanzadeh-Aghdam, 2022).

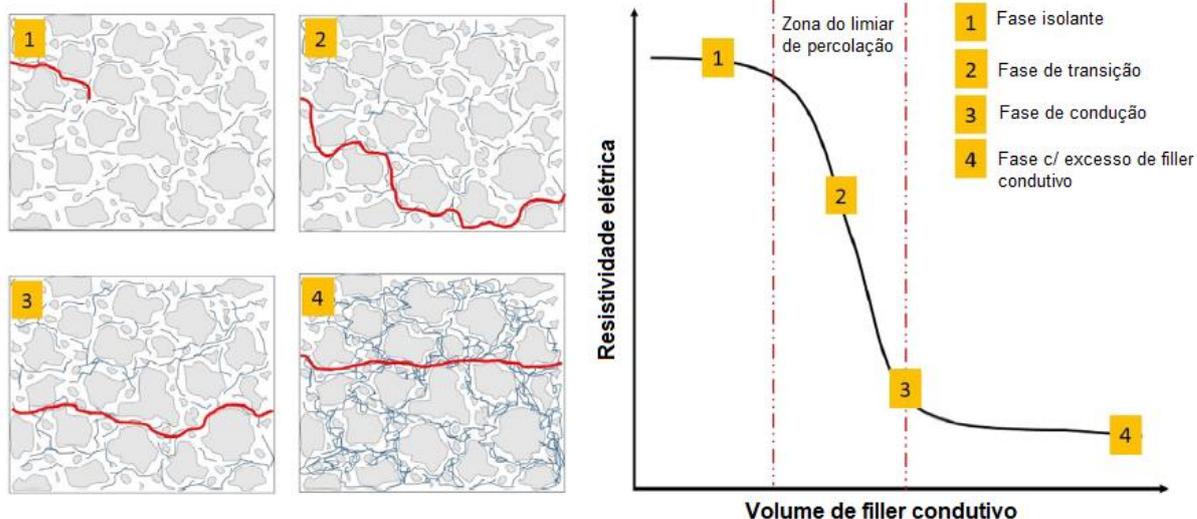
Figura 13 – Gráfico de redução da resistividade elétrica mediante adição de cargas condutoras na matriz cimentícia e suas diferentes zonas (isolante, percolação ou transição e condução) de condutividade elétrica



Fonte: Adaptado de Ding *et al.* (2019)

Embora o CCA tenha que apresentar mais condutividade elétrica que um compósito cimentício comum para ocorrência do efeito piezoresistivo, a condutividade do CCA também não pode ser muito alta a ponto de não ocorrer quase nenhuma resistência elétrica, o que compromete a ocorrência do efeito piezoresistivo, conforme destacado no ponto 4 da Figura 14 (Chung, 2020).

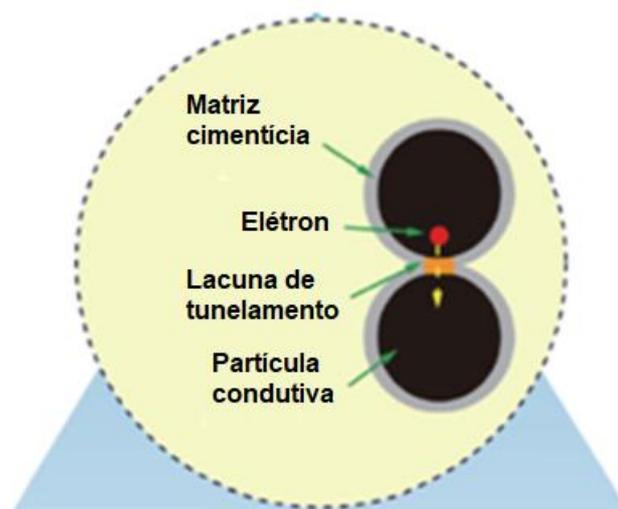
Figura 14 – Correlações visuais de caminhos condutivos (vermelho) e variação da taxa de adição de material condutivo no CCA



Fonte: Adaptado de Wang e Aslani (2019)

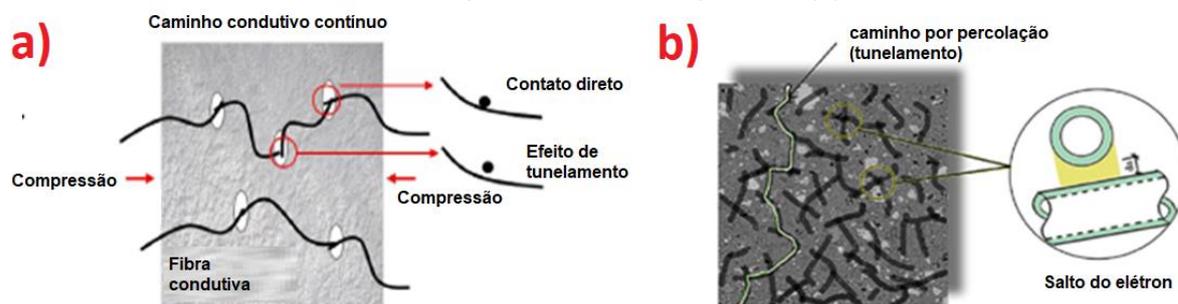
Por estarem distribuídos aleatoriamente na matriz, os materiais condutivos muitas vezes estão próximos entre si, mas não conectados. Se essa proximidade corresponder a algo demasiadamente pequeno, pode ocorrer o efeito do tunelamento quântico (Figuras 15 e 16) (Chuang *et al.*, 2017).

Figura 15 – Esquema de tunelamento quântico entre duas partículas condutoras sem contato direto



Fonte: Adaptado de Ding *et al.* (2019)

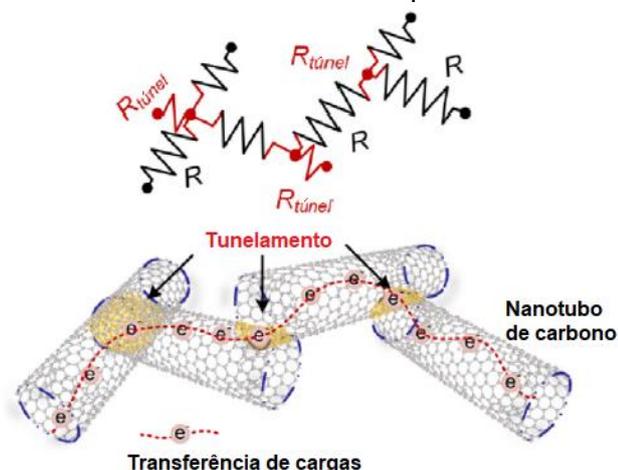
Figura 16 – Exemplos esquemáticos da condutividade elétrica por contato direto (a) entre as fibras e por tunelamento quântico (b)



Fonte: Adaptado de Wang e Aslani (2019) (a); Tian *et al.* (2019) (b)

O efeito do tunelamento possibilita que um elétron salte de uma partícula condutora até outra, sem que haja o contato direto entre ambas. Apesar de possibilitar a condutividade, no ponto do túnel há um aumento de resistividade elétrica, conforme exemplo da Figura 17 (García-Macías *et al.*, 2017; Irfan *et al.*, 2021), onde ocorre o salto do elétron (transferência de carga) entre um nanotubo de carbono e outro.

Figura 17 – Discretização das junções de uma matriz com materiais (nanotubo de carbono) condutivo e a resistência elétrica formada pelo tunelamento quântico



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

Esse efeito do tunelamento pode ocorrer com grande intensidade na zona de transição do limiar de percolação. Apesar de colaborar para a ocorrência do efeito piezorresistivo, no estágio do limiar de percolação, o tunelamento pode levar a ocorrência de ruídos indesejados nas medições dos sinais elétricos (Wang; Aslani, 2021a).

Contudo, ainda no que se diz respeito à condutividade elétrica de compósitos cimentícios, há de se considerar que os mesmos não têm comportamento puramente

ômico, especialmente por ter um comportamento similar ao de materiais dielétricos (D'Alessandro *et al.*, 2014; Downey *et al.*, 2018).

2.1.4 Técnicas de medição de resistência elétrica

Diversos métodos de medição de resistência elétrica podem ser utilizados para avaliação de CCAs. A resistência elétrica é muitas vezes medida a partir da Lei de Ohm, por meio de uma queda de tensão elétrica com uma alimentação por corrente constante, o que costuma necessitar de um conversor analógico-digital de alta precisão (Scholle; Sinapius, 2021; Carísio *et al.*, 2019).

A escolha do método de medição de resistividade elétrica a ser utilizado é um fator de grande influência nos resultados, pois o método pode ser capaz de afetar as propriedades de detecção do compósito (Han *et al.*, 2020; Dong *et al.*, 2019), por isso a relevância desta seção na presente pesquisa.

Os valores de variação de grandezas elétricas, tais como voltagem, resistência ou resistividade costumam ser comparados às deformações mecânicas, usualmente medidas por meio de extensômetros de resistência elétrica (Chung, 2020). A relação entre os valores de variação de resistência elétrica e de deformação, ou seja, o quociente, dividendo e divisor, correspondem aos valores da Equação 17, apresentada anteriormente.

Entretanto, não há unanimidade entre os pesquisadores em comparar a variação elétrica com deformação. Alguns pesquisadores comparam a variação elétrica com tensão mecânica, ou ainda com força mecânica aplicada sobre a estrutura ou corpo de prova, ou seja, sem o uso de extensômetros, para se avaliar o efeito piezorresistivo (Ferdiansyah; Turatsinze; Balayssac, 2018; Frac *et al.*, 2022; Kim *et al.*, 2021).

A alimentação dos circuitos elétricos de avaliação dos compósitos cimentícios costuma ser tanto em corrente contínua (CC) como em corrente alternada (CA), o que pode ocasionar diferentes resultados de piezorresistividade (Dong *et al.*, 2019; Han *et al.*, 2020).

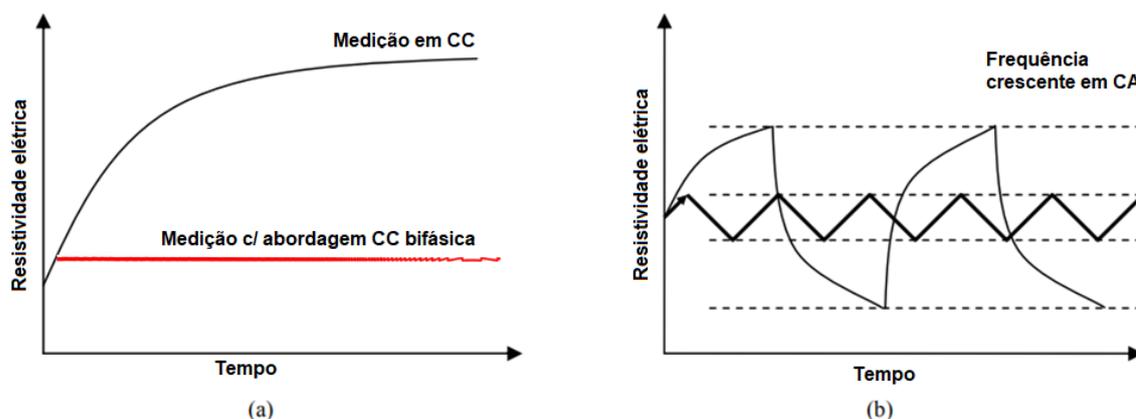
Em estudo realizado por Cosoli *et al.* (2020), foi observado que a maioria (65%) das publicações científicas consultadas pelos mesmos reportava o uso de alimentação em

CA nos procedimentos experimentais de avaliação de propriedades elétricas de compósitos cimentícios.

Outra possibilidade é a alimentação em CC bifásica, por meio de onda quadrada, o que possibilita a despolarização do material, mediante a reversão da corrente aplicada (Downey *et al.*, 2017a; Downey *et al.*, 2017b), o que favorece seu uso quando comparado ao sistema CC comum.

A Figura 18 ilustra a medição de resistividade no tempo, com a ocorrência do efeito de polarização, em função do método de alimentação (CC, CC bifásico e CA) do circuito de medição do CCA.

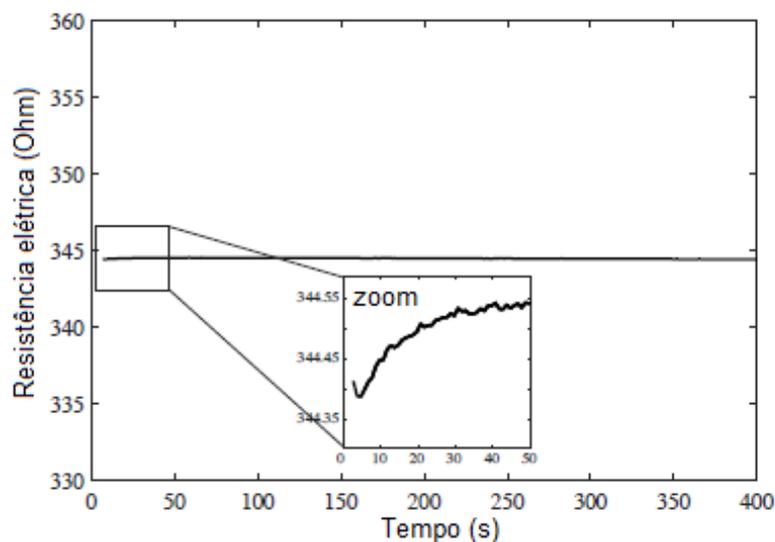
Figura 18 – Variação da resistividade elétrica causada pelo efeito da polarização em função da alimentação do circuito por correntes contínuas (a) e corrente alternada (b)



Fonte: Adaptado de Hou e Lynch (2005); Downey *et al.* (2017a)

A utilização do método de alimentação por CC é considerada mais simples e menos cara (Chuang *et al.*, 2017) que por CA. Contudo, tal método tem a desvantagem pela ocorrência do efeito de polarização, o que afeta negativamente a estabilidade inicial das leituras de resistência (Figura 19). Isso se dá em função das características dielétricas de alguns materiais, que estão associadas tanto a resistência quanto à capacitância, o que faz com que a resistência elétrica apresente valores que não são reais após algum tempo de medição (Chung; XI, 2022; Chung, 2021a; Chung, 2021b).

Figura 19 – Ampliação do efeito de capacitância na medição de resistência elétrica em circuitos com corrente contínua

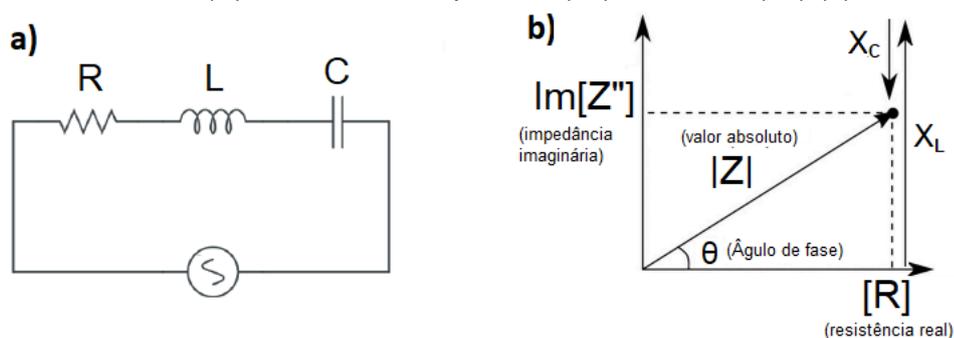


Fonte: Adaptado de Birgin *et al.* (2020)

O efeito da polarização ocorre devido à movimentação de íons livres presentes na matriz cimentícia, à medida que sofrem uma excitação elétrica. Esse efeito gera um campo elétrico na direção contrária do fluxo da corrente, fazendo com que a resistividade aumente por um determinado período (Dehghani; Aslani, 2021a).

Pelo método de alimentação com CA em um circuito como o da Figura 20a, o resultado obtido na medição é a impedância elétrica ($|Z|$) (Figura 20b) e não a resistência (R), por considerar a existência da reatância, ou seja, elementos indutores (L) e/ou capacitores (C) envolvidos no circuito. Com isto, a impedância é uma forma de oposição à passagem da corrente. Isto ocorre pois a tensão e a corrente não atingem um pico simultaneamente, o que gera um ângulo de fase (θ), correspondente à defasagem entre ambas grandezas (Sarwary *et al.*, 2019; Xu *et al.*, 2022).

Figura 20 – Circuito em série com elementos R , L , e C com alimentação em CA (a); Relações geométricas entre impedância elétrica ($|Z|$), impedância imaginária (Z''), resistência elétrica (R) e reatâncias capacitiva (X_C) e indutiva (X_L) (b)



Fonte: Adaptado de Chinaglia *et al.* (2008); Duru e Ileri (2021); Gerasimenko *et al.* (2020)

Conforme Figura 20b, a partir da impedância elétrica ($|Z|$) e do ângulo de fase (θ) pode ser obtida a resistência elétrica (R) e a impedância imaginária (Z''). Tais grandezas são determinadas por meio das Equações 18 (Al-Dahawi *et al.*, 2016; Çelik *et al.*, 2021) e 19 (Lazanas; Prodromidis, 2023).

$$R = |Z| \cos(\theta) \quad (18)$$

$$Z'' = |Z| \sin(\theta) \quad (19)$$

Assim, em um circuito como o da Figura 20a, a impedância elétrica depende das variáveis da Equação 20 (Wardani *et al.*, 2021), sendo elas a reatância capacitiva (X_C) e a reatância indutiva (X_L), além da própria resistência elétrica.

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (20)$$

As reatâncias capacitiva e indutiva são obtidas por meio das Equações 21 e 20 (Wardani *et al.*, 2021), onde tem-se as variáveis de capacitância (C), a indutância (L) e frequência (f).

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \quad (21)$$

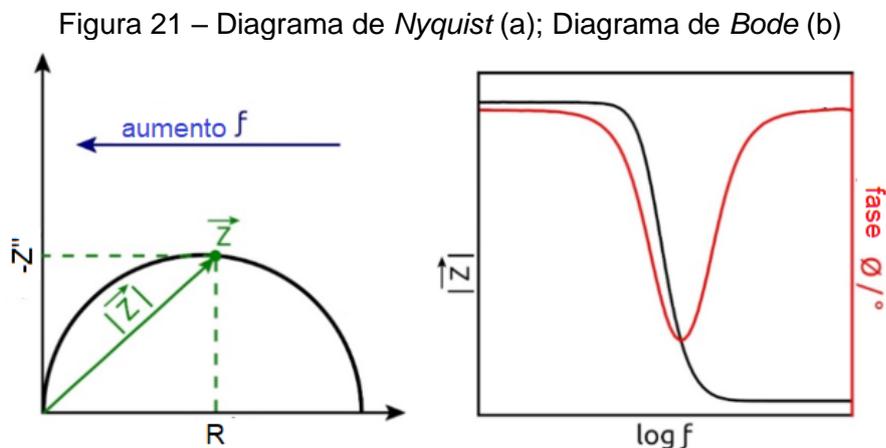
$$X_L = 2\pi f L \quad (22)$$

Com isto, o ângulo de fase (θ) pode ser obtido por meio das variáveis da Equação 20, conforme Equação 23 (Duru; Ileri, 2021).

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{X_L - X_C}{R} \right) \quad (23)$$

A análise desses parâmetros elétricos (Equações 18 a 23) pode colaborar com o estudo de materiais cimentícios, no que se refere à sua porosidade, hidratação, corrosão, permeabilidade (Ramachandran *et al.*, 2022) e condutividade elétrica. Os

valores de impedância (Z), Resistência (R), ângulo de fase (θ) e frequência da corrente alternada (f) costumam ser analisados por meio dos diagramas de *Nyquist* e *Bode* apresentados na Figura 21.

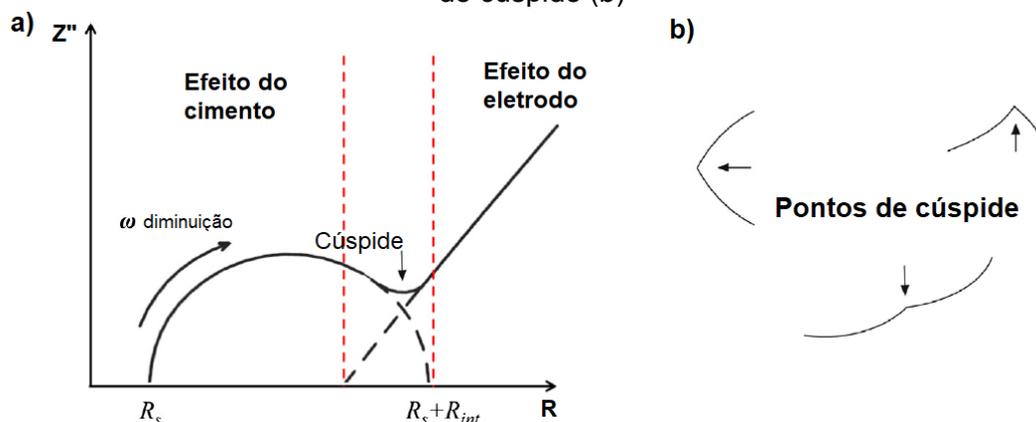


Fonte: Adaptado de Zhuo (2021).

Tais diagramas (Figura 21), podem ter diversas formas, os quais costumam estar associados a circuitos equivalentes, que podem ser em série, paralelo ou mistos, bem como podem conter elementos como resistores, capacitores e indutores (Aguedo *et al.*, 2020; Nnamchi; Obayi, 2018).

De acordo com Zhu *et al.* (2017), o diagrama de *Nyquist* para uma pasta de cimento se assemelha ao da Figura 22a, onde tem-se a resistência elétrica do sólido e líquido (R_s) e a resistência elétrica de interface (R_{int}), esta última por conta do eletrodo. Determinados pontos de deflexão no diagrama de *Nyquist*, como por exemplo, o ponto de junção do arco com a reta da Figura 22a, são denominados pontos de cúspide (Kim; Suryanto; McCarter, 2019), os quais podem ter diversas formas (Figura 22b).

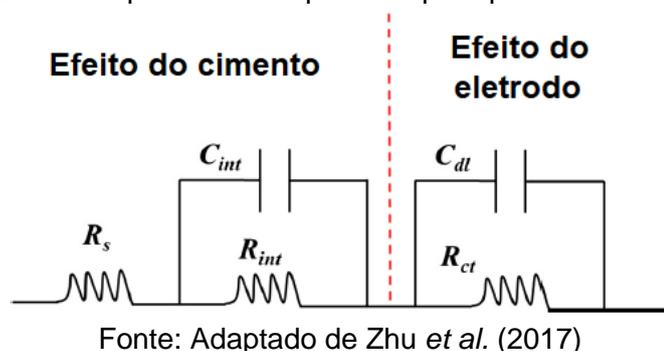
Figura 22 – Diagrama de *Nyquist* para pasta cimentícia (a) e exemplos de formas de ponto de cúspide (b)



Fonte: Adaptado de Zhu *et al.* (2017); Bavafa-Toosi (2019)

Quanto ao circuito equivalente de uma pasta cimentícia hidratada, este possui as referidas resistências (R_s e R_{int}), bem como uma resistência de transferência de carga (R_{ct}), as capacitâncias referentes a interface sólido-líquido (C_{int}) e do sistema eletrodos, também denominado dupla camada (C_{dl}), conforme Figura 23.

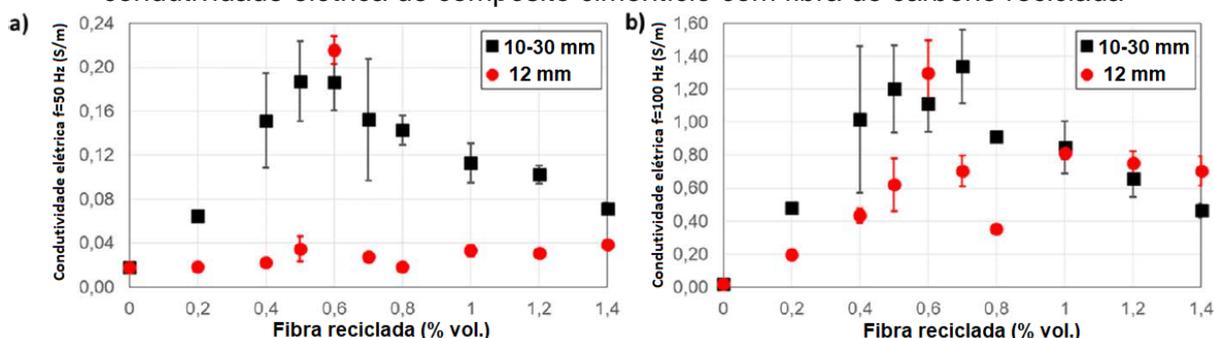
Figura 23 – Circuito equivalente simplificado para pasta de cimento hidratada



Os modelos de circuitos equivalentes tendem a serem usados no processo de interpretação da resposta elétrica dos compósitos cimentícios. Contudo, devido a não padronização dos ensaios (e.g. configuração dos eletrodos; geometria dos corpos de prova; amplitude de tensão e frequências), não há um consenso entre os pesquisadores em relação aos modelos de circuitos equivalentes para compósitos cimentícios (Tang *et al.*, 2017).

Em compósitos cimentícios a determinação da condutividade elétrica por meio de circuitos alimentados com CA pode ser afetada em decorrência do efeito da capacitância elétrica (Segura *et al.*, 2019). Com o aumento da frequência da corrente elétrica, a condutividade dos compósitos pode ser influenciada pela reatância conforme demonstrado na Figura 24.

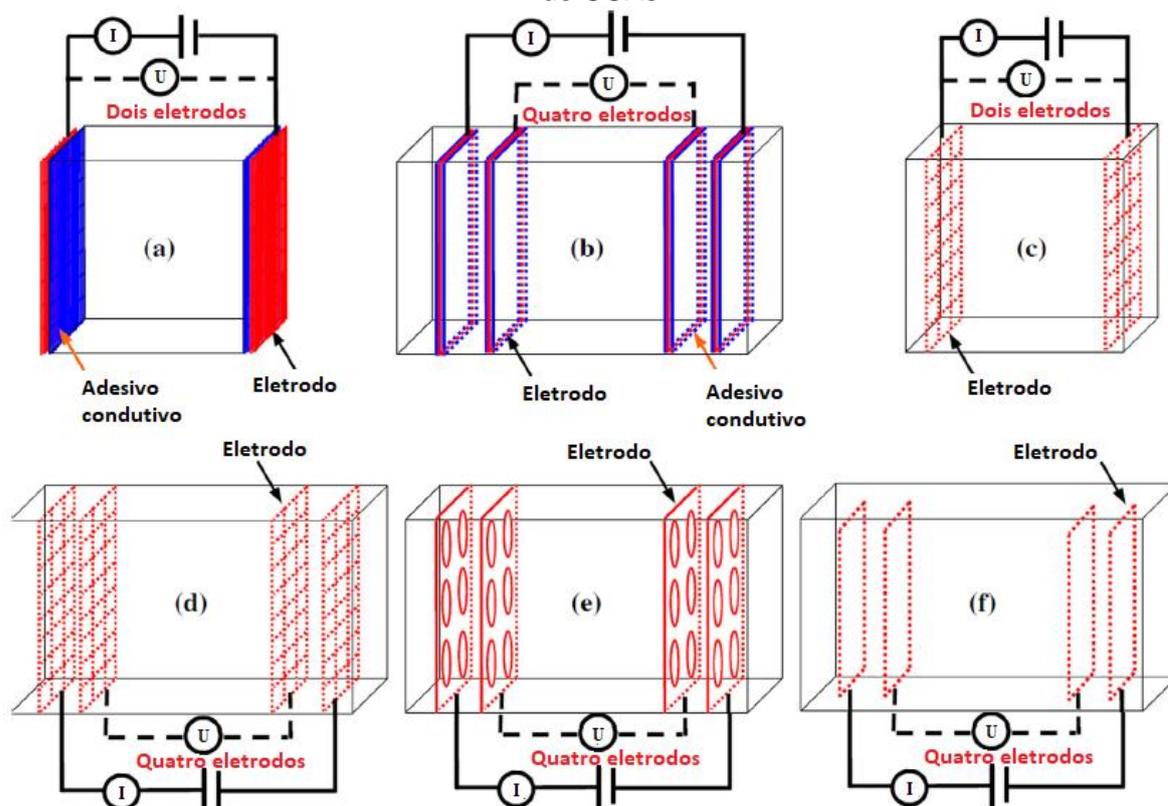
Figura 24 – Influência da variação da frequência entre 50 Hz (a) e 100 kHz (b) na condutividade elétrica de compósito cimentício com fibra de carbono reciclada



Fonte: Adaptado de Segura *et al.* (2019)

Além do método de alimentação da corrente do circuito, podem variar questões relacionadas à quantidade e ao tipo de eletrodos, ou sondas, em contato ou embutidos na estrutura ou no corpo de prova, conforme ilustra a Figura 25. No método com 4 eletrodos, 2 são utilizados exclusivamente para passagem da corrente (externos) e outros dois (internos) somente para medição da tensão elétrica. No caso do método com apenas 2 eletros, ambos são utilizados para passagem da corrente e medição da tensão (Chung, 2021b; Madbouly; Mokhtar; Morsy, 2020).

Figura 25 – Esquema de ligação, disposição e tipos de eletrodos junto aos corpos de prova de CCAs

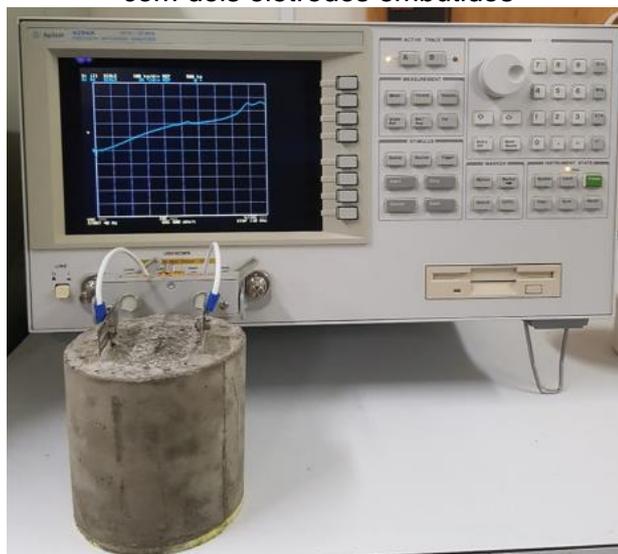


Fonte: Adaptado de Wang e Aslani (2019)

A utilização de eletrodos externos, ou seja, superficiais ao corpo de prova (Figura 25a) também é uma das opções encontradas na literatura, tanto para análise de condutividade elétrica, quanto de piezorresistividade (Abedi; Fangueiro; Correia, 2022; Carísio *et al.*, 2021; Fraç; Pichór, 2020; Lavagna *et al.*, 2018).

No caso do uso de equipamentos do tipo analisador de impedância, costumam ser utilizados dois eletrodos junto ao compósito cimentício (Allam *et al.*, 2020), podendo os mesmos serem superficiais ou embutidos (Figura 26).

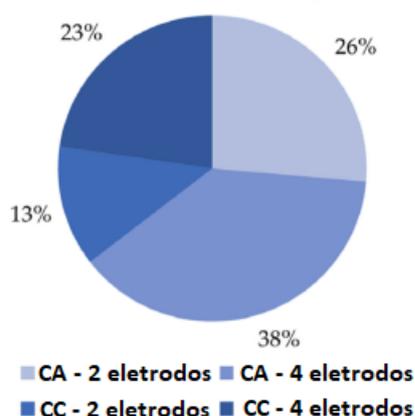
Figura 26 – Uso de analisador de impedância em corpo de prova de compósito cimentício com dois eletrodos embutidos



Fonte: Adaptado de Cassol *et al.* (2022)

Em levantamento realizado por Cosoli *et al.* (2020), foi verificado que o uso de 2 ou 4 eletrodos se dá independentemente do método de alimentação do circuito de análise do CCA, conforme percentuais constantes do gráfico da Figura 27.

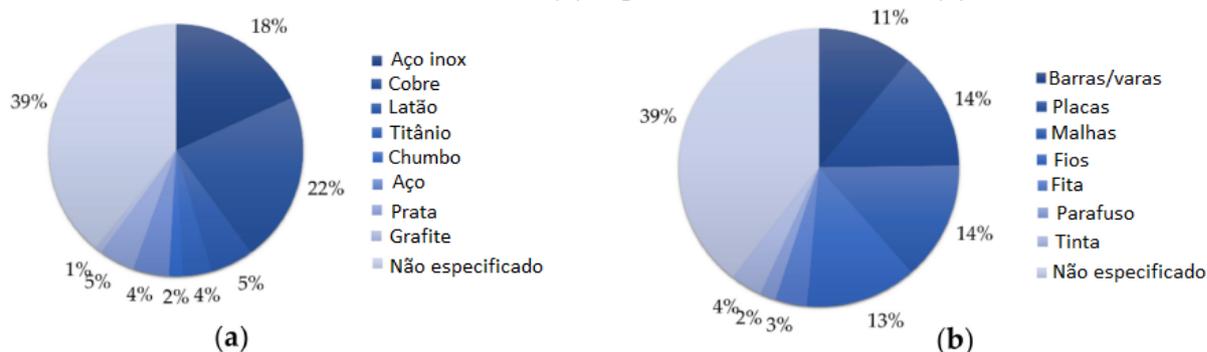
Figura 27 – Percentagens de pesquisas realizadas com diferentes tipos corrente elétrica (CC e CA) e quantidade de eletrodos empregados no sistema de medição



Fonte: Adaptado de Cosoli *et al.* (2020)

Ainda na Figura 25 é possível observar os diferentes tipos de eletrodos e suas formas de disposição, independentemente de sua quantidade. Nesse sentido, Cosoli *et al.* (2020) também efetuaram levantamento, tendo sido encontrado o uso de diversos materiais e com variadas geometrias de aplicação, conforme Figura 28.

Figura 28 – Comparativo de porcentagens de pesquisas realizadas com diferentes tipos de materiais de eletrodos (a) e geometria dos mesmos (b)



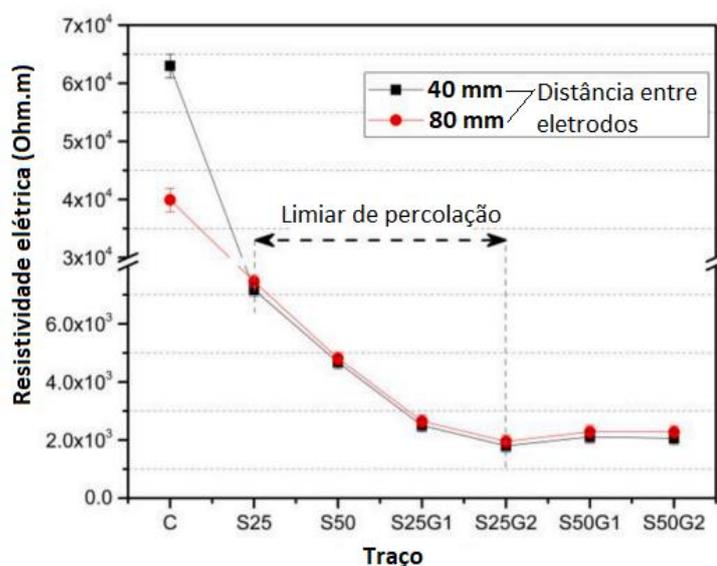
Obs.: Cores na sequência da mais clara à mais escura, nos gráficos e nas respectivas legendas.

Fonte: Adaptado de Cosoli *et al.* (2020)

Quanto ao tipo do eletrodo, os embutidos têm a desvantagem de gerar um ponto mais frágil na região onde são colocados na estrutura, o que não corre com os eletrodos instalados superficialmente (Han *et al.*, 2020).

Outra influência provocada pelos eletrodos é a distância entre os mesmos, no que se refere à determinação da resistividade elétrica (Figura 29), ainda que tal distância seja levada em consideração na Equação 2. Um estudo conduzido por Xi e Chung (2020) mostrou a influência da distância entre os eletrodos na avaliação de propriedades elétricas de compósito cimentício.

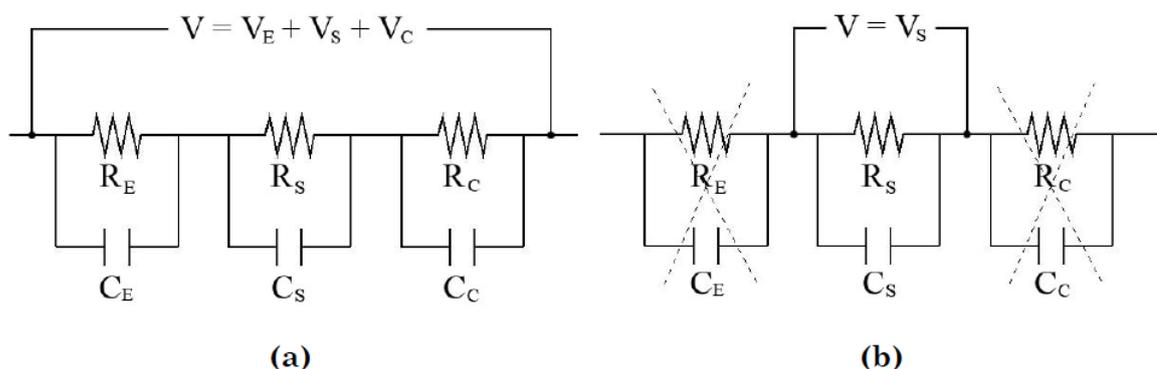
Figura 29 – Influência da distância entre eletrodos na determinação da resistividade elétrica de compósito cimentício



Fonte: Adaptado de Abebe *et al.* (2024)

O método com apenas 2 eletrodos é evidentemente mais simples de ser utilizado do que o método com 4 eletrodos (Han; Ding; Yu, 2015; Han *et al.*, 2020). Contudo, é no método com 4 eletrodos que se torna possível eliminar a resistência de contato entre o eletrodo e a superfície do compósito. Isso pode ser visualizado nos circuitos equivalentes da Figura 30 (Chung, 2021b).

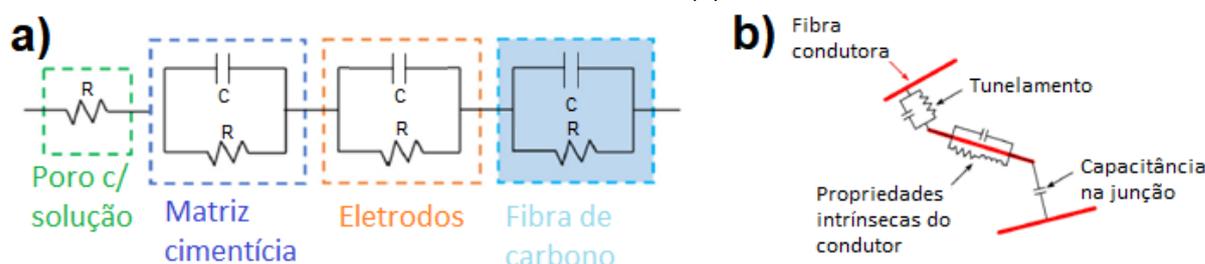
Figura 30 – Circuitos equivalentes para (a) dois eletrodos e (b) quatro eletrodos. V_E , R_E e C_E : tensão, resistência e capacitância dos eletrodos; V_S , R_S e C_S : tensão, resistência e capacitância do sensor; V_C , R_C e C_C : tensão, resistência e capacitância do contato



Fonte: Adaptado de Azhari (2009)

Além das resistências formadas entre o eletrodo e o CCA e do tunelamento quântico, também devem ser consideradas as resistências da solução presente nos poros, da matriz cimentícia e da intrínseca do filler condutivo, bem como as respectivas capacitâncias, conforme Figura 31 (Wang *et al.*, 2021b).

Figura 31 – Circuito equivalente das resistências (R) e capacitâncias (C) formadas pela solução presente no poro, pela matriz cimentícia, pelos eletros e pelo filler (a); Circuito equivalente das resistências e capacitâncias formadas pelo tunelamento quântico e pelo filler condutivo (b)

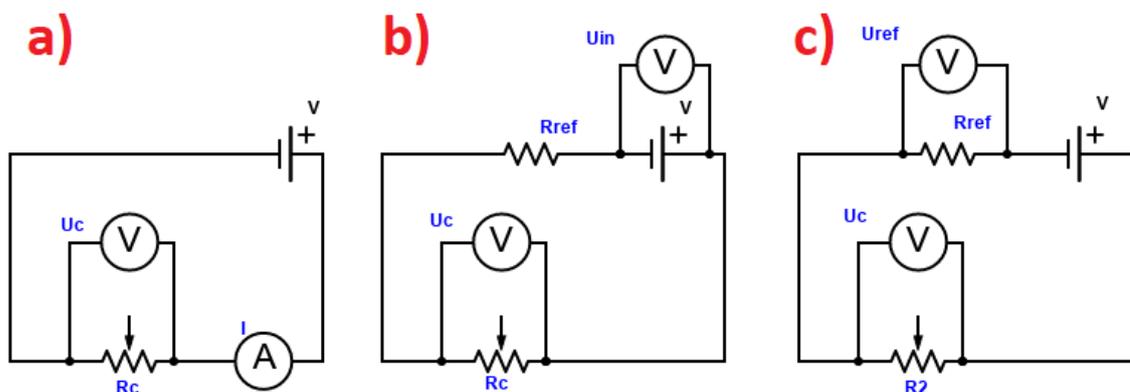


Fonte: Adaptado de Qiu *et al.* (2021) (a); Koo e Tallman (2021) (b)

Para medição da resistência elétrica dos compósitos cimentícios (R_C), diversos circuitos elétricos podem ser utilizados, como por exemplo, a partir da utilização dos circuitos da Figura 32, sendo estes baseados no princípio divisor de tensão (Scholle; Sinapius, 2021; Monteiro *et al.*, 2017). A partir dos valores de tensão elétrica medida nos eletrodos do compósito (U_C); corrente elétrica medida no circuito (I); valor do

resistor de referência (R_{ref}); de tensão elétrica medida no resistor de referência (U_{ref}); e da de tensão elétrica de alimentação (U_{in}) é possível obter a resistência elétrica do compósito cimentício (R_C).

Figura 32 – Modelos de circuitos elétricos aplicados à medição de resistência elétrica



Fonte: Elaborado a partir de Tao *et al.* (2019); Konkanov *et al.* (2020); Demircilioglu, Teomete e Ozbulut (2020); Dong *et al.*, (2021a); Nalon *et al.* (2020); Monteiro *et al.* (2017); e de Jang *et al.* (2020)

O circuito da Figura 32a é o mais próximo do circuito preconizado na ABNT NBR 9204 (2011), referente à determinação da resistividade elétrica-volumétrica em concretos comuns no estado endurecido. Porém, esse circuito implica na medição de valores de corrente elétrica (I) muito baixos, o que não é possível de ser medido com simples multímetros.

Para obtenção da resistência elétrica de cada um dos circuitos apresentados na Figura 32, são utilizadas as Equações 24 (adaptado de Madbouly; Mokhtar; Morsy, 2020; Konkanov *et al.*, 2020), 25 (adaptado de Monteiro *et al.*, 2017) e 26 (adaptado de Nalon *et al.*, 2020), respectivamente para os circuitos das Figuras 32a, 32b e 32c.

$$R_C = \frac{U_C}{I} \quad (24)$$

$$R_C = R_{ref} \frac{U_C}{U_{in} - U_C} \quad (25)$$

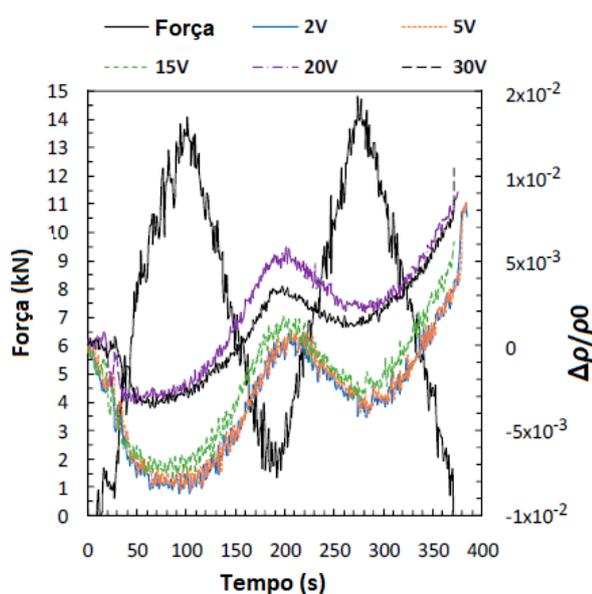
$$R_C = \frac{U_C}{U_{ref}} R_{ref} \quad (26)$$

Entretanto, além do circuito divisor de tensão, também podem ser utilizados circuitos baseados na ponte de Wheatstone para avaliação da autossensibilidade em compósitos cimentícios (Scholle; Sinapius, 2021; Ferdiansyah; Balayssac; Turatsinze, 2022).

Embora esses métodos baseados na medição direta de variação de tensão elétrica para determinação da resistência, sejam muito usados na análise de condutividade elétrica e piezorresistividade de CCAs, pesquisadores também utilizam o sistema de medição direta de resistência elétrica por meio do uso de ohmímetros ou equipamentos equivalentes, conforme relatado na literatura (Chuang *et al.*, 2017; Norambuena-Contreras *et al.*, 2018; Al-Mufadi; Sherif, 2019; Gawel; Szewczyk; Cerasi, 2021).

Os níveis de tensão elétrica utilizados para alimentação de um circuito de medição de resistência elétrica também afetam os resultados das medições em compósitos cimentícios (Suchorzewski; Prieto; Mueller, 2020; Dong *et al.*, 2019), conforme ilustra o exemplo da Figura 33.

Figura 33 – Variações na resposta piezorresistiva em função dos diferentes níveis de tensões elétricas aplicadas no compósito cimentício



Fonte: Adaptado de Cruz e Javier (2020)

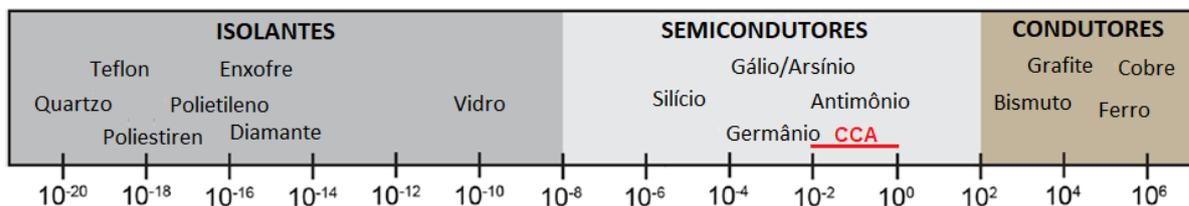
Além da influência das diferentes técnicas de medição apresentadas na presente seção, a produção do CCA também pode afetar seu desempenho, o que será apresentado na seção seguinte.

2.1.5 Produção de CCAs

Os compósitos de matriz cimentícia não são bons condutores de eletricidade e a melhora na condutividade é obtida mediante a incorporação de materiais eletricamente condutores em sua matriz, para que então possam ser formadas as redes condutoras de eletricidade em sua estrutura (Papanikolaou *et al.*, 2020; Lee; Kim; Yoo, 2018).

A incorporação de materiais condutores faz com que a condutividade elétrica do CCA atinja níveis da ordem de 1 a 1×10^{-2} S/cm, o que corresponde a uma resistividade elétrica de 1 a 100 Ω cm, permitindo assim sua classificação como semicondutor (You *et al.*, 2017; Ramachandran *et al.*, 2022), conforme ilustração da Figura 34.

Figura 34 – Escala de condutividade elétrica (S/cm) com inclusão do CCA

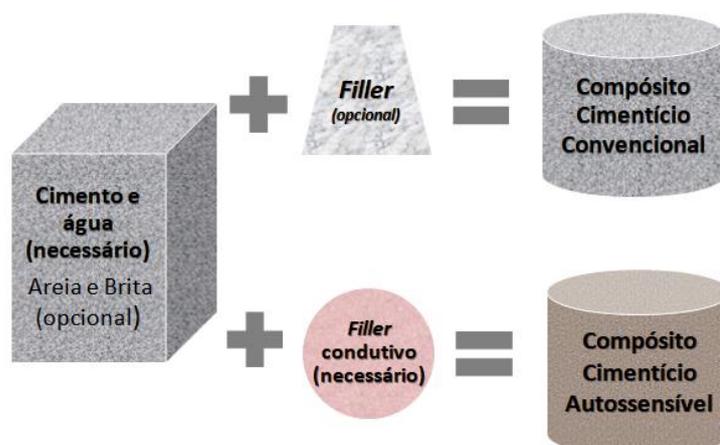


Fonte: Adaptado de Solazzo *et al.* (2019)

Embora o CCA baseado no efeito piezorresistivo necessite de materiais eletricamente condutores, as técnicas de dosagem dos materiais constituintes do CCA são as mesmas dos concretos e argamassas convencionais (Figura 35) e sua composição basicamente é constituída pela matriz cimentícia, pelo material condutivo e por dispersante quando for o caso. Contudo, essa dosagem tem de ser feita de forma a se obter os resultados esperados tanto para os aspectos convencionais do compósito, quando para sua autossensibilidade (Han; Yu; Ou, 2014; Han; Ding; Yu, 2015).

Porém, é quase que inevitável que as propriedades reológicas e mecânicas não sejam afetadas com a incorporação de materiais condutores (Wang; Aslani, 2019), fazendo com que a avaliação dessas propriedades também seja de grande importância no estudo e desenvolvimento de CCAs.

Figura 35 – Arranjo dos constituintes de compósitos cimentícios convencional e autossensível

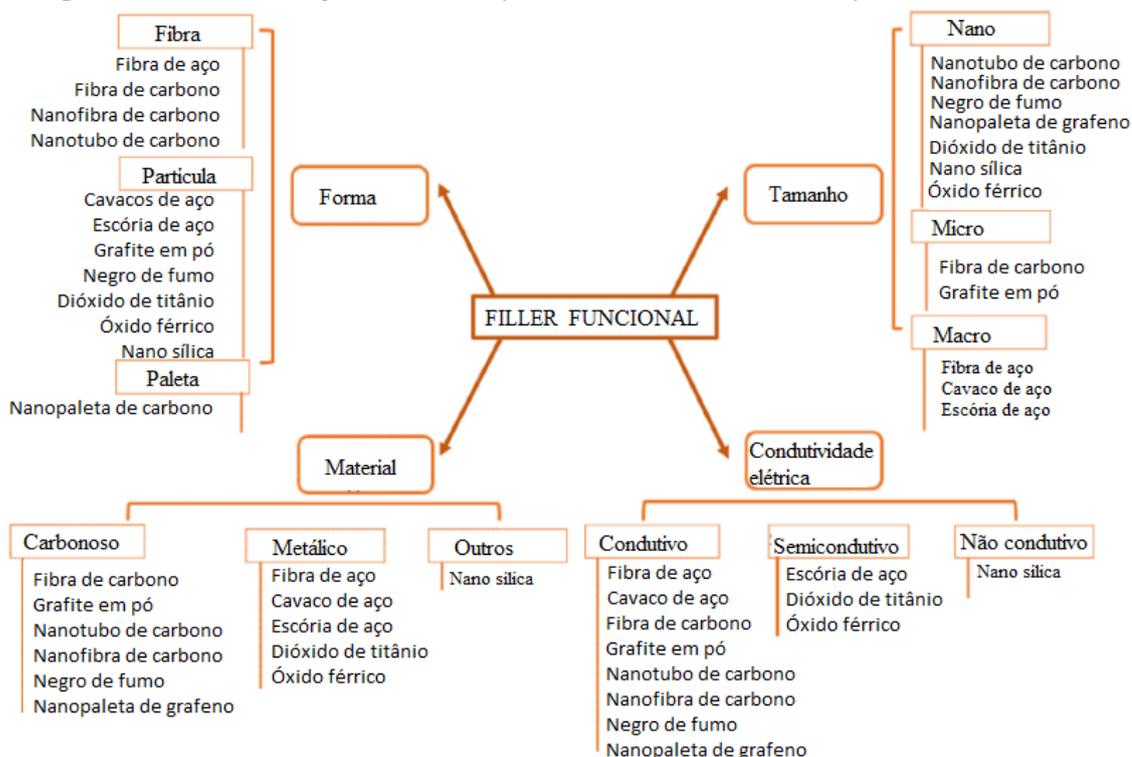


Fonte: Elaborado a partir de Reddy, Kavyateja e Jindal (2021)

Ainda que se busque evitar perdas de propriedades convencionais do compósito quando se aumenta sua condutividade elétrica, sua trabalhabilidade costuma ser reduzida, devido à incorporação de fillers condutivos, geralmente em razão da grande superfície específica dos mesmos (Han; Yu; Ou, 2014; Han; Ding; Yu, 2015; Chung, 2020).

Vários tipos de fillers como os elencados na Figura 36 podem ser usados para melhora do efeito piezorresistivo no compósito cimentício (Wang; Aslani, 2021a). As características dos fillers, como tipo de seu material (magnitude de condutividade elétrica), morfologia (tamanho e forma), estado de sua superfície e intensidade de aderência, influenciam diretamente na resposta da autossensibilidade do compósito (Han; Ding; Yu, 2015). Exemplos de fillers funcionais são apresentados na Figura 36 e classificados quanto algumas de suas propriedades que influenciam na condutividade elétrica do CCA.

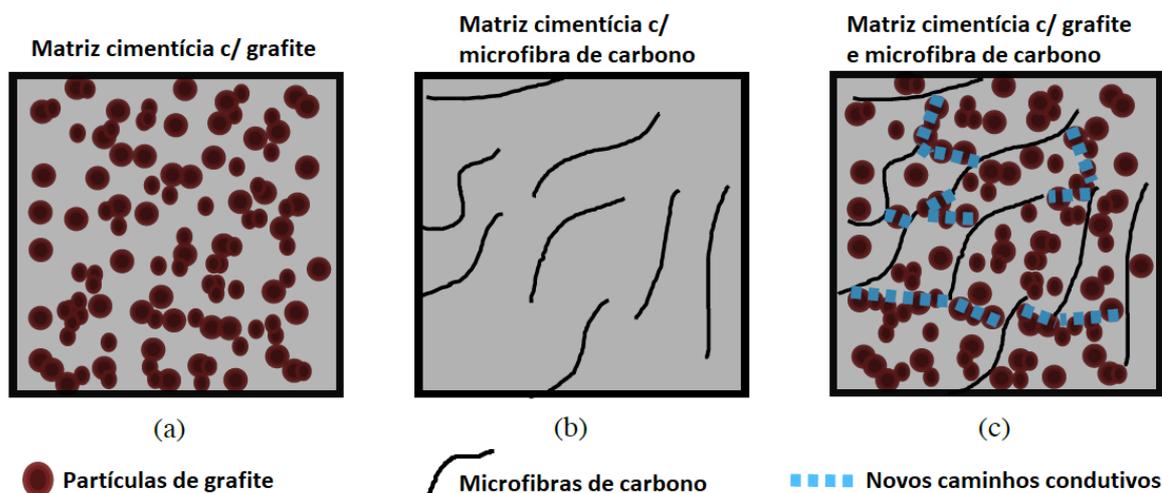
Figura 36 – Classificação de fillers quanto à forma, tamanho, tipo e condutividade



Fonte: Adaptado de Wang e Aslani (2019)

Apesar de não contemplado na Figura 36, existe a possibilidade de combinação de diferentes tipos fillers na composição do CCA, o que pode se dar em diferentes proporções entre si, não só para melhora da condutividade (Figura 37), mas como para melhora da autossensibilidade (Han *et al.*, 2020; Han; Ding; Yu, 2015).

Figura 37 – Utilização de partículas de grafite e microfibras de carbono em separado (a e b) e em conjunto (c) para potencialização do aumento da condutividade elétrica em CCA



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

Das pesquisas referenciais do presente estudo, foram selecionadas aquelas que versam especificamente sobre CCA baseados em piezorresistividade e que apresentavam informações suficientes para classificação segundo critérios apresentados na Figura 36. Tais informações são apresentadas de forma sintetizada na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetro de classificação de fillers empregados em CCA

Tipo	Combinação de fillers*	Forma	Tipo do Material	Tamanho	Capacidade condutiva	Referência
Concreto	Não	Fibra	Carbonoso	Micro	Condutivo	Donnini, Bellezze e Corinaldesi (2018)
Concreto	Sim	Fibra	Carbonoso	Nano e Micro	Condutivo	Rovnanik <i>et al.</i> (2019)
Argamassa	Sim	Fibra	Carbonoso e Metálico	Micro	Condutivo	Nalon <i>et al.</i> (2020)
Concreto	Sim	Fibra e Partícula	Carbonoso e Outros	Micro e Nano	Semicondutor. e pouco cond.	Tao <i>et al.</i> (2020)
Argamassa	Sim	Fibra e Partícula	Carbonoso e Outros	Micro	Condutivo e semicondutor.	Dehghani e Aslani (2021b)
Pasta	Sim	Plaqueta e Partícula	Carbonoso e Outros	Nano	Condutivo e pouco cond.	Le e Kim (2020)
Pasta	Sim	Partícula	Carbonoso	Nano	Condutivo	Kim, Park e Kim (2020)
Pasta	Sim	Plaqueta	Carbonoso	Nano e Micro	Condutivo	Dong <i>et al.</i> (2021d)
Argamassa	Não	Fibra	Carbonoso	Micro	Condutivo	Wang e Aslani (2021a)
Concreto	Não	Fibra	Carbonoso	Nano	Condutivo	Deng <i>et al.</i> (2019)
Pasta	Sim	Fibra	Carbonoso e Metálico	Nano e Macro	Condutivo	Konkanov <i>et al.</i> (2020)
Concreto	Sim	Fibra	Carbonoso e Metálico	Nano e Macro	Condutivo	Cholker e Tantray (2019)
Argamassa	Sim	Fibra	Metálico e Outros	Macro e Micro	Condutivo e pouco cond.	Suchorzewski, Prieto e Mueller (2020)
Argamassa	Sim	Fibra e Partícula	Metálico e Outros	Macro e Micro	Semicondutor. e pouco cond.	Parvaneh e Khabani (2018)
Argamassa	Sim	Fibra	Metálico	Macro	Condutivo	Cruz e Javier (2020)
Concreto	Sim	Fibra e Partícula	Carbonoso, Metálico e Outros	Nano e Micro	Condutivo e pouco cond.	Jung <i>et al.</i> (2020)
Concreto	Sim	Fibra e Partícula	Metálico e Outros	Macro e Micro	Condutivo e pouco cond.	Demircilioglu, Teomete e Ozbulut (2020)
Pasta	Não	Plaqueta	Carbonoso	Nano	Condutivo	Lee, Kim e Yoo (2018)
Argamassa	Não	Partícula	Carbonoso	Nano	Condutivo	Lee, Le e Kim (2019)
Concreto	Não	Fibra	Carbonoso	Nano	Condutivo	Dong <i>et al.</i> (2021b)
Argamassa	Não	Partícula	Carbonoso	Micro	Condutivo	Xu <i>et al.</i> (2021)
Argamassa	Não	Plaqueta	Carbonoso	Nano	Condutivo	Madbouly, Mokhtar e Morsy (2020)
Pasta	Sim	Plaqueta e Fibra	Carbonoso	Nano	Condutivo	Jang <i>et al.</i> (2020)
Argamassa	Sim	Fibra e Partícula	Carbonoso	Nano e Micro	Condutivo e pouco cond.	Wang e Aslani (2021b)
Argamassa	Sim	Fibra e Partícula	Carbonoso	Micro	Condutivo e pouco cond.	Dong <i>et al.</i> (2020b)

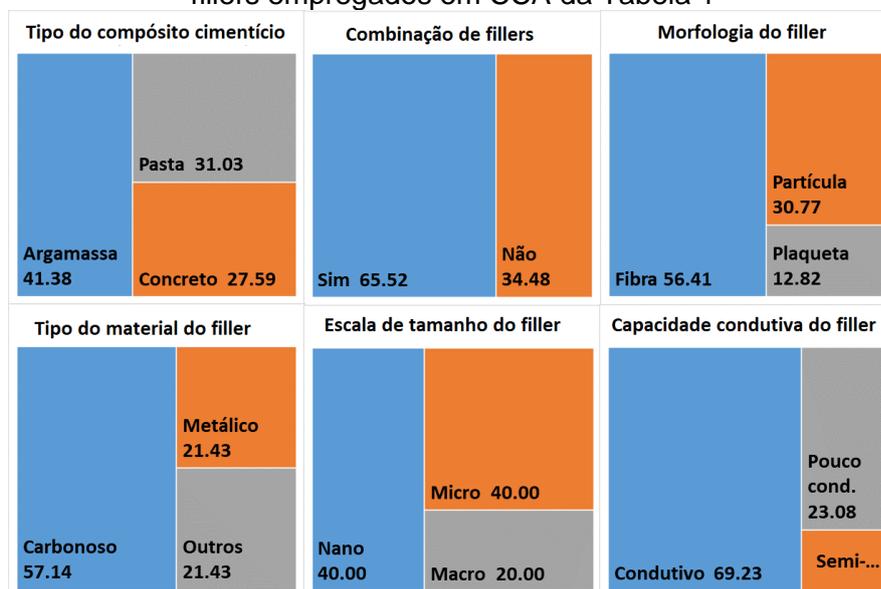
Tipo	Combinação de fillers*	Forma	Tipo do Material	Tamanho	Capacidade condutiva	Referência
Pasta	Sim	Fibra e Partícula	Carbonoso e Outros	Nano e Micro	Condutivo e pouco cond.	Wang e Aslani (2021c)
Pasta	Não	Fibra	Carbonoso	Micro	Condutivo	Tao, Wang e Zeng (2019)
Argamassa	Sim	Fibra e Partícula	Carbonoso	Nano e Macro	Condutivo	Yoo, Kim e Lee (2018)

*A expressão “Combinação” foi utilizada para se referir à utilização (ou não) de mais de um filler funcional a propriedades elétricas no estudo referenciado.

Fonte: Próprio autor

As informações da Tabela 1 que foram analisadas sob o aspecto quantitativo e a incidência de cada uma das variáveis de suas colunas são apresentadas na forma de porcentagem no gráfico da Figura 38. A referida análise mostrou que para a amostra estudada, a maior parte das pesquisas utiliza análise dos compósitos autossensíveis por meio da produção de argamassas, com mais de um filler funcional aplicado a propriedades elétricas, sendo que tais fillers são em sua maioria fibrosos, com dimensões nas escalas micro e nano, os quais são de origem carbonosa, o que os torna eletricamente condutivos.

Figura 38 – Gráfico com porcentagens de incidências dos parâmetros de classificação de fillers empregados em CCA da Tabela 1

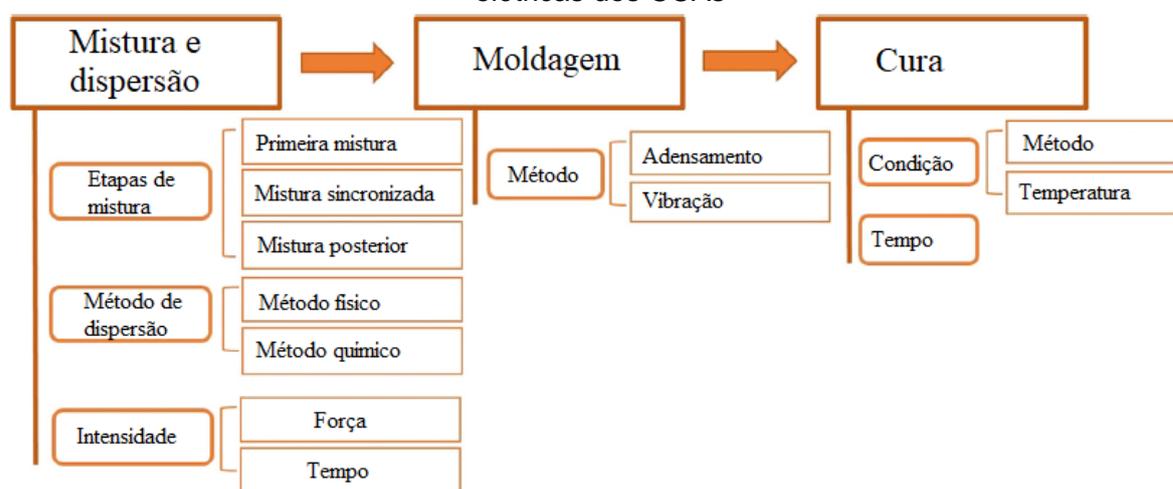


Fonte: Próprio autor.

Entretanto, não são apenas os fillers que influenciam nas propriedades elétricas do CCA, mas também seu processo de produção, que não difere dos compósitos cimentícios convencionais, ou seja, passando pelas etapas de mistura, moldagem e cura (Han; Ding; Yu, 2015; Dong *et al.*, 2019). A Figura 39 apresenta o fluxo de

produção, bem como cada um dos principais fatores que podem influenciar nas propriedades elétricas do CCA.

Figura 39 – Detalhamento das etapas de produção que influenciam nas propriedades elétricas dos CCAs

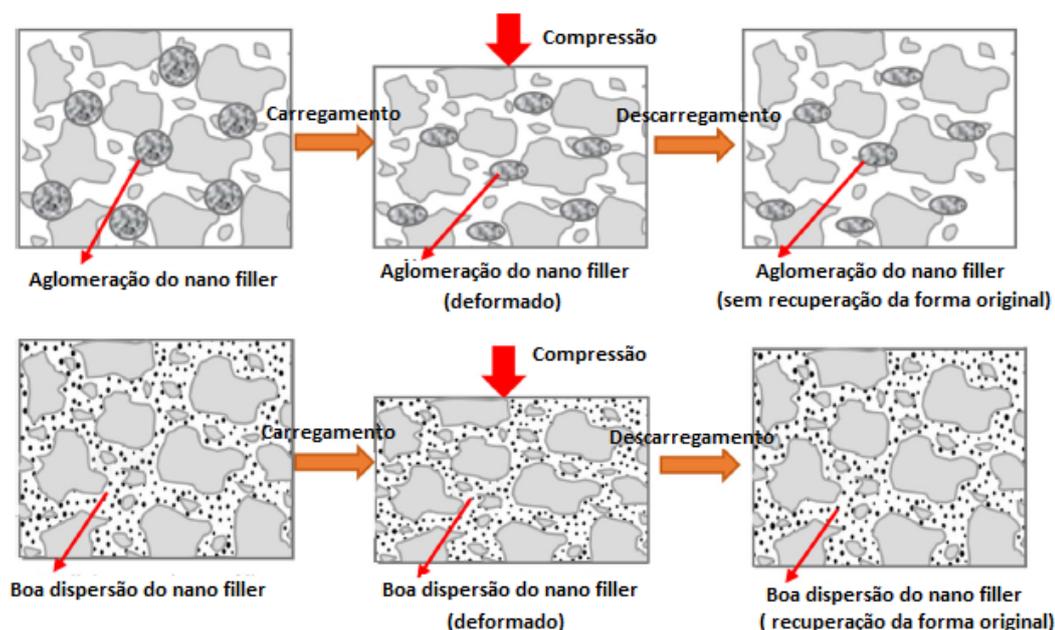


Fonte: Adaptado de Wang e Aslani (2019)

O processo de mistura do filler com a matriz cimentícia pode se dar basicamente por meio de três métodos, ou seja, com adição prévia do filler na água; com adição do filler junto à mistura anidra; e com a mistura do filler após o preparo da pasta cimentícia (Tian *et al.*, 2019).

Quanto os métodos de dispersão, os mesmos podem se dar por meios físicos, como por exemplo, mediante o uso de agitadores ultrassônicos, ou por meios químicos, com uso de aditivos dispersantes (Han; Ding; Yu, 2015), ou ainda por meio da combinação de ambos. A Figura 40 ilustra de forma comparativa o filler aglomerado e o disperso, em seu comportamento pré e pós esforço de compressão em um CCA.

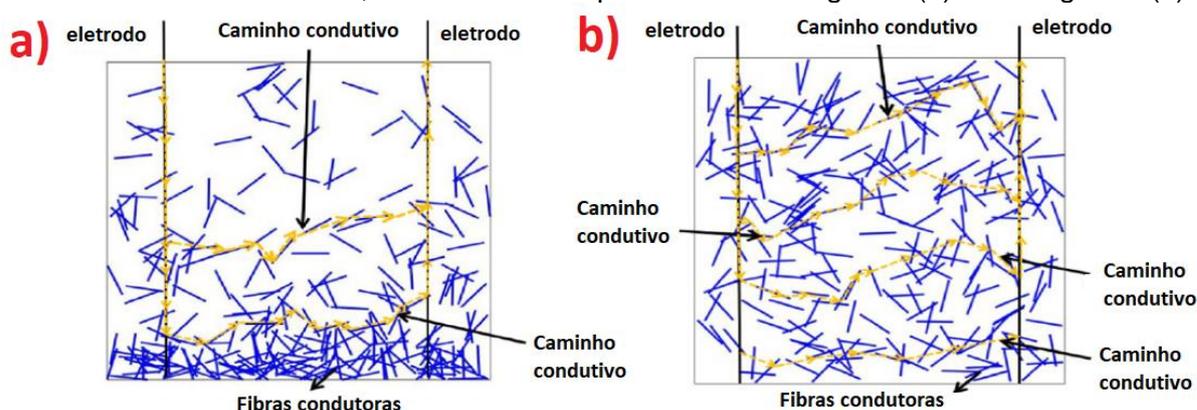
Figura 40 – Comparativo visual de pré e pós-carregamento de compressão para os casos de fillers aglomerados e não aglomerados



Fonte: Adaptado de Wang e Aslani (2019)

A dispersão dos fillers fibrosos também influencia na formação dos caminhos condutivos do CCA, conforme ilustra a Figura 41. Ou seja, quando aglomerados formam menos caminhos condutivos do que quando distribuídos de maneira uniforme.

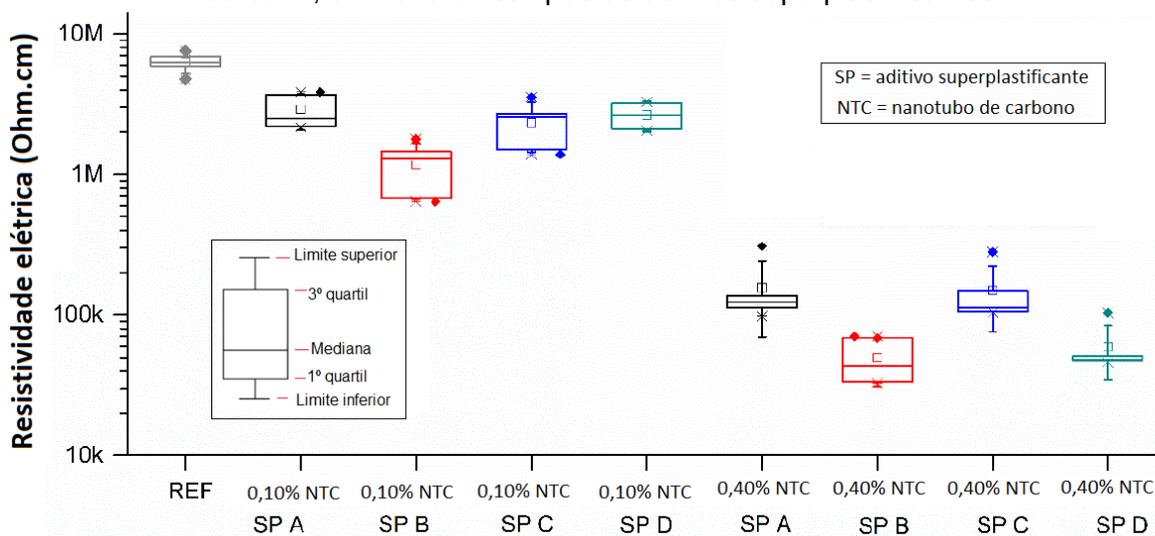
Figura 41 – Ilustração da influência da dispersão das fibras na formação dos caminhos eletricamente condutivos, nos casos de dispersão não homogênea (a) e homogênea (b)



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

Carisio *et al.* (2021), avaliaram a influência de diferentes tipos de aditivos superplastificantes na resistividade elétrica de compósitos cimentícios com incorporação de nanotubos de carbono, tendo constatado significativa influência, conforme resultados do gráfico da Figura 42.

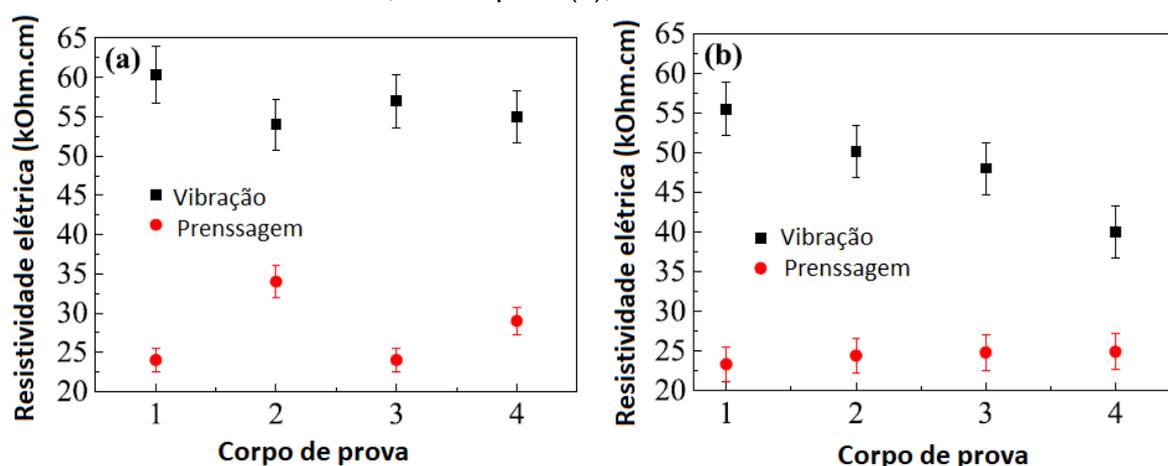
Figura 42 – Variação da resistividade elétrica em compósitos cimentício com nano tubo de carbono, com diferentes tipos de aditivos superplastificantes



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

O processo de moldagem do corpo de prova ou do elemento estrutural não só afeta as propriedades mecânicas dos compósitos cimentícios em geral, como também afeta a resistividade elétrica dos CCAs, pois à medida que reduzem os poros a condutividade aumenta (Guo; Wu; Wang, 2020; Wang; Aslani, 2019). Chuang *et al.* (2017) estudaram essa influência em compósito cimentício com adição de fibra de carbono em dois métodos de adensamento, tendo constatado significativa influência na resistividade elétrica conforme resultados apresentados na Figura 43.

Figura 43 – Variação da resistividade elétrica do CCA com teor de fibra de carbono 0,2% (a) e teor de fibra de carbono 0,4% em peso (b), entre diferentes métodos de adensamento

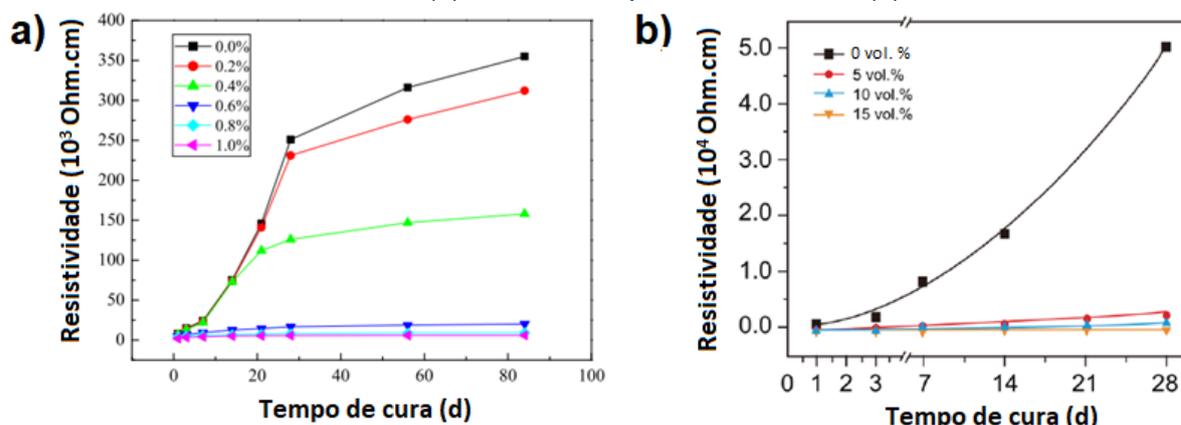


Fonte: Adaptado de Chuang *et al.* (2017)

Outro fator destacado no fluxo da Figura 39 é o procedimento de cura, o qual devido ao longo processo de hidratação do cimento, tem a resistividade elétrica influenciada com o tempo decorrido (Han *et al.*, 2020; Chuang *et al.*, 2017). Em estudos realizados

por Chuang *et al.* (2017) e Ding *et al.* (2019), esse aumento só foi significativo nos casos em que havia pouca ou nenhuma concentração de fillers condutivos, conforme Figura 44.

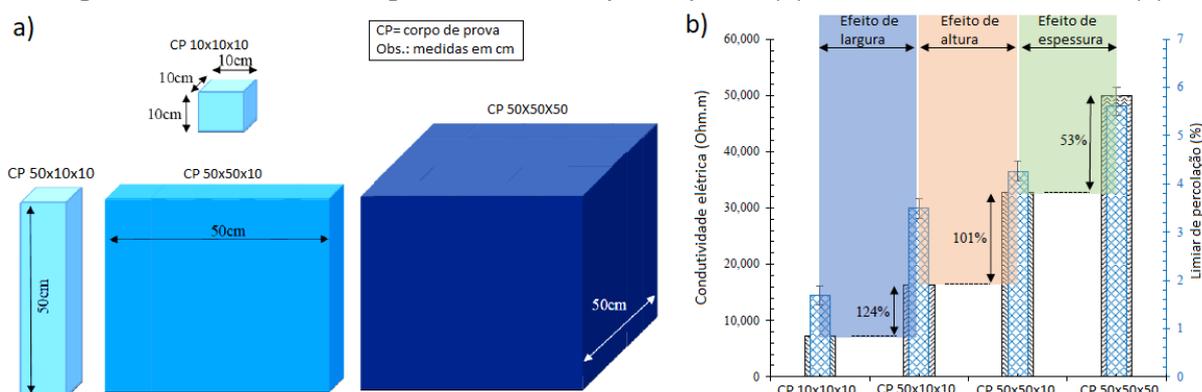
Figura 44 – Influência do tempo de cura na resistividade elétrica dos CCAs com fibras de carbono (a) e com fio superfino inoxidável (b)



Fonte: Adaptado de Chuang *et al.* (2017) (a); Ding *et al.* (2019) (b).

Os resultados de condutividade e resistividade elétrica podem ser influenciados pela geometria de corpos de prova de compósitos cimentícios (Dehghanpour; Yilmaz, 2020; Araujo; Macioski; Medeiros, 2022). Conforme exemplo ilustrado na Figura 45, um mesmo tipo de compósito cimentício apresentou variações de resultados de condutividade elétrica em função da largura, altura e espessura do corpo de prova.

Figura 45 – Influência da geometria do corpo de prova (a) na resistividade elétrica (b)



Fonte: Adaptado de Abedi, Fangueiro e Correia (2022)

Entretanto, não é somente o filler condutivo, o processo de fabricação do CCA e a geometria dos corpos de prova que afetam sua condutividade elétrica, mas também seus demais materiais constituintes como o cimento, os agregados e a água (Wang; Aslani, 2019; Liu *et al.*, 2018). Ou seja, especial atenção também deve ser dada a estes materiais quando dos estudos de dosagem dos CCAs.

2.1.6 CCA produzido com resíduos de materiais

O uso de agregados naturais tem sido um fator problemático, uma vez que são usados em grandes quantidades na produção de compósitos cimentícios, o que faz com que se clame pela diminuição do consumo dos mesmos, por meio de sua substituição (Meena *et al.*, 2022).

Da mesma forma que existe a preocupação com os agregados naturais, o alto consumo de cimento tem levado pesquisadores a buscar a sua substituição por resíduos apropriados (Ahmad *et al.*, 2021), como é o caso dos pozolânicos. Esses resíduos podem ser classificados como agrícolas, industriais e urbanos, conforme exemplos elencados na Figura 46.

Figura 46 – Tipos de materiais residuais usados na produção de compósitos cimentícios



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

Os compósitos cimentícios produzidos com a incorporação de resíduos devem obter resultados apropriados em questões como: redução de custo das construções; disponibilidade para fornecimento e uso; aproveitamento de forma eficaz do resíduo; e obtenção das características desejadas para resistência do compósito (Nasier, 2021). Além de se buscar a utilização dos resíduos pelas questões previamente elencadas, sua utilização na produção dos compósitos cimentícios possibilita uma série de benefícios de natureza ambiental, como destacado na Figura 47.

Figura 47 – Exemplos de benefícios na utilização de resíduos na produção de compósitos cimentícios na forma de concreto



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

Pesquisadores também recorrem ao uso de resíduos no desenvolvimento de CCAs. Além dos objetivos em comum com compósitos cimentícios convencionais, ou seja, redução de custos, redução de consumo de recursos naturais e melhora das propriedades mecânicas, o uso de resíduos também pode proporcionar melhora da condutividade elétrica e do efeito piezorresistivo nos CCAs. A Tabela 2 apresenta diferentes resíduos utilizados para esses fins (Nalon *et al.*, 2022).

Tabela 2 – Comparativo da influência da incorporação de fillers de rejeito ou subprodutos na condutividade elétrica e na autossensibilidade dos compósitos cimentícios

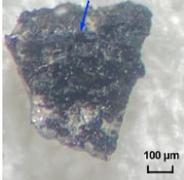
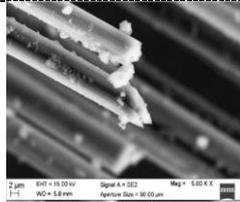
Resíduo, rejeito ou subproduto	Resultados observados na produção de compósitos para:			
	melhora da condutividade de elétrica	autossensibilidade na detecção de tensões	autossensibilidade na detecção de deformações	autossensibilidade na detecção de danos
Cinzas volantes	✓	✓	✓	✓
Lama vermelha	✓	✓	✗	✗
Escória de alto forno	✓	✓	✓	✓
Escória de aço	✓	✓	✓	✓
Fibra de carbono reciclada	✓	✗	✗	✗
Resíduos de borracha*	✓	✓	✓	✗
Biochar	✓	✗	✗	✗
Resíduo de gaseificação de carvão	✓	✗	✗	✗
Resíduos de nano grafite c/ partículas de ferro	✓	✗	✗	✗
Areia de fundição usada	✓	✗	✗	✗
Resíduos de eletroerosão	✓	✗	✗	✗

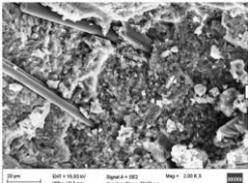
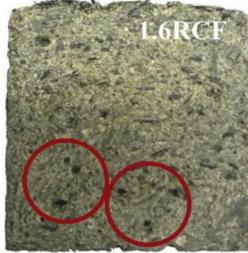
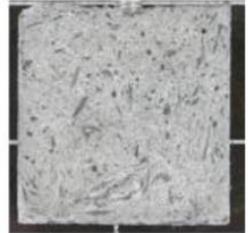
Resíduo, rejeito ou subproduto	Resultados observados na produção de compósitos para:			
	melhora da condutividade elétrica	autossensibilidade na detecção de tensões	autossensibilidade na detecção de deformações	autossensibilidade na detecção de danos
Rejeitos de minério de ferro	✓	✓	✗	✗
Resíduos de vidro c/ materiais condutivos sintetizados na superfície	✓	✓	✓	✓

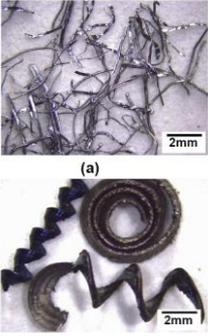
*contendo negro de fumo e pó de metais
Fonte: Adaptado de Nalon *et al.* (2022)

Tanto a melhora da condutividade elétrica quanto da sensibilidade decorrente do efeito piezorresistivo, dependem da concentração de resíduos no compósito (Nalon *et al.*, 2022). A Tabela 3 apresenta diversos casos de CCAs produzidos com resíduos, bem como comentários acerca de parte dos resultados obtidos.

Tabela 3 – Compósitos cimentícios produzidos com resíduos, visando melhorias das propriedades de condutividade elétrica (CE), impedância (Z) e piezorresistividade (P)

Resíduo	Ilustração	Composição	Análise	Comentários	Referência
Cinzas volantes de carvão; Escória de alto forno; Lama vermelha	-	Substituições do cimento por 5, 10, 15, 20 e 25% de resíduos.	CE+P	Melhores repetibilidade foram obtidas nas substituições de 20% com cinzas volantes de carvão e escória de alto forno.	Konkanov <i>et al.</i> (2020)
Resíduos de cacos de vidro revestidos com nanotubo de carbono	 Partícula de vidro com presença de nano tubo de carbono	Substituições de 25, 50, 75 e 100% do agregado miúdo pelo resíduo, com 1% de adição de nanotubos de carbono.	CE+P	Nos casos com mais de 25% de substituição foi observada melhora da resposta piezorresistiva.	Dong <i>et al.</i> (2021c)
Partículas de borracha condutora	 Partículas macroscópicas de borracha condutora	Substituições de 10, 20, 30 e 40% do agregado miúdo por resíduo.	CE+P	O melhor resultado de sensibilidade baseada no efeito piezorresistivos foi encontrada na substituição de 20%.	Dong <i>et al.</i> (2020a)
Fibras de carbono recicladas	 Fibras recicladas	Adição de 0,05 e 0,2% de material reciclado em relação ao volume total, com 4% de	CE+P	Amostras c/ 28d de idade recém retiradas da câmara úmida apresentaram pouca piezorresistividade	Belli <i>et al.</i> (2018)

Resíduo	Ilustração	Composição	Análise	Comentários	Referência
		nano plaquetas de grafeno.		quando comparadas a aquelas submetidas a processo de secagem.	
Fibras de carbono recicladas	-	Adições de fibra de 0,1, 0,2, 0,3, 0,4, 0,5, 0,6, 0,7, 0,8, 0,9, 1,0, 1,2 e 1,4% em volume, com dois diferentes tipos de fibra em separado.	CE+P	As amostras c/ fibra reciclada apresentaram uma boa relação sinal/ruído, o que colabora p/ resposta autossensível do compósito.	Segura <i>et al.</i> (2019)
Fibras de carbono recicladas e resíduos de gaseificação de carvão vegetal	 Presença de fibras recicladas na argamassa	Adição de 0,2% de fibra reciclada em relação ao volume total e adições de 0,5 e 1,0% de resíduo de gaseificação de carvão vegetal.	CE	As adições aumentaram a condutividade elétrica em até 90%, porém, houve pouco aumento devido a adição de resíduo de gaseificação de carvão.	Mobili <i>et al.</i> (2022)
Escória de aço	-	Escória em substituição total da areia, na relação 3:1 c/ o cimento. Adição de fibra de carbono em 1, 2, 3 e 4% em relação a massa de cimento.	CE+P	Melhor sensibilidade obtida com a máxima carga de fibras (4,0%).	Baeza <i>et al.</i> (2018)
Fibras de carbono recicladas	 Argamassa c/ 1,6% de adição de fibra	Adição de 0,05, 0,1, 0,2, 0,4, 0,8, 1,2 e 1,6% em volume.	CE	Aumento significativo da condutividade elétrica com a 0,2% de adição de fibra.	Belli <i>et al.</i> (2020)
Fibras de carbono recicladas	 Argamassa c/ 1,4% de adição de fibra	Adição de 0,1 a 1,4% de fibra em relação ao volume de cimento.	CE	Os valores de condutividade elétrica das amostras com adição de 0,2 a 0,8% de fibra reciclada ficaram próximos dos obtidos com fibras virgens.	Faneca <i>et al.</i> (2018)

Resíduo	Ilustração	Composição	Análise	Comentários	Referência
Resíduos metálicos (fibras e cavacos de aço)	 <p>(a) (b) Fibras (a); cavacos (b)</p>	Adição de 4, 8, 12 e 16% de resíduos metálicos em relação a massa de cimento.	CE	Ambos os tipos de resíduos (fibras e cavacos) provocaram aumento da condutividade, mas não o suficiente para atingir o limiar de percolação da condutividade elétrica.	Norambuena-Contreras <i>et al.</i> (2018)
Cinza volante e escória de alto forno	-	70% de cinza e 30% de escória em substituição ao cimento	Z+P	Ambos os tipos de resíduos (cinza e escória) combinados provocaram aumento da condutividade e influência na piezorresistividade.	Luo, Wang e Fang (2023)
Cinza de bagaço de cana-de-açúcar	 <p>Bagaço</p>	Adição de 0,3, 0,9 e 3,0% de cinza em relação a massa de cimento.	CE+P	A adição de 3,0% apresentou redução da resistividade elétrica, enquanto que 0,9% apresentou melhor sensibilidade na piezorresistividade.	Lian <i>et al.</i> (2024)
Cavacos de ferro		Adição de 1,0 a 16,0% de cavacos em relação a massa de cimento.	CE	Aumento significativo da condutividade elétrica, porém houve muita perda de resistência mecânica.	Filazi, Yilmazel e Pul (2023)
Escória siderúrgica de aço		Incorporação da proporção de 1,34 de escória em relação a massa de cimento	CE+P	Diminuição da resistividade elétrica e melhora da resposta piezorresistiva em relação ao traço sem escória.	Kang <i>et al.</i> (2024)

Fonte: Próprio autor.

O que se observa nos dados da Tabela 3 é no sentido de que nem sempre a maior taxa de incorporação do resíduo promove a maior condutividade elétrica ou a melhor sensibilidade ao efeito piezorresistivo, o que indica a importância de estudos de dosagem dos CCAs para obtenção de resultados otimizados.

Outra questão relevante na incorporação dos resíduos na produção dos CCAs, é a combinação de diferentes tipos de resíduos, o que possibilita a obtenção de diferentes propriedades dos materiais incorporados (Nalon *et al.*, 2022).

Nesse sentido, estudar a incorporação de um resíduo composto por múltiplos materiais, pode trazer melhorias na condutividade elétrica e na autossensibilidade do compósito cimentício, além dos inúmeros fatores descritos nesta seção, que colaboram com o desenvolvimento de um compósito mais sustentável e ambientalmente amigável.

Assim, a seção seguinte apresenta a lona de freio, um compósito constituído com materiais com diversas propriedades, utilizada nesta pesquisa com o intuito de se possibilitar bons resultados técnicos e ambientais na produção de CCAs.

2.2 Resíduos de lona de freio

2.2.1 Materiais de fricção aplicados a freios automobilísticos

O estudo dos materiais de fricção ocorre em um campo da ciência denominado tribologia. Essa denominação provém do grego, onde a palavra tribo faz referência ao ato de se esfregar. Apesar de o campo da tribologia ser algo recente, o ato de se esfregar materiais acompanha a humanidade há mais de 400.000 anos, quando o ser humano lascava pedras. Outra aplicação milenar da fricção entre materiais, foi por volta de 200.000 a.C., quando a humanidade começou a gerar fogo por meio da fricção de madeiras e de pedras de sílex (Persson, 2014).

Contudo, os primeiros registros de estudos sistemáticos de materiais de fricção podem ser atribuídos a Leonardo da Vinci (1452-1519), devido aos experimentos realizados e teorias concebidas pelo mesmo (Sundarkrishnaa, 2015).

As aplicações modernas de materiais de fricção começaram a surgir no final do século XIX, com a necessidade de se frear trens e automóveis, mediante mecanismos que transformavam energia cinética em energia térmica decorrente do atrito entre as partes (Maluf *et al.*, 2007).

Foi Bertha Benz (esposa de Karl Benz, inventor que patenteou o primeiro automóvel) que inventou o sistema de lona de freios, o qual foi utilizado pela mesma em agosto

de 1888 durante a primeira longa viagem de carro registrada na história mundial (Yendhe; Landge; Manoj, 2015).

Os modelos atuais de sistemas de lona de freio (Figura 48) foram baseados na criação de Herbert Froad em 1897, que se constituía em cintos feitos com fios de algodão. Porém, como a queima do algodão ocorre aproximadamente em 150 °C, Froad empregou em 1908 o uso de amianto nas lonas de freio. Já por volta de 1920, outros materiais, como latão, começaram a ser utilizados na produção de lonas de freio, por meio da moldagem de materiais de fricção (Sundarkrishnaa, 2015).

Figura 48 – Sistema de freios com sapatas e lonas



Fonte: Adaptado de Venkatesh e Murugapoopathiraja (2019)

Os materiais de fricção utilizados na produção de lonas de freios, são basicamente divididos em três grupos: matriz metálica, semi-metálica e não metálica, que podem levar outras nomenclaturas e subdivisões (Tabela 4). No caso da matriz semi-metálica a maior parte dos constituintes é formada por pó de ferro, fibras de metal, partículas de cobre e cerâmica, o que proporcionam alta estabilidade térmica e excelentes propriedades tribológicas. Já nas matrizes não metálicas, são empregadas fibras orgânicas e inorgânicas, como por exemplo, fibra de carbono, fibra de aramida e fibra de vidro (Jadhav; Sawant, 2019; Mulani *et al.*, 2022).

Tabela 4 – Principais tipos de materiais de fricção, seus ingredientes e características

Tipo de composição	Principais ingredientes	Características tribológicas
Orgânica e sem amianto, do inglês <i>non-asbestos organic</i> (NAO)	Compostos orgânicos, fibras minerais, grafite, titanatos e outros materiais	Baixo ruído e baixo desempenho de fricção
Baixa concentração de metais, do inglês <i>low metallic</i> (LM)	Orgânicos e metálicos	Performance de fricção boa e melhor durabilidade

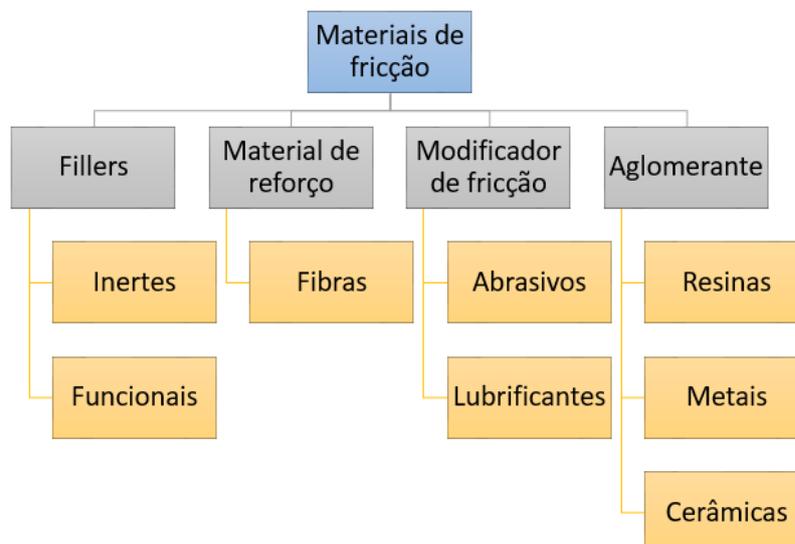
Tipo de composição	Principais ingredientes	Características tribológicas
Semi-metálica, do inglês <i>semimetallic</i> (SM)	Fibras de aço carbono e/ou pó de ferro	Maior resistência ao desgaste do tambor, transferência de calor e durabilidade

Fonte: Adaptado de Mulani *et al.* (2022)

Para formar o compósito de fricção, todos os materiais constituintes da lona de freio, seja ela semi-metálica ou não metálica, são aglomerados por um polímero. Além desse aglomerante, também são utilizados lubrificantes sólidos, que podem ser grafite e/ou borracha (Shinde *et al.*, 2018; Dante, 2016).

Centenas de materiais podem ser utilizados na produção de lonas de freio, os quais podem ser classificados em 4 categorias principais, em razão de suas funcionalidades, conforme estrutura da Figura 49 (Confiengo; Faga, 2022; Jadhav; Sawant, 2019).

Figura 49 – Estrutura de classificação dos materiais constituintes dos elementos de fricção



Fonte: Adaptado de Shinde *et al.* (2018)

O filler costuma ser subdividido em duas categorias: inertes e funcionais. No caso dos inertes, os mesmos têm apenas a função de preencher espaços vazios do compósito a fim de reduzir custos com sua fabricação. Já os funcionais, costumam ser empregados para melhoria da distribuição dos demais materiais constituintes e/ou para aumento da resistência térmica (Confiengo; Faga, 2022).

Para aumentar a resistência mecânica e estabilidade térmica, são utilizados materiais de reforço, que costumam ser fibras orgânicas ou inorgânicas (Jadhav; Sawant, 2019; Mulani *et al.*, 2022).

Visando conferir as principais propriedades relacionadas à frenagem, são empregadas partículas de materiais extremamente duros, para fornecer o atrito necessário ao material de fricção, os quais são conhecidos como modificadores de atrito ou fricção (Shinde *et al.*, 2018).

Para aglomerar todos os materiais que compõem uma lona de freio, são utilizadas resinas, sendo a de origem fenólica a mais utilizada, pois possui baixo custo, além de alta resistência à corrosão (Confienngo; Faga, 2022; Shang *et al.*, 2022).

Os materiais empregados e suas quantidades costumam ser objeto de segredo industrial dos fabricantes de lonas de freio. A Tabela 5 apresenta intervalos típicos da utilização de alguns desses materiais em função do tipo de composição do material de fricção.

Tabela 5 – Variação percentual típica dos lubrificantes e metais constituintes das lonas de freio de veículos automotores

Materiais	Orgânica e sem amianto (NAO)	Baixa concentração de metais (LM)	Semi-metálica (SM)
Lubrificantes			
Grafite fina	4-9	4-10	4-10
Grafite grossa	2-5	4-8	5-10
Sulfetos			
Estanho/ Antimônio	2-5	2-5	2-7
Cobre	2-5	2-5	2-10
Outros	0-4	0-4	2-5
Metais Ferrosos			
Fibras de aço	0	5-10	20-35
Pó de ferro	0	1-2	2-7
Metais não ferrosos			
Cobre	10-16	0-6	2-10
Liga de cobre	5-10	0-5	2-10
Zinco/Estanho	0-4	0-2	0-4

Fonte: Adaptado de Dante (2016)

Além da falta de informação por parte dos fabricantes quanto a detalhes da composição das lonas e pastilhas de freio, Giechaskiel *et al.* (2024) destacam que não há divulgação do *market share* da produção dos referidos componentes. Isso dificulta a realização de estimativas quanto à quantidade de lonas e pastilhas produzidas e descartadas no mundo.

Algumas embalagens e rótulos de lonas de freio apresentam determinadas informações sobre os materiais constituintes, mas de forma de genérica, conforme exemplo da Figura 50.

Figura 50 – Foto de rótulo de embalagem de lona de freio do fabricante Cobreq/TMD Friction



Fonte: Próprio autor.

Outros rótulos (Figura 51) destacam informações como a ausência de amianto nas lonas de freio e sua classificação pós-uso, ou seja, resíduo sólido classe II-A, o que consiste em resíduo não perigoso e não inerte, conforme ABNT NBR 10004 (2004).

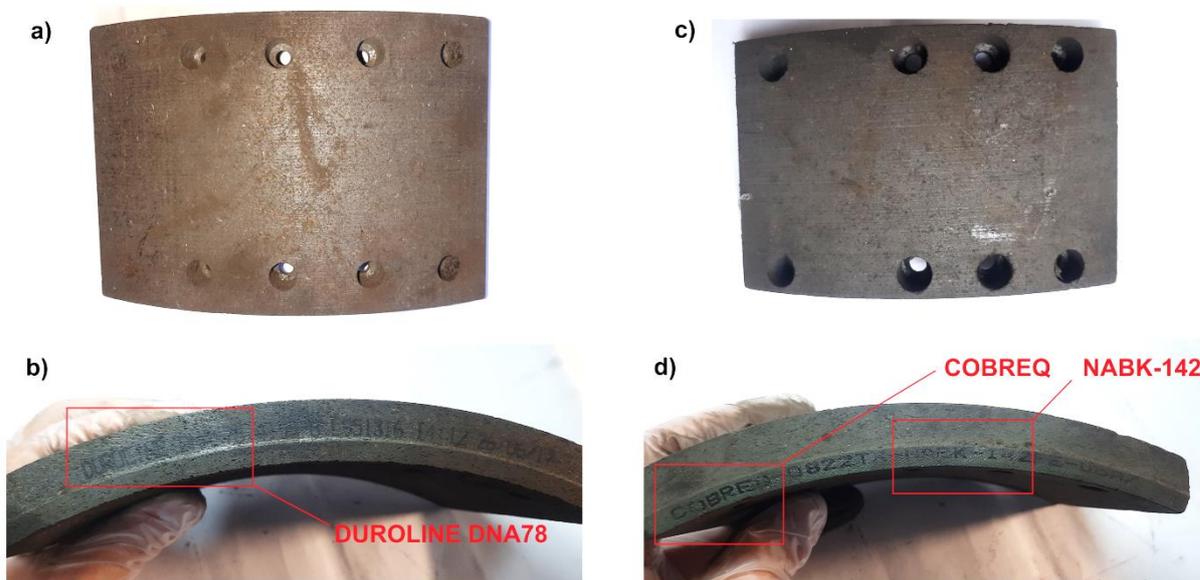
Figura 51 – Foto de rótulo de embalagem de lona de freio do fabricante Thermoid



Fonte: Próprio autor.

Algumas das lonas de freio comercializadas possuem informações referentes a fabricação impressas nas mesmas, conforme exemplos constantes da Figura 52.

Figura 52 – Fotos de lonas de freio dos fabricantes Duroline (a e b) e Cobreq (c e d)



Fonte: Próprio autor.

Com base em parte das informações impressas nas lonas de freio da Figura 52, foi possível identificar as seguintes características de suas composições, em material técnico-comercial disponibilizado nos sítios eletrônicos dos fabricantes (TMD Friction do Brasil, [20--?]; Duroline Ind. Com., [20--?]), conforme resumo apresentando na Tabela 6.

Tabela 6 – Tabela comparativa de caracterizas de lonas de freio, com base em informações divulgadas pelos fabricantes

Item	Fabricante/Modelo	
	Duroline/DNA78	Cobreq/NABK-142
Densidade (g/cm ³)	1,84	2,13
Dureza Rockwell	110	95
Coefficiente de Fricção	GF*	FE*
Resistência mecânica	-	515 N/cm ²
Indicação de uso	Caminhões, cavalos mecânicos, reboques e semirreboques	Ônibus (urbanos, trabalho rural, etc.) e caminhões (mineração, coleta de lixo, etc.)
Comentários	Produzida sem amianto; produz baixo ruído; baixa expansão térmica	Produzida sem amianto e sem metais pesados; teor de cobre <0,5%

*Códigos de coeficientes de fricção conforme norma SAE J866

Fonte: Próprio autor.

A menção nas embalagens, nos rótulos e nos catálogos técnicos dos fabricantes de que as lonas de freio não possuem amianto, são em decorrência da proibição de uso

do referido material, amparadas por dispositivos legais e regulamentares, existentes no Brasil há pelo menos uma década. Um dos primeiros registros da proibição do uso do amianto em lonas de freio, consta da norma ABNT NBR 14958-2 (2012, p. 7), que em seu item 4.1.3 prevê que “*Um conjunto de lona de freio deve ser isento de asbestos;*”.

Franceschini (2014) destaca que essa proibição também é decorrente de outro instrumento legal de regulamentação, ou seja, do “Regulamento Técnico da Qualidade para Materiais de Atrito Destinados ao Uso em Freios de Veículos Rodoviários Automotores”, instituído pela Portaria Inmetro n.º 17/2014 (Brasil, 2014), o qual em seu item 5.2 prevê que “*O conjunto de materiais de atrito (lonas e pastilhas) deve ser isento de asbestos e amianto em sua composição*”. O referido Regulamento, prevê ainda a certificação compulsória das lonas de freio, bem como a obrigatoriedade de realização de ensaios de detecção de asbestos em composições de materiais de atrito.

Devido à não utilização de amianto nos materiais de fricção dos sistemas de frenagem dos veículos automotivos, os mesmos são classificados como resíduos sólidos não perigosos de acordo com a “Lista Brasileira de Resíduos Sólidos”, conforme Instrução Normativa IBAMA n.º 13/2012 (Brasil, 2012).

Nesse sentido, a utilização de resíduos de lonas de freio usadas, vai ao encontro dos objetivos estabelecidos na “Política Nacional de Resíduos Sólidos”, instituída pela Lei Federal n.º 12.305/2010 (Brasil, 2010), a qual prevê no inciso II do Art. 7º a “[...] *redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos;*” (grifo autor).

2.2.2 Utilização de resíduos de lona de freio

A reciclagem dos materiais de fricção, do ponto de vista ambiental é uma solução promissora para conservação dos recursos naturais e conseqüentemente do meio ambiente (Lyu *et al.*, 2020).

Porém, o método mais comum de destinação dos materiais de fricção automotivos é o encaminhamento para aterros, o que demanda cada vez mais espaços para armazenamento desses resíduos. Ou seja, a reutilização desse resíduo é

extremamente benéfica para o meio ambiente, bem como para redução do consumo de materiais. Nesse sentido, é de suma importância pesquisar métodos ambientalmente amigáveis que possam aproveitar estes resíduos (Li *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2017).

Assim, pesquisadores de diversas áreas têm realizado estudos no sentido de promover o reaproveitamento dos resíduos de lonas e pastilhas de freio.

Hu *et al.* (2017) realizaram uma investigação experimental com o uso de resíduo de material de fricção de freio automotivo na produção de massa asfáltica para pavimento rodoviário. Nesse estudo foi concluído que a incorporação do resíduo possibilitou, além da redução dos impactos ambientais pela possibilidade de não descarte, a melhora das propriedades de viscosidade e do desempenho em alta temperatura do compósito asfáltico. Porém, em baixas temperaturas, o compósito apresentou resultados inferiores na análise de flexibilidade, quando comparado com a amostra de referência.

Dong, Xie e Pan (2018) constataram em suas pesquisas, que o uso de resíduo de lona de freio utilizado na produção de emulsão de cimento asfáltico não trouxe melhora nas propriedades físico-mecânicas do compósito desenvolvido. Porém, seus resultados ficaram equivalentes a outras substituições realizadas com subprodutos (resíduos, rejeitos, etc.), mostrando que o resíduo de lona de freio tem potencial para ser utilizado como carga mineral em emulsões asfálticas, o que também colabora com questões ambientais.

Ainda no campo dos compósitos asfálticos, Hu *et al.* (2019) investigaram o uso de resíduo de material de fricção de freio automotivo em mistura asfáltica modificada com enxofre. Os autores constataram que a substituição de 50% da massa dos fillers calcários por resíduos, apresentou os melhores resultados em relação às demais proporções de substituição. Ademais, os autores concluíram que houve melhora das propriedades da mistura asfáltica com resíduo, quando avaliada em altas temperaturas.

No campo dos geopolímeros, Bai *et al.* (2019) produziram um compósito com metacaulim, com substituições de 10, 20 e 30% de sua massa, por resíduos de lona de freio. Nos resultados obtidos pelos pesquisadores, foi possível constatar que as

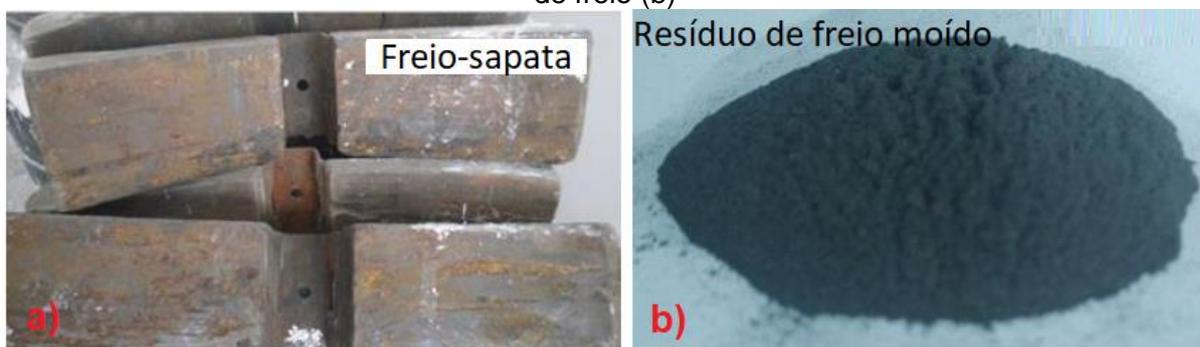
resistências à flexão ficaram superiores a amostra de referência, quando houve a substituição de 10% por resíduo de lona de freio, o que não ocorreu nos casos de resistência à compressão, pois houve uma pequena queda de resistência.

Em áreas mais distantes dos materiais de construção civil, pesquisadores (Thimmaiah; Siddaramaiah, 2013) utilizaram resíduo de material de fricção de freio automotivo na produção de borracha de butadieno-estireno, com substituições de 2,5 a 40 *phr*⁴ do negro de fumo. Com base nos resultados obtidos, os autores concluíram que a taxa de substituição de 5 *phr*, foi a qual apresentou melhores resultados para a dureza superficial e módulo de tração.

Os estudos com resíduos de lonas e pastilhas de freio continuam presentes na atualidade, em diversas áreas da Ciência dos Materiais, como é o caso do estudo de Qi *et al.* (2024), que a partir do recozimento por oxidação do resíduo conseguiram promover o crescimento *in-situ* de nanocristais de Fe₂O₃. Segundo os referidos pesquisadores, o estudo possibilitou dentre outras questões, a obtenção de informações para o desenvolvimento de catalisadores do tipo Fenton, a partir do ferro contido em resíduos, como no caso das lonas de freio.

Wang *et al.* (2016b) estudaram o efeito da incorporação do resíduo de material de fricção de freio automotivo, em concreto cimentício, mediante substituição de 5, 10, 15 e 20% da massa do agregado miúdo pelo resíduo. Neste caso o concreto também contou com a incorporação de borracha (Figura 53).

Figura 53 – Sapatas com lonas de freio (a) e pó resultante da moagem por fricção da lona de freio (b)

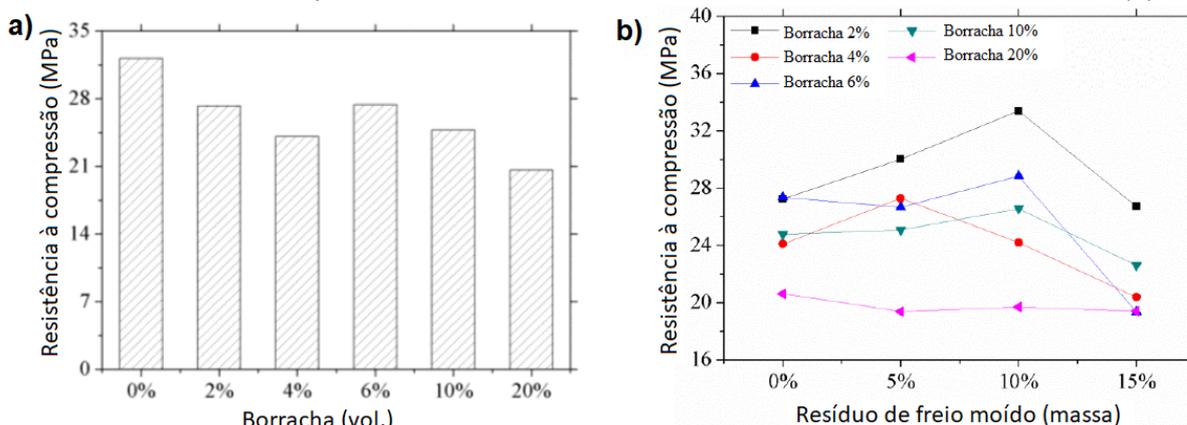


Fonte: Adaptado de Wang *et al.* (2016b)

⁴ *phr* do inglês *parts per hundred rubber* <https://en.wikipedia.org/wiki/PHR>

Nos resultados de resistência à compressão, Wang *et al.* (2016b) constataram a já esperada redução de resistência no caso das amostras que continham somente incorporação da borracha (Figura 54a). Porém, foi observado um ganho de resistência (Figura 54b), acima do traço de referência, quando houve a incorporação de 10% do resíduo de freio.

Figura 54 – Valores de resistência à compressão de argamassa com borracha (a); Valores de resistência à compressão de concreto com borracha e resíduo de lona de freio (b)



Fonte: Adaptado de Wang *et al.* (2016b)

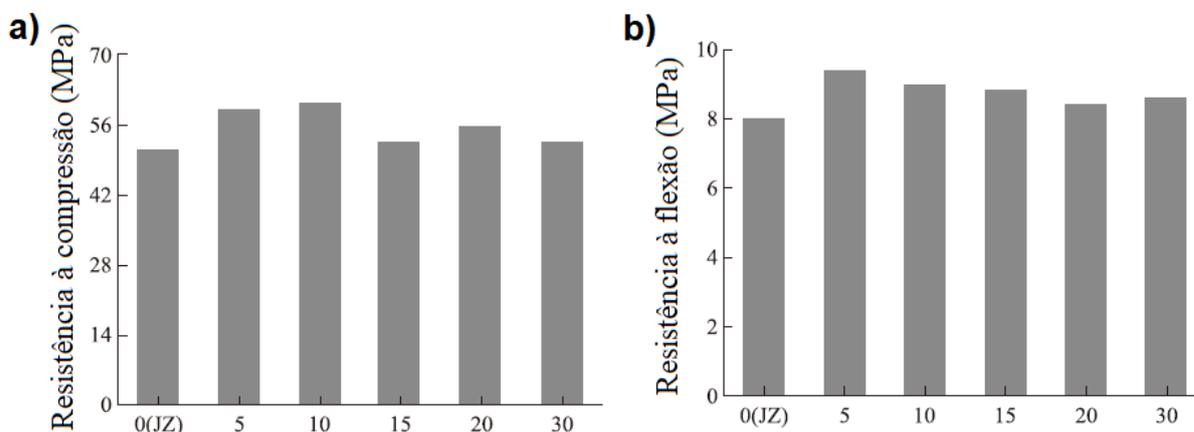
Wang *et al.* (2016b) também constataram que o resíduo de lona de freio pode colaborar em algumas dosagens, com a redução da profundidade de carbonatação e com o aumento da resistência à erosão por íons cloretos, o que pode ser considerado benéfico para estruturas de concreto armado, no que se refere à proteção das armaduras.

Em estudo subsequente realizado com argamassas, agora sem incorporação de borracha, Wang *et al.* (2017) realizaram substituições de 5, 10, 15, 20 e 30% da massa do agregado miúdo por resíduo de lona de freio e outros traços somente com substituições de 5, 10 e 20% da massa do cimento. Além das substituições, os autores também utilizaram os traços com adição do resíduo em proporções de 3, 5, 10 e 15% da massa do cimento. O resíduo foi utilizado em condições distintas de preparo: moído em partículas ou pirolisado.

Dentre os resultados de resistências mecânicas (Figura 55) obtidos pelos autores (Wang *et al.*, 2017), os melhores foram com as substituições do agregado miúdo em 5 e 10% por resíduo de lona de freio moída em partículas (pirolisada), o que promoveu o aumento da resistência em até quase 20% em relação ao traço de referência. Os

autores também observaram que a incorporação do resíduo melhorou a resistência à penetração de cloreto.

Figura 55 – Valores de resistência à compressão (a) e flexão (b) de argamassa com resíduo de lona de freio



Fonte: Adaptado de Wang *et al.* (2017)

A Tabela 7 apresenta algumas das características físico-mecânicas de resíduos de material de fricção de freio automotivo, fornecidas pelos pesquisadores citados nesta seção.

Tabela 7 – Propriedades físico-mecânicas de resíduos de material de fricção de freio automotivo

Aplicação	Densidade (g/cm ³)	Granulometria (mm)	Superfície específica (m ² /kg)	Referência
Asfáltico	2,790	<0,075	-	Hu <i>et al.</i> (2017)
Asfáltico	2,295	<0,075	385	Dong, Xie e Pan (2018)
Asfáltico	-	<0,075	-	Hu <i>et al.</i> (2019)
Asfáltico	2,264 2,116	≤0,075 9,5–16	-	Li <i>et al.</i> (2022)
Geopolímero de metacaulim	-	<0,075	-	Bai <i>et al.</i> (2019)
Borracha	-	-	-	Thimmaiah e Siddaramaiah (2013)
Cimentício	2,810	≈<0,1	-	Wang <i>et al.</i> (2016b)
Cimentício	-	≈<0,1	-	Wang <i>et al.</i> (2017)
Catalisador	-	0,0005–0,01	-	Qi <i>et al.</i> (2024)

Fonte: Próprio autor.

Ainda que existam registros na literatura científica sobre o uso de resíduos de materiais de fricção de sistemas de freio na produção de compósitos, sua utilização é extremamente escassa e praticamente inexistente na produção de CCAs.

Nesta pesquisa, a utilização do resíduo de lona de freio se deu especialmente em função dos materiais eletricamente condutores existentes em alguns tipos de lonas de freio (conforme Tabelas 4 e 5), como aquelas que possuem metais e materiais à base de carbono.

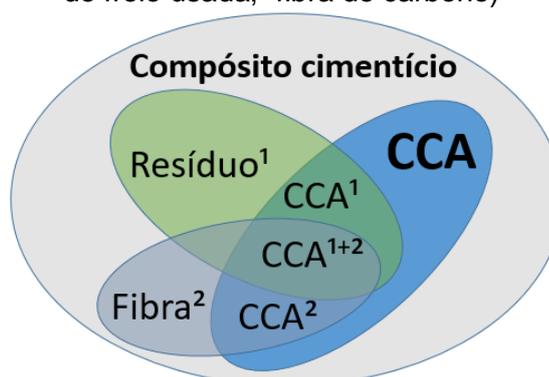
Conduto, existem poucos dados na literatura a respeito da condutividade elétrica dos materiais de fricção de sistemas de freio. Sundarkrishnaa (2015) destaca que os materiais de fricção cerâmicos apresentam resistividade elétrica da ordem de $1 \text{ T}\Omega\text{m}$, o que torna esse tipo de pastilha ou lona de freio altamente isolante. Já Gilardi, Sarocchi e Bounos (2016) concluíram que pastilhas com negro de fumo de grafite em sua composição têm a condutividade aumentada, reduzindo a resistividade elétrica para ordem de $1 \text{ }\Omega\text{m}$.

Este cenário, ou seja, escassez de informações na literatura e grande variação de resistividade elétrica das lonas de freio, tornou a presente pesquisa ainda mais complexa, especialmente sob o ponto de vista dos desafios experimentais.

3 METODOLOGIA

O presente capítulo foi subdividido entre as etapas correspondentes ao desenvolvimento e análise do CCA com incorporação resíduo de lona de freio e fibra de carbono, nas formas isoladas e combinadas, conforme ilustra a Figura 56.

Figura 56 – Relação entre as diferentes etapas metodológicas da pesquisa (¹resíduo de lona de freio usada; ²fibra de carbono)



Fonte: Próprio autor.

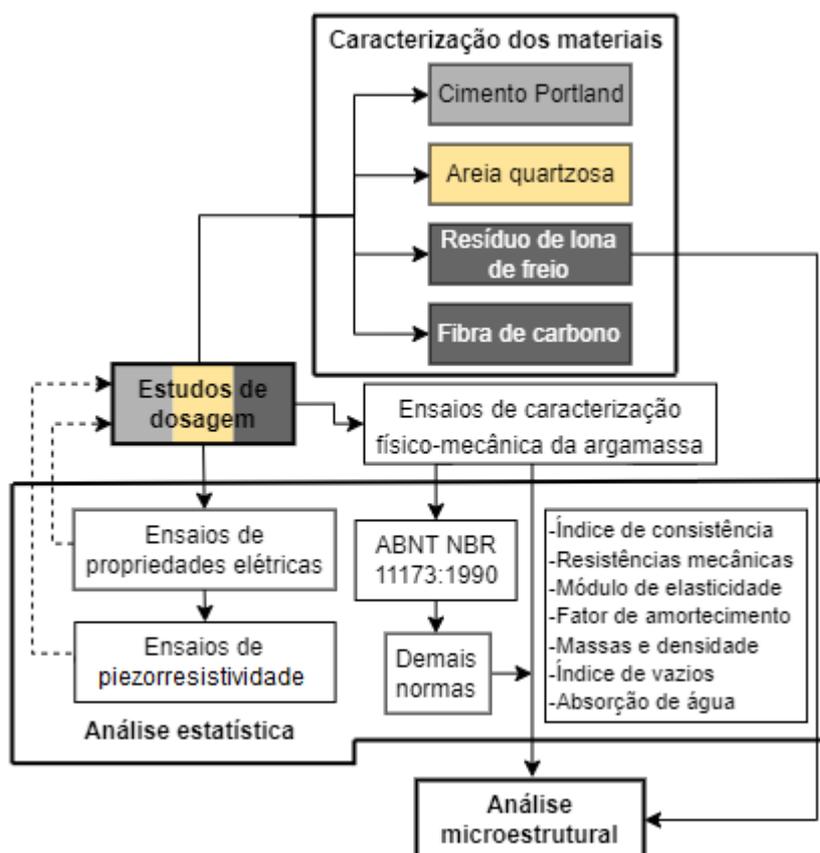
3.1 Desenvolvimento do CCA com incorporação de resíduo e fibra

O desenvolvimento do CCA com resíduo de lona de freio e fibra de carbono foi realizado mediante as diferentes fases metodológicas descritas a seguir, previamente ilustradas na Figura 57.

A caracterização dos materiais, ou seja, do cimento, da areia, do resíduo de lona de freio e da fibra de carbono, foi realizada de acordo com prescrições da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e da literatura quando aplicável.

Na sequência, foram realizados estudos de dosagem, levando-se em consideração a caracterização dos materiais, para produção do CCA na forma de argamassa para fins estruturais, baseado em argamassa armada (ABNT NBR 11173, 1990).

Figura 57 – Estruturação do fluxo de desenvolvimento e análise do CCA



Fonte: Próprio autor.

Por fim, foram realizados os ensaios de caracterização do CCA, tanto em estado fresco como em estado endurecido, bem como as análises de propriedades elétricas, piezorresistividade e de microestrutura por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e por espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDS⁵).

3.1.1 Materiais

3.1.1.1 Aglomerante

O aglomerante selecionado para desenvolvimento do CCA foi o cimento Portland CPV, de alta resistência inicial (ARI), produzido pela empresa Holcim, com vistas ao atendimento dos padrões previstos na ABNT NBR 16697 (2018).

⁵ do inglês *energy-dispersive X-ray spectroscopy*.

Essa escolha se deu pelo fato de ser possível a desmoldagem dos corpos de prova com 48 ± 24 horas, bem como em função de possibilitar o ganho de resistência mecânica inicial, para análise a partir dos 7 dias de idade. Outro fator relevante na escolha do CPV, foi o baixo teor de adições nesse aglomerante, ou seja, de maior pureza em sua composição (Carasek, 2010). Por fim, a escolha também foi reforçada pelo fato de Carísio *et al.* (2021) terem usado o mesmo tipo cimento, para produção de compósito cimentício com propriedades elétricas.

3.1.1.2 Agregado Miúdo

A areia tipo quartzosa foi selecionada como agregado miúdo, oriunda da região geográfica de Limeira-SP. A sua disponibilização se deu por meio do Laboratório de Materiais de Construção Civil da Faculdade de Tecnologia da UNICAMP. Mediante utilização de estufa, a referida areia passou por processo de redução da umidade, durante 24 horas, numa temperatura de 105 ± 5 °C.

3.1.1.3 Água

A água de amassamento utilizada para produção dos CCAs foi proveniente da rede pública de abastecimento do município de Limeira-SP.

3.1.1.4 Aditivo redutor de água

Foi utilizado aditivo redutor de água, do fabricante MC-Bauchemie Brasil, conforme dados técnicos apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Dados técnicos do aditivo redutor de água

Característica	TechniFlow 520	Observações
Tipo	RA2*	ABNT NBR 11768-1 (2019)
Densidade	1,08 kg/L	ABNT NBR 11768-3 (2019)
Dosagem recomendada	$\geq 0,2\% \leq 2,0\%$	Sobre o peso do cimento
Estado	Líquido	-
Cor	Marrom	Pequenas variações são esperadas

*Redutor de água tipo 2, *mid-range* de pega normal.
Fonte: adaptado de Mc-Bauchemie Brasil (2022).

A utilização do aditivo teve por objetivo a melhora da trabalhabilidade da argamassa, especialmente devido à redução quando da incorporação dos resíduos de lona de freio e das fibras de carbono.

3.1.1.5 Resíduo de lona de freio

Tendo em vista os materiais constituintes das lonas de freio, especialmente aqueles de natureza eletricamente condutiva, como os metálicos e carbonosos, foram coletadas lonas de freio usadas, junto a uma oficina mecânica (Figura 58) de veículos pesados (caminhões), localizada no município de Campinas-SP.

As lonas de freio foram cedidas sem custos pela empresa, uma vez que, de acordo com seus funcionários, as lonas usadas eram destinadas a um aterro sanitário da região, mediante pagamento de taxa para o descarte.

Figura 58 – Local de coleta da lona de freio junto à oficina mecânica (a); Bolsa de armazenamento das lonas de freio descartadas (b)



Fonte: Próprio autor.

A escolha do material de fricção de lonas de freios de veículos pesados (Figura 59a) e não de pastilhas de freios de veículos leves (Figura 59b), ocorreu especialmente pelo fato de que as lonas são removidas das sapatas por procedimento de retirada dos rebites (Figura 60) pela própria oficina quando são substituídas, enquanto que as pastilhas permanecem fortemente fixadas em base metálica, base essa que geralmente segue para reciclagem.

Figura 59 - Lona (a) e pastilha (b) de freios fixadas nos respectivos suportes metálicos



Fonte: Próprio autor.

Outro fator que colaborou com a escolha da lona e não da pastilha, foi em função do maior tamanho (volume) das lonas, o que permite conseguir uma maior quantidade de material com um menor número de amostras coletadas.

Figura 60 – Remoção dos rebites da lona de freio fixada na sapata

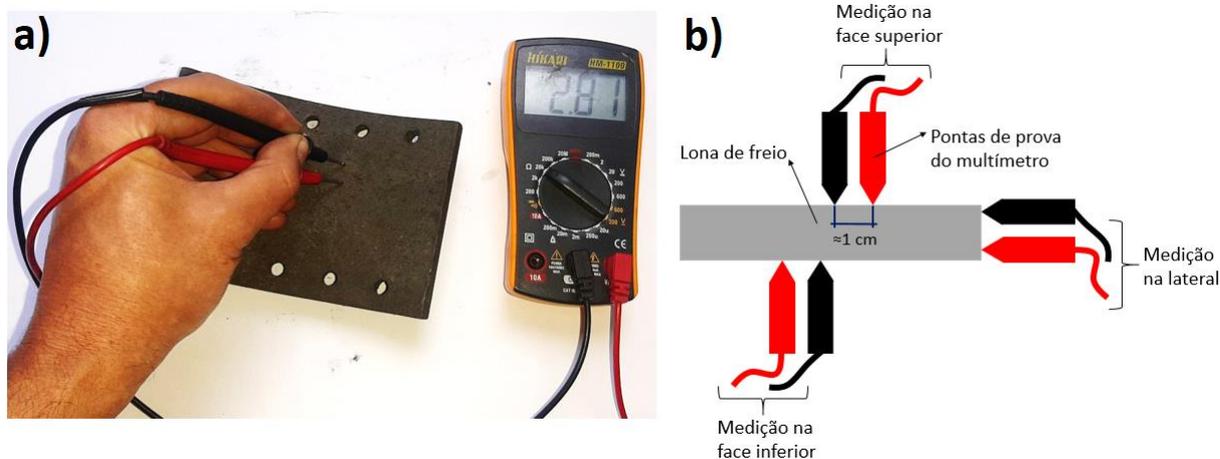


Fonte: adaptado de <https://omecanico.com.br/manutencao-preventiva-de-freio-de-carretas/>

Durante o processo de coleta das lonas de freio, foram realizados os seguintes procedimentos:

1. Escolha de lonas de freio que não apresentassem manchas ou marcas de qualquer tipo de material, especialmente fluidos automotivos, óleos e graxas;
2. Escolha de lonas de freio que apresentassem resistência elétrica $<5,0 \text{ k}\Omega$, medida numa distância de aproximadamente 1,0 cm entre as duas pontas de prova do multímetro (Figura 61), em mais de um ponto da lona (frente, verso e lateral);
3. Acondicionamento em sacos plásticos para transporte e estocagem provisória.

Figura 61 – Medição da resistência elétrica na face inferior da lona de freio com multímetro (Hikari/HM1100) na função ohmímetro (a); esquema de posicionamento das pontas de prova do multímetro sobre a lona de freio



Fonte: Próprio autor.

Após a coleta das lonas de freio usadas, essas foram objeto de processo de redução granulométrica por meio de trituração e moagem, em três etapas, para possibilitar sua incorporação no compósito estudado. Previamente a trituração, foram removidos manualmente (com o auxílio de uma chave fenda e martelo) os rebites metálicos (já rompidos) que por ventura não foram totalmente extraídos no processo de remoção pela oficina.

Esse processo de redução granulométrica foi iniciado com o emprego do triturador de mandíbulas (fabricante Sahara), mostrado na Figura 62.

Figura 62 – Vista geral do triturador de mandíbulas (a); detalhe do acesso às mandíbulas (b)



Fonte: Próprio autor.

Esta 1ª etapa de trituração possibilitou uma redução da lona de freio em partes com granulometria majoritariamente <math><25,0\text{ mm}</math>.

Após isto, prosseguiu-se com redução mediante o uso de um triturador de facas com martelo, modelo 75 (fabricante CID) mostrado na Figura 63, o que se consistiu na 2ª etapa de redução.

Figura 63– Vista geral do triturador de facas (a); vista interna do triturador (b)



Fonte: Próprio autor.

Esta 2ª etapa de redução possibilitou uma diminuição granulométrica majoritariamente <6,3 mm. Por fim, foi realizada a 3ª etapa de redução, mediante a utilização de um moedor de fricção de discos mostrado na Figura 64.

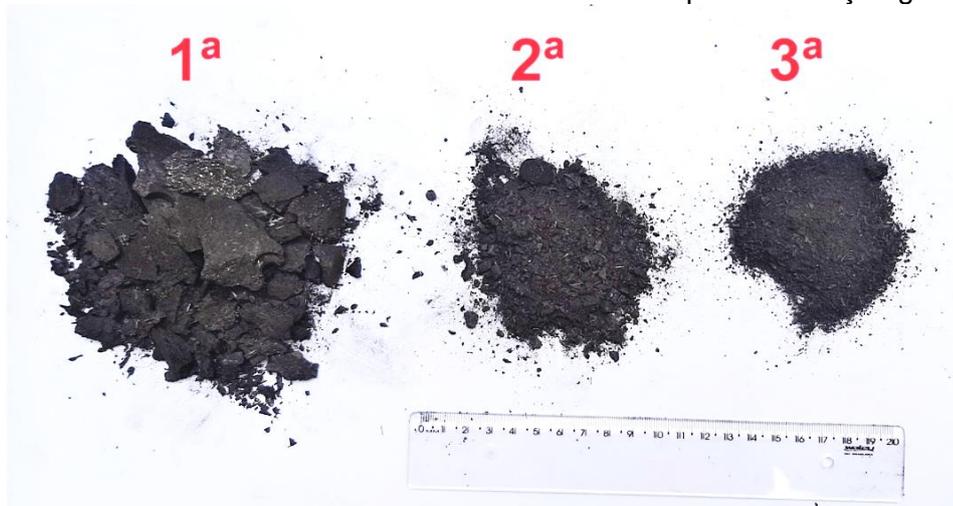
Figura 64 – Vista geral do moedor (a); discos de moagem em posição de fricção (b); discos abertos (c)



Fonte: Próprio autor.

Esta 3ª (última) etapa possibilitou uma redução em partes com granulometria predominantemente <0,6 mm. Na Figura 65 pode ser observado o resultado da redução granulométrica obtido em cada uma das três etapas de redução.

Figura 65 – Amostras das lonas de freio resultantes das 3 etapas de redução granulométrica



Fonte: Próprio autor.

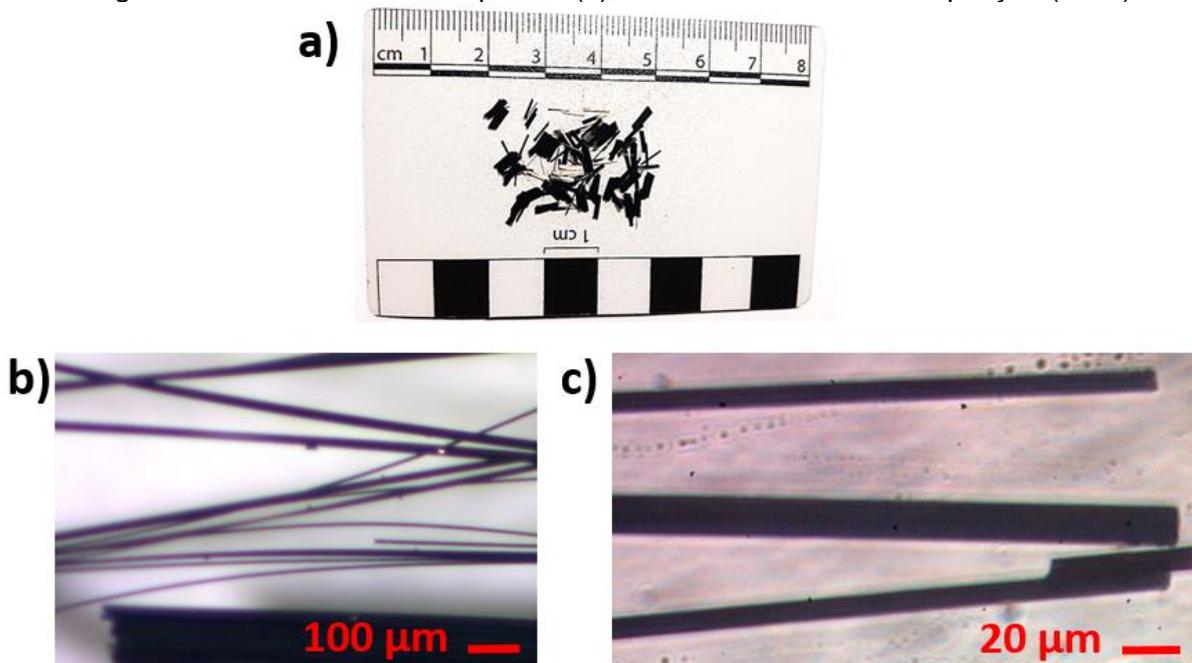
Por se tratar de resíduo sólido, foi providenciada a análise e classificação dos resíduos de lonas de freio trituradas, nos termos previstos na ABNT NBR 10004 (2004) intitulada “Resíduos sólidos – Classificação”. A referida análise foi realizada pelo laboratório PLANTEC – P.T.A. LTDA, localizado em Iracemápolis-SP, empresa esta acreditada pelo Instituto Nacional de Metrologia (INMETRO).

3.1.1.6 Fibra de carbono

Foi utilizada fibra de carbono picada (Figura 66) no comprimento de ≈ 4 mm, tipo 12k⁶, com teor de pureza $\geq 94\%$, fabricada e comercializada pela empresa TEXIGLASS[®], com as propriedades indicadas na Tabela 9 e espessura de $\approx 6-7$ μm (Figura 66c).

As imagens da Figura 66b foram tomadas por meio da lupa marca Zeiss, modelo Stemi 2000-C e as da Figura 66c, pelo microscópio invertido modelo Axiovert 40 CFL da mesma marca. A câmera de ambos é de modelo AxioCam ERc 52, do mesmo fabricante.

Figura 66 – Fibra de carbono picada (a); Fibra de carbono em ampliação (b e c)



Fonte: Próprio autor.

⁶ Fibra com 12.000 filamentos.

Tabela 9 – Propriedades da fibra de carbono picada

Propriedades	Valor
Densidade	1,76 g/cm ³
Alongamento até ruptura	1,90%
Módulo de Elasticidade	240,00 GPa
Resistência à tração	4.900,00 MPa
Resistência aos álcalis	Alta resistência
Resistência aos ácidos	Baixa resistência
Efeito ao calor	Oxida a > 316°C

Fonte: Adaptado de Texiglass, 2015.

A utilização da fibra de carbono se deu com o intuito de potencializar a condutividade elétrica e a piezorresistividade das argamassas, uma vez que a fibra apresenta condutividade elétrica superior ao do resíduo de lona de freio utilizado na pesquisa.

O uso de mais de um filler condutor em CCAs é muito comum em pesquisas, conforme se observa na Tabela 1, uma vez que a combinação de diferentes fillers pode colaborar tanto com a melhora da autossensibilidade, quanto com a melhora das propriedades mecânicas (Nalon *et al*, 2022; Xin *et al.*, 2022; Wang; Aslani, 2022).

3.1.2 Métodos

3.1.2.1 Caracterização dos materiais

3.1.2.1.1 Cimento Portland

O cimento Portland CPV-ARI, foi caracterizado quanto à sua massa específica, conforme norma técnica ABNT NBR 16605 (2017).

3.1.2.1.2 Agregado miúdo

A areia quartzosa, foi caracterizada a partir dos parâmetros constantes da Tabela 10.

Tabela 10 – Propriedades e normas técnicas utilizadas para caracterização da areia

Propriedades	Norma técnica
Composição granulométrica	ABNT NBR 17054 (2022)
Densidade	ABNT NBR NM 16916 (2021)
Massa unitária	ABNT NBR 16972 (2021)

Fonte: Próprio autor.

3.1.2.1.3 Lona de freio

Em ensaios preliminares verificou-se que o resíduo de lona de freio triturado não apresentava boa dispersão em água, mas sim em querosene, conforme Figura 67. Por esse motivo, a determinação da massa específica seguiu os métodos previstos para aglomerante, conforme procedimento previsto na norma ABNT NBR 16605 (2017), apesar de o resíduo ter sido utilizado como agregado.

Figura 67 – Ensaio de dispersão do resíduo de lona de freio em querosene e água 1 minuto após lançamento (a). Após aproximadamente 3,5 minutos (b). Após aproximadamente 6 minutos (c). Após aproximadamente 10,5 minutos (d)



Fonte: Próprio autor.

Os resíduos de lona de freio reduzidos por trituração e moagem, foram caracterizados mediante adaptação de normas técnicas de caracterização de aglomerantes e agregados, conforme parâmetros da Tabela 11.

Tabela 11 – Propriedades e normas técnicas utilizadas para caracterização dos resíduos de lona de freio

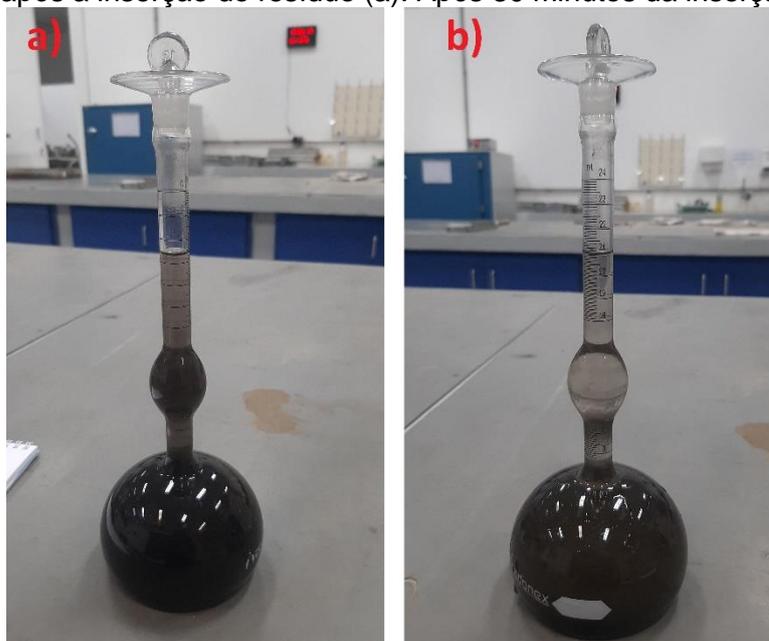
Propriedades	Norma técnica
Composição granulométrica*	ABNT NBR 17054 (2022)
Massa específica**	ABNT NBR 16605 (2017)
Massa unitária*	ABNT NBR 16972 (2021)
Teor de umidade total*	ABNT NBR 9939 (2011)

*Adaptado da norma de agregado; ** Adaptado da norma de cimento Portland

Fonte: Próprio autor.

A Figura 68 apresenta a realização do ensaio de massa específica dos resíduos de lona de freio e a Figura 69 a realização do ensaio de massa unitária.

Figura 68 – Ensaio de massa específica no frasco de *Le Chatelier* com querosene. Imediatamente após a inserção do resíduo (a). Após 30 minutos da inserção do resíduo (b)



Fonte: Próprio autor.

Figura 69 – Ensaio de massa unitária da 1ª (a), 2ª (b) e 3ª (c) etapa de trituração do resíduo



Fonte: Próprio autor.

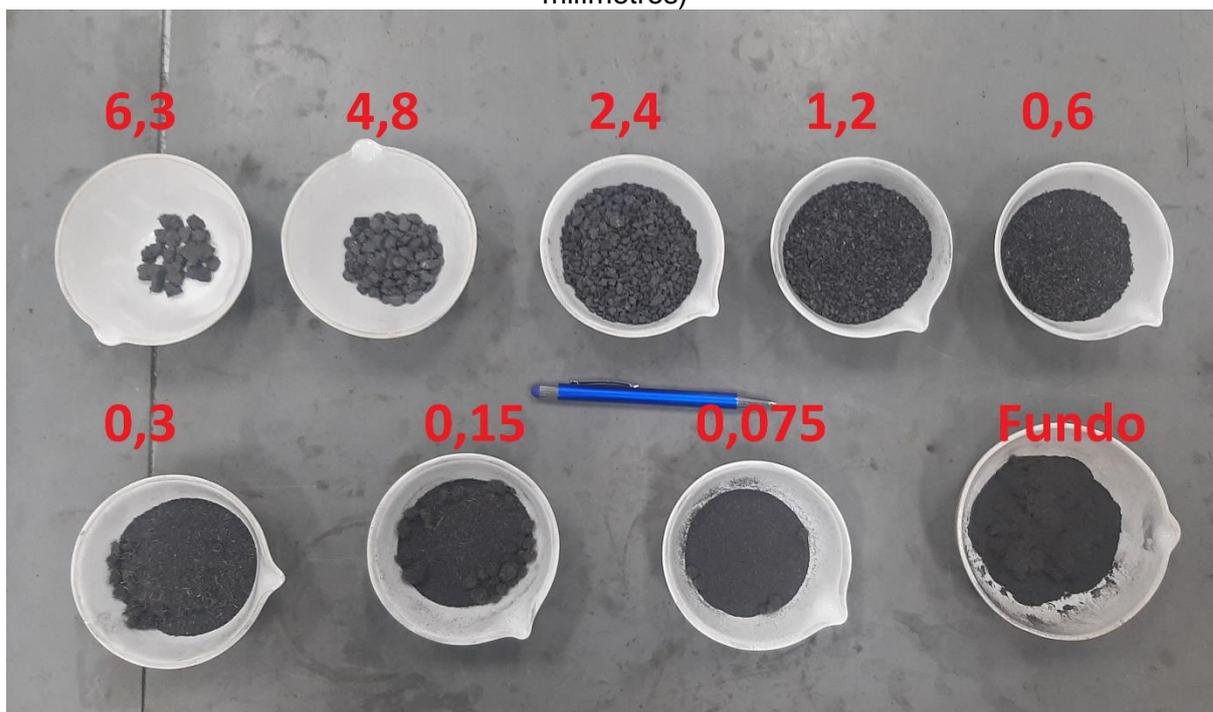
Após ensaios granulométricos das três etapas de trituração, os resíduos ficaram dispostos conforme as frações granulométricas apresentadas na Figuras 70 a 72.

Figura 70 – Separação granulométrica da 1ª etapa de trituração do resíduo (medidas em milímetros)



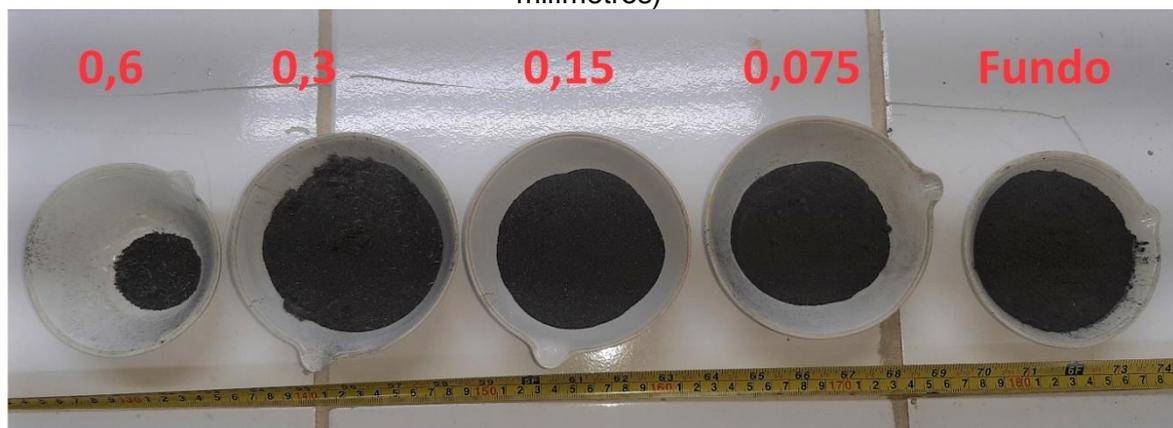
Fonte: Próprio autor.

Figura 71 – Separação granulométrica da 2ª etapa de trituração do resíduo (medidas em milímetros)



Fonte: Próprio autor.

Figura 72 – Separação granulométrica da 3ª etapa de trituração do resíduo (medidas em milímetros)



Fonte: Próprio autor.

A metodologia da caracterização das propriedades elétricas da lona de freio usada, encontra-se descrita no Item 3.1.2.4.

Para dosagem e preparo do CCA na forma de argamassa foram utilizados os resíduos decorrentes da 2ª e da 3ª etapa de redução granulométrica, pois se assemelharam a de agregados miúdos, enquanto que os resíduos da 1ª etapa se assemelharam a de agregados graúdos, ou seja, não aplicáveis a argamassas.

3.1.2.2 Requisitos, dosagem e preparo do CCA

O preparo do CCA na forma de argamassa (Figura 73), seguiu as especificações da ABNT NBR 16541 (2016). Contudo, a produção do CCA visou atender aos requisitos de argamassa armada, constantes da Tabela 12.

Figura 73 – Uso de argamassadeira (a) para preparo do CCA (b), bem como moldagem dos corpos de prova (c) em mesa de adensamento por queda (d)



Fonte: Próprio autor.

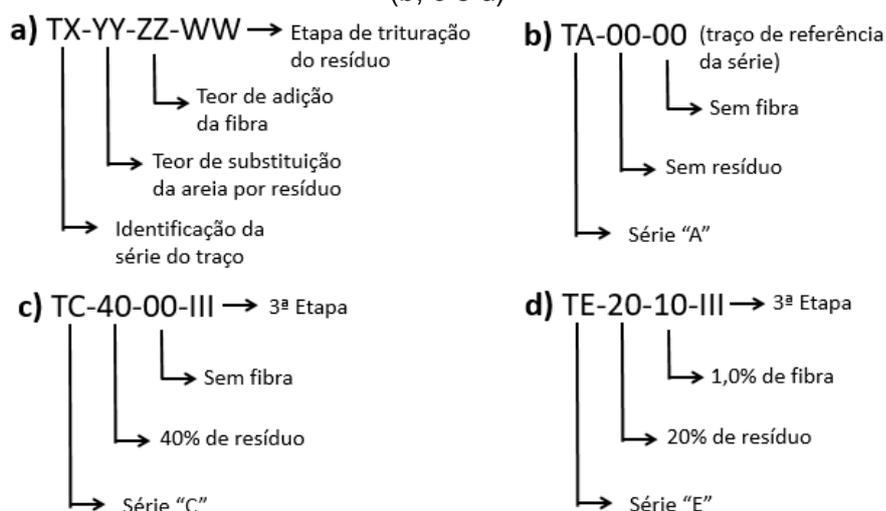
Tabela 12 – Requisitos normativos para classificação de argamassa armada da norma ABNT NBR 11173 (1990)

Requisito	Referência	Observação
Resistência à compressão	≥ 25 MPa	-
Índice de absorção no estado endurecido	≤ 8 %	-
Massa específica	> 1.800 kg/m ³	-
Relação água/cimento	$\leq 0,45$	-
Relação agregado/cimento	≤ 2	Em massa seca

Fonte: Próprio autor.

A nomenclatura dos traços seguiu o padrão estabelecido na Figura 74, levando-se em consideração o nome da série, o teor de substituição do agregado miúdo pelo resíduo de lona de freio, a adição de fibra de carbono em relação à massa de cimento e a etapa de redução granulométrica do resíduo.

Figura 74 – Estrutura da nomenclatura dos traços (a); exemplos de nomenclatura de traço (b, c e d)



Fonte: Próprio autor.

Como dosagem inicial (série "A") foi adotado como parâmetro o traço de Wang *et al.* (2017), por se tratar da única referência localizada na literatura, relativa à argamassa com incorporação de resíduo de material de fricção de freios. Nessa primeira série de traços (Tabela 13) foi utilizado o resíduo de lona de freio obtido na 2ª (II) etapa de trituração (dimensão máxima de 6,3 mm).

Tabela 13 – Traços da série "A" em relação à massa de cimento Portland

Traço	Cimento	Areia	Lona de freio	Água
TA-00-00	1	1	-	0,37
TA-05-00-II	1	0,95	0,05	0,37
TA-10-00-II	1	0,90	0,10	0,37
TA-15-00-II*	1	0,85	0,15	0,37

Traço	Cimento	Areia	Lona de freio	Água
TA-20-00-II*	1	0,80	0,20	0,37
TA-30-00-II*	1	0,70	0,30	0,37
TA-40-00-II*	1	0,60	0,40	0,37
TA-50-00-II*	1	0,50	0,50	0,37
TA-60-00-II*	1	0,40	0,60	0,37
TA-70-00-II*	1	0,30	0,70	0,37

*Traços extrapolados a partir de Wang *et al.* (2017).

Fonte: Próprio autor.

Na sequência, os traços da série “B”, também baseados em Wang *et al.* (2017), foram produzidos conforme Tabela 14, porém diferenciando-se da série anterior (“A”) devido à utilização do resíduo de lona de freio decorrente da 3ª (III) etapa de trituração (dimensão máxima de 0,6 mm). O uso de aditivo superplastificante se deu em função da menor granulometria do agregado nessa etapa de trituração, para garantia de uma trabalhabilidade mínima para moldagem e adensamento dos corpos de prova.

Tabela 14 – Traços da série “B” em relação à massa de cimento Portland

Traço	Cimento	Areia	Lona de freio	Água	Aditivo
TB-00-00	1	1	-	0,37	0,005
TB-10-00-III	1	0,90	0,10	0,37	0,005
TB-20-00-III*	1	0,80	0,20	0,37	0,005
TB-30-00-III*	1	0,70	0,30	0,37	0,005
TB-50-00-III*	1	0,50	0,50	0,37	0,005
TB-70-00-III*	1	0,30	0,70	0,37	0,005

*Traços extrapolados a partir de Wang *et al.* (2017)

Fonte: Próprio autor.

A reprodução do traço de Wang *et al.* (2017) colaborou para verificação do comportamento mecânico da argamassa produzida com resíduo de lona de freio. Contudo, a presente pesquisa teve por objetivo desenvolver argamassa estrutural baseada nos preceitos normativos brasileiros, o que ensejou o desenvolvimento de traços baseados nos limites máximos estabelecidos pela ABNT NBR 11173 (1990) para argamassas armadas. Esses traços seguiram a proporção de cimento:agregado:relação água/cimento (C:A:a/c) de 1:2:0,45, promovendo-se a substituição gradual da areia por resíduo de lona de freio obtido na 3ª etapa de trituração, conforme Tabela 15.

Tabela 15 – Traços da série “C” em relação à massa de cimento Portland

Traço	Cimento	Areia	Lona de freio	Água	Aditivo
TC-00-00	1	2	-	0,45	0,005
TC-20-00-III	1	1,60	0,40	0,45	0,005
TC-40-00-III	1	1,20	0,80	0,45	0,0075

Traço	Cimento	Areia	Lona de freio	Água	Aditivo
TC-60-00-III	1	0,80	1,20	0,45	0,0125
TC-80-00-III	1	0,40	1,60	0,45	0,02
TC-100-00-III	1	-	2	0,45	0,02

Fonte: Próprio autor.

Ainda baseados nos limites máximos estabelecidos pela ABNT NBR 11173 (1990), foram desenvolvidos traços (Tabela 16) baseados nos percentuais de adição de fibra de carbono e comprimento da fibra (3,00 mm) utilizados por Baeza *et al.* (2013) e Wang e Aslani (2021a), que pesquisaram propriedades elétricas em compósitos cimentícios com adição de fibra de carbono.

A incorporação de aditivo superplastificante, seguiu o critério dos pesquisadores Donnini, Bellezze e Corinaldesi (2018), ou seja, utilizar o mesmo percentual que o de fibras de carbono.

A produção e análise dos traços da série “D” teve por objetivo identificar as propriedades do referido compósito, em especial as de cunho elétrico, com o traço e os materiais (cimento e areia) utilizados na presente pesquisa, de forma preliminar à combinação da fibra com o resíduo de lona de freio.

Tabela 16 – Traços da série “D” em relação à massa de cimento Portland com adição da fibra de carbono

Traço	Cimento	Areia	Lona de freio	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: Próprio autor.

Para os traços da série “D” que continham fibra de carbono, os procedimentos de produção da argamassa preconizados na norma ABNT NBR 16541 (2016), foram alterados para garantir uma melhor homogeneidade da argamassa, conforme etapas a seguir:

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;

A partir dos resultados obtidos com os traços das séries “A” a “D”, foi feita a combinação do resíduo de lona de freio com fibra de carbono, conforme traço da série “E” apresentado na Tabela 17.

Tabela 17 – Traços da série “E” em relação à massa de cimento Portland com substituição da areia por resíduo e adição da fibra de carbono

Traço	Cimento	Areia	Lona de freio	Fibra de Carbono	Água	Aditivo
TE-00-00*	1	2	-	-	0,45	-
TE-10-00-III	1	1,80	0,20	-	0,45	-
TE-20-00-III	1	1,60	0,40	-	0,45	-
TE-40-00-III	1	1,20	0,80	-	0,45	-
TE-20-08-III	1	1,60	0,40	0,008	0,45	0,008
TE-20-10-III	1	1,60	0,40	0,010	0,45	0,010
TE-40-08-III	1	1,2	0,80	0,008	0,45	0,008
TE-40-10-III	1	1,2	0,80	0,010	0,45	0,010

*equivalente a TD-00-00

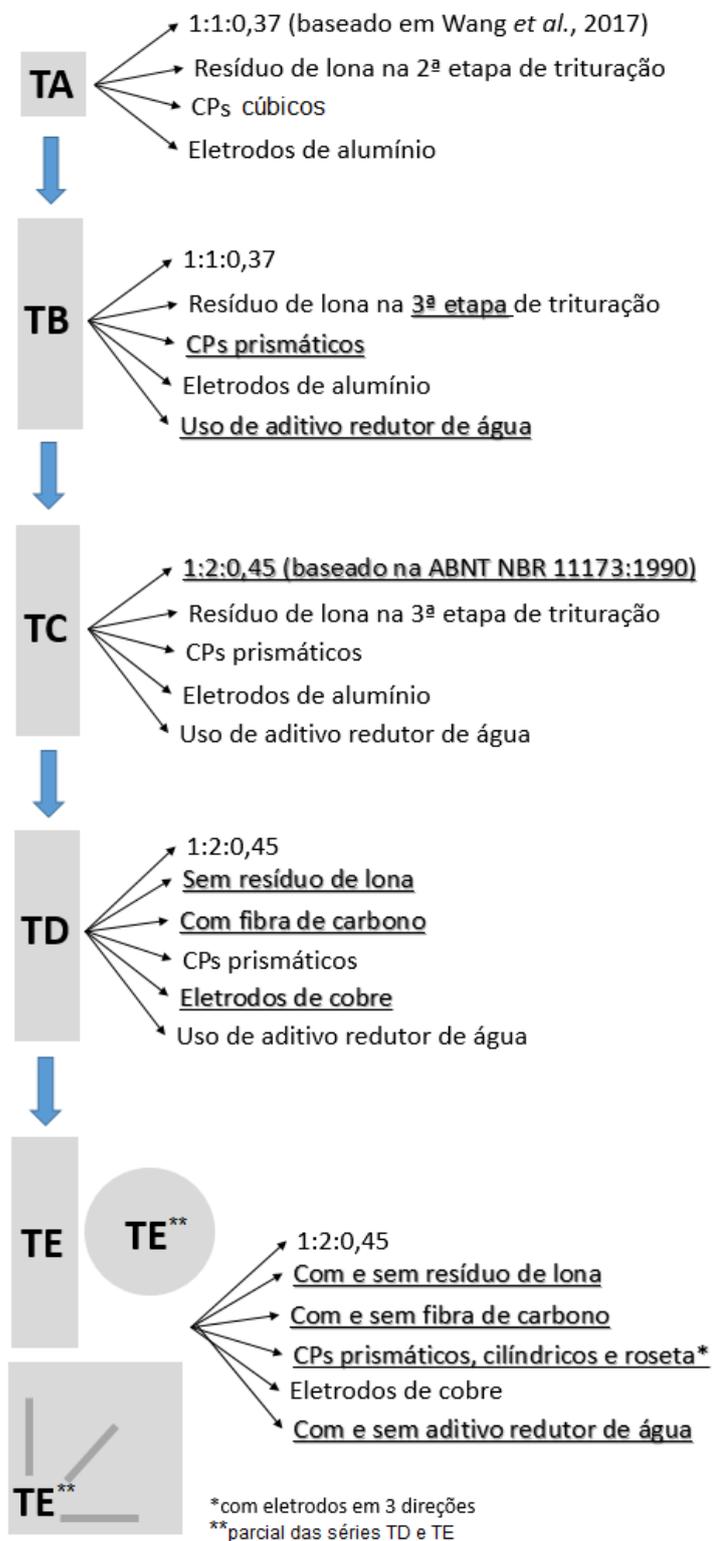
Fonte: Próprio autor.

No caso dos traços da série “E” que continham resíduo e fibra, os procedimentos de produção da argamassa preconizados na norma ABNT NBR 16541 (2016), foram alterados para garantir uma melhor homogeneidade da argamassa, conforme etapas a seguir:

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;
4. Incorporação do resíduo de lona de freio, seguido de mistura mecânica por 2 minutos.

A Figura 75 destaca as principais diferenças entre cada uma das séries de traços da pesquisa. Visando conferir menor resistência elétrica entre a argamassa e os eletrodos, a partir da série “D”, os mesmos deixaram de ser de alumínio e passaram a ser de cobre.

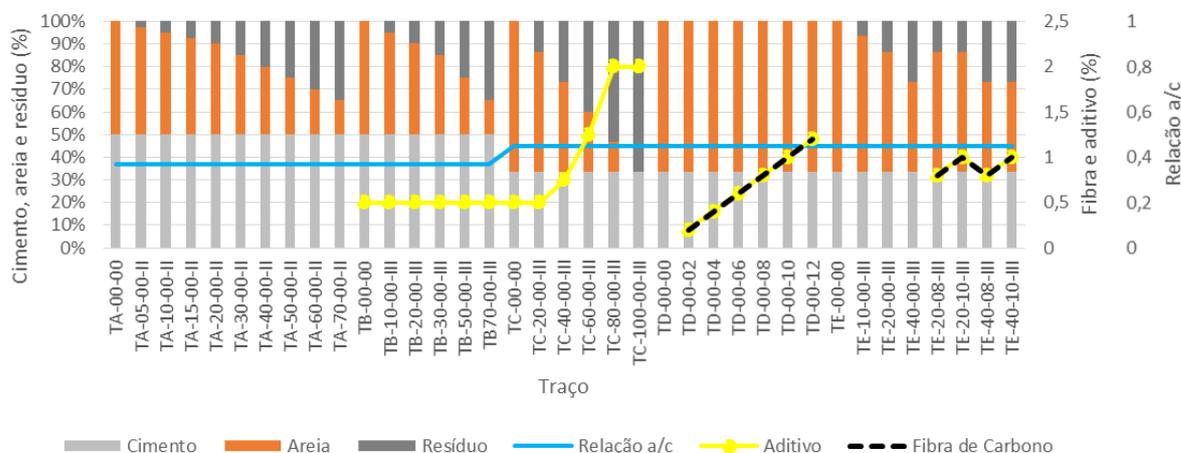
Figura 75 – Sequência de produção dos traços por série com destaque (sublinhado) das principais diferenças e seus corpos de prova (CPs)



Fonte: Próprio autor.

Os traços das Tabelas 13 a 17 são apresentados de forma gráfica na Figura 76, em relação ao percentual total da massa anidra, para uma melhor visualização em comparação entre os diferentes traços e suas séries.

Figura 76 – Composição da massa anidra da argamassa, relação a/c, aditivo e fibra de carbono dos traços das séries “A” a “E”



Fonte: Próprio autor.

Os procedimentos de cura e desmoldagem seguiram os parâmetros estabelecidos na ABNT NBR 13279 (2005), ou seja, cura nas condições de temperatura de 23 ± 2 °C, umidade relativa do ar de $60 \pm 5\%$ em câmara úmida e desmoldagem em 48 ± 24 horas.

Os corpos de prova foram moldados nas dimensões e finalidades especificadas na Tabela 18, na quantidade de pelo menos 3 corpos por traço.

Tabela 18 – Tipos de corpos de prova de CCAs e finalidades das análises

Formato e dimensões	Finalidade	Norma técnica
Cúbico, 40 x 40 x 40 mm ³	Resistência à compressão aos 28 dias	ABNT NBR 16868-2 (2020)
Prismático, 40 x 40 x 160 mm ³	Determinação da densidade de massa aparente	ABNT NBR 13280 (2005)
	Determinação do módulo de elasticidade dinâmico	ABNT NBR 15630 (2008) e ABNT NBR 8522-2 (2021)
	Determinação da absorção de água, índice de vazios e massas específicas	ABNT NBR 9778 (2005)
	Resistência à tração na Flexão aos 7 e 28 dias	ABNT NBR 13279 (2005)
Resultante da quebra do prismático, 40 x 40 x 160 mm ³	Resistência à compressão aos 7 e 28 dias	ABNT NBR 13279 (2005)
Cúbico, 40 x 40 x 40 mm ³ c/ 4 eletrodos e prismático, 40 x 40 x 160 mm ³ c/ 4 eletrodos	Condutividade elétrica	-
	Piezorresistividade à compressão	-
Cilíndrico, $\phi=100$ mm x h=40 mm c/ 4 eletrodos	Piezorresistividade à tração	-
Prismático, 125 x 125 x 40 mm c/ 12 eletrodos (roseta)	Piezorresistividade à compressão	-

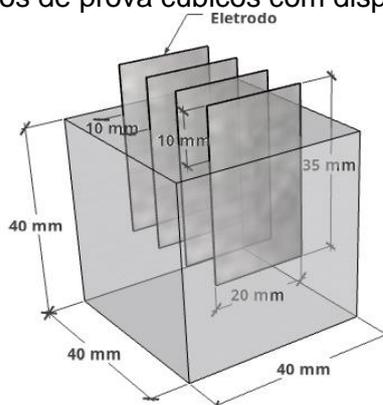
Fonte: Próprio autor.

Nos corpos de provas utilizados para análises de propriedades elétricas e piezorresistividade, foram empregados eletrodos metálicos em chapas de alumínio

(traços das séries “A” a “C”) ou cobre (traços das séries “D” e “E”), com espessura de aproximadamente 0,1 mm adotada por Carísio *et al.* (2021), com largura de 20,0 mm, distanciados entre si em 1,0 cm (Liu *et al.*, 2022), 2,0 cm (Nalon *et al.*, 2020; Carísio *et al.*, 2021) 3,0 cm (Buasiri *et al.*, 2019; Qi *et al.*, 2023), em função do tipo do corpo de prova e da quantidade de eletrodos utilizados no processo de medição de grandezas elétricas.

Corpos de prova cúbicos já foram utilizados para medição de condutividade elétrica em CCA conforme descrito na literatura (Dehghani; Aslani, 2021b; Yoo; You; Lee, 2017). Nesta pesquisa os corpos de prova cúbicos tiveram os eletrodos dispostos conforme Figura 77, para o traço inicial (série “A”).

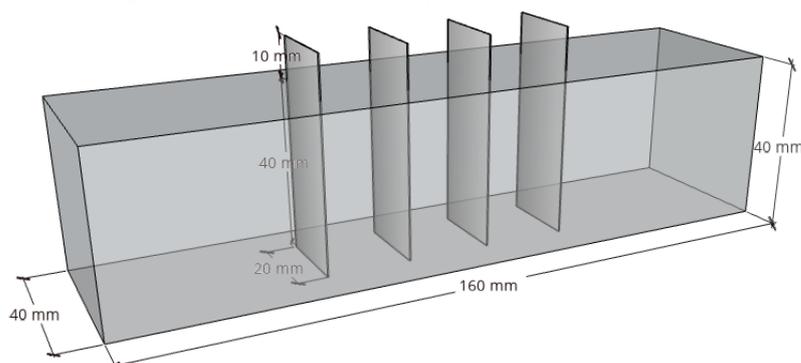
Figura 77 – Ilustração de corpos de prova cúbicos com disposição de 4 eletrodos embutidos



Fonte: Próprio autor.

Também foram utilizados corpos de prova prismáticos nas dimensões de 40 x 40 x 160 mm³ (Figura 78), também já utilizados nessas mesmas dimensões, conforme reportado na literatura, para medições de grandezas elétricas em compósitos cimentícios (Dehghani; Aslani, 2021b; Donnini; Bellezze; Corinaldesi, 2018).

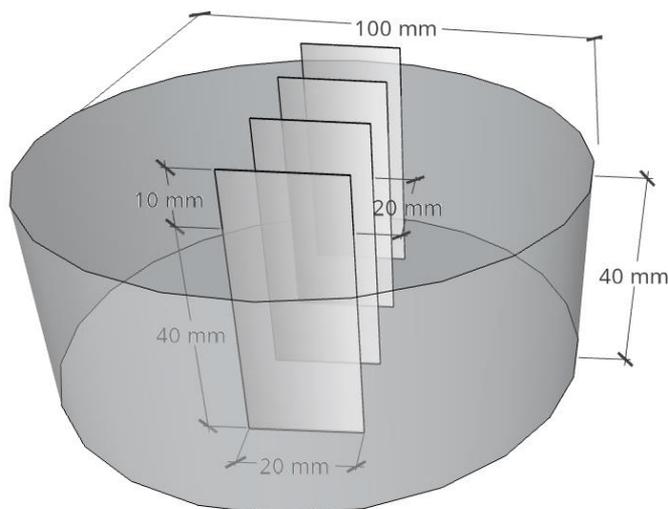
Figura 78 – Ilustração do corpo de prova prismático com 4 eletrodos embutidos



Fonte: Próprio autor.

A análise de piezorresistividade à tração, foi realizada por meio de adaptação do ensaio de resistência à tração por compressão diametral da norma ABNT NBR 7222 (2011), já empregado em outras pesquisas de piezorresistividade (Kadhim *et al.*, 2021), em corpos de prova cilíndricos com diâmetro 100 mm, mediante a inserção dos eletrodos metálicos (Figura 79).

Figura 79 – Ilustração do corpo de prova cilíndrico com 4 eletrodos

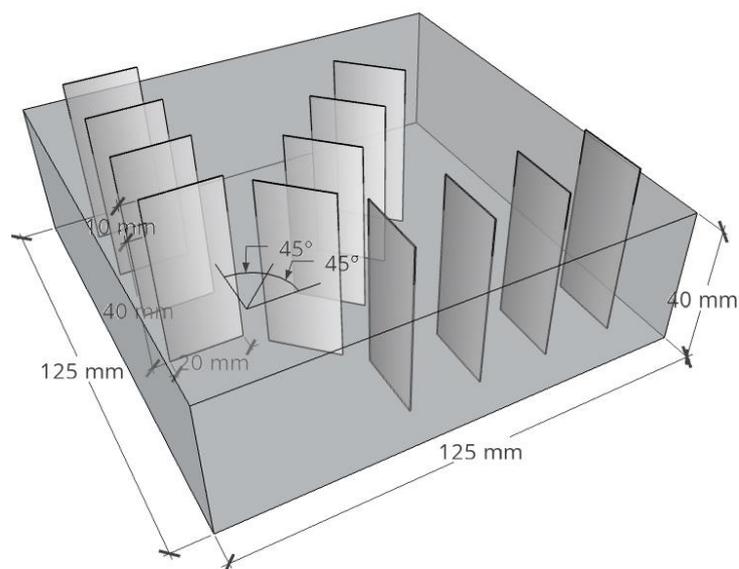


Fonte: Próprio autor.

Assumindo a argamassa como um compósito isotrópico (Cecchi; Sab, 2004; Pei *et al.*, 2019), bem como em razão da escassez de padronização internacional e da ausência de normatização brasileira para realização de ensaio de resistência ao cisalhamento em argamassas, não foi realizado para avaliação da piezorresistividade sob ação deste tipo de esforço.

Contudo, para análise das deformações em várias direções, de forma a emular um extensômetro do tipo roseta, o qual tem por finalidade medir deformações em três direções conhecidas (0° , 45° e 90°), para que sejam conhecidas as deformações normais principais e deformações máximas de cisalhamento, foram produzidos corpos de prova com eletrodos dispostos conforme Figura 80. Tal proposta se deu pelo fato de que não foi encontrado na literatura aplicação como esta, ou seja, do tipo roseta em CCA. Os poucos registros de medições em mais de uma direção encontrados na literatura (Wen; Chung, 2007; Wang *et al.*, 2023), referem-se a medições realizadas em apenas duas direções (0° e 90°).

Figura 80 – Ilustração do corpo de prova prismático com 12 eletrodos tipo roseta



Fonte: Próprio autor.

As fotos dos corpos de prova com eletrodos constam das Figuras B1 a B7, do Apêndice B.

3.1.2.3 Ensaio do CCA no estado fresco e endurecido

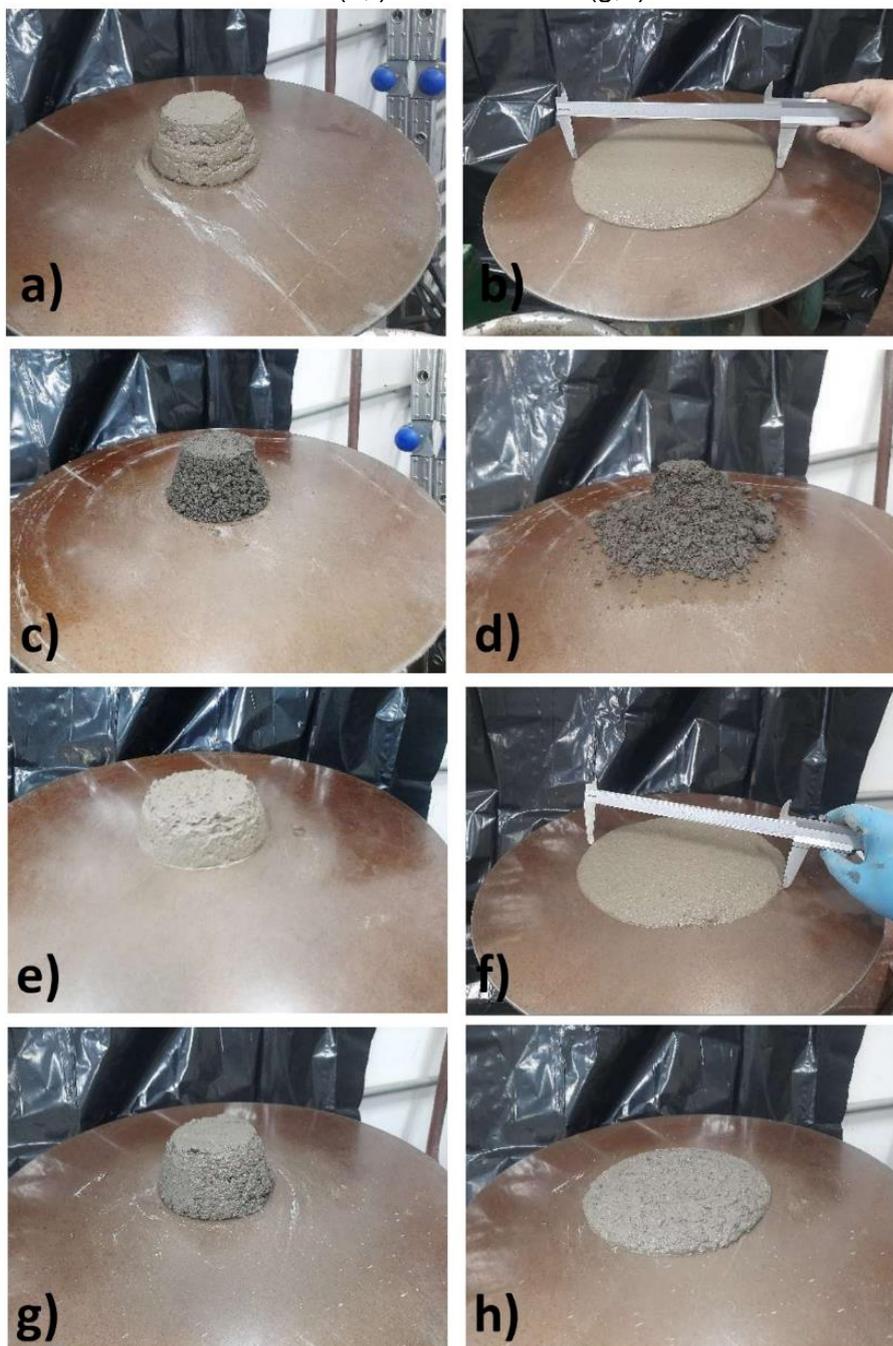
O CCA na forma de argamassa no estado fresco foi caracterizado quanto ao seu Índice de consistência (Figura 81) conforme norma ABNT NBR 13276 (2016). No estado endurecido o CCA foi caracterizado mediante os parâmetros físico-mecânicos elencados na Tabela 19.

Tabela 19 – Parâmetros e normas técnicas utilizados para caracterização do CCA na forma de argamassa no estado endurecido

Parâmetro	Norma técnica
Resistência à compressão aos 7 e 28 dias	ABNT NBR 13279 (2005) e ABNT NBR 16868-2 (2020)
Resistência à tração na Flexão aos 7 e 28 dias	ABNT NBR 13279 (2005)
Densidade de massa aparente	ABNT NBR 13280 (2005)
Módulo de elasticidade dinâmico por onda ultrassônica	ABNT NBR 15630 (2008)
Módulo de elasticidade dinâmico pelo método das frequências naturais de vibração	ABNT NBR 8522-2 (2021)
Fator de amortecimento	-
Absorção de água, índice de vazios e massas específicas	ABNT NBR 9778 (2005)

Fonte: Próprio autor.

Figura 81 – Ensaio de Índice de consistência. Traço TE-00-00 (a;b), TE-40-00-III (c;d), TE-00-08 (e;f) e TE-20-10-III (g;h)



Fonte: Próprio autor.

Os valores de resistência à compressão ($R_{\text{compr.}}$) e resistência à tração na flexão ($R_{\text{flex.}}$), foram determinados respectivamente por meio das equações 27 e 28, pelo software do equipamento.

$$R_{\text{compr.}} = \frac{F_c}{1600}$$

(27)

Onde:

F_c é a carga máxima aplicada (corpo de prova).

$$R_{\text{flex.}} = \frac{1,5 F_f L}{40^3} \quad (28)$$

Onde:

F_f é a carga aplicada verticalmente no centro do prisma (corpo de prova);

L é a distância entre os suportes (apoios).

A Figura 82 apresenta os ensaios de resistência à tração na flexão e de resistência à compressão em corpos de prova com 28 dias de idade, realizados na máquina de ensaios modelo 23-600, da marca EMIC/Instron.

Figura 82 – Ensaio de resistência à tração na flexão (a) e resistência à compressão de corpos de prova de argamassas (b)



Fonte: Próprio autor.

De acordo com norma técnica ABNT NBR 13280 (2005), a densidade de massa aparente (ρ_{ap}) foi determinada por meio do uso de balança de precisão (modelo AS 5500C, da marca Marte, com precisão de 0,01 g) e paquímetro, conforme Figura 83, mediante uso da Equação 29.

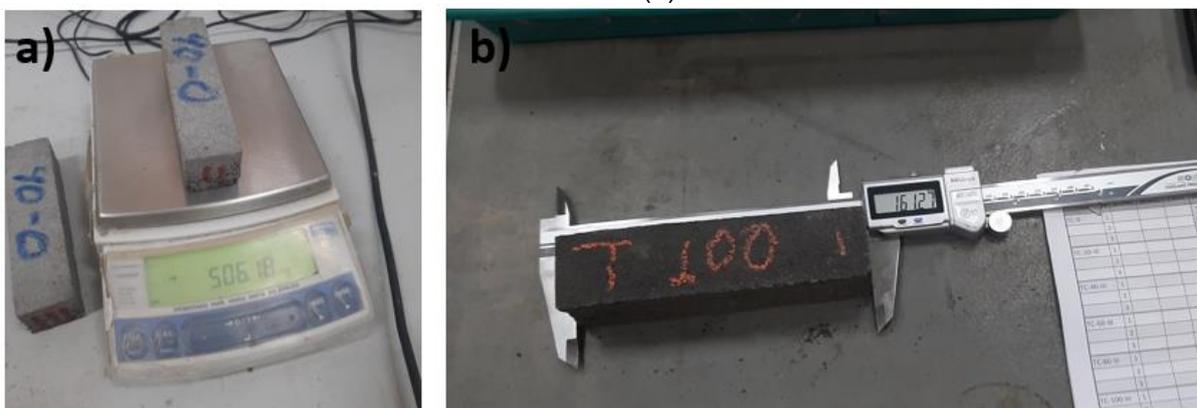
$$\rho_{ap} = \frac{m}{v} \quad (29)$$

Onde:

m é a massa do corpo de prova;

v é o volume do corpo de prova.

Figura 83 – Ensaio de determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Determinação da massa (a) e medição de dimensão para determinação do volume (b)



Fonte: Próprio autor.

Para realização do ensaio de módulo elasticidade dinâmico (E_d) por propagação de onda ultrassônica, foi utilizado o equipamento modelo USLab da marca Agricef, com os dois transdutores (transmissor e receptor) mostrados na Figura 84, acoplados ao referido equipamento. O valor do módulo foi determinado por meio da Equação 30.

$$E_d = v^2 \rho_{ap} \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{1 - \mu} \quad (30)$$

Onde:

v é a velocidade de propagação da onda ultrassônica;

ρ_{ap} é a densidade de massa aparente;

μ é o coeficiente de Poisson, adotado 0,2 (ABNT, 2008).

Figura 84 – Ensaio de módulo elasticidade dinâmico por ultrassonografia em corpos de prova de argamassa



Fonte: Próprio autor.

A determinação do módulo de elasticidade dinâmico pelo método das frequências naturais de vibração e do Fator de amortecimento, se deram por meio do equipamento modelo Sonelastic (Figura 85) da empresa ATCP Engenharia Física. O valor do módulo flexional e longitudinal foram determinados por meio das Equações 31 e 32 (ATCP do Brasil, 2022), pelo software do equipamento.

$$E_{flex} = 0,9465(mf_f^2/b)(L^3/t^3)T_1 \quad (31)$$

$$E_{long} = 4mf_t^2[L/(btK)] \quad (32)$$

Onde:

E_{flex} é o módulo de elasticidade flexional;

E_{long} é o módulo de elasticidade longitudinal;

m é a massa aparente do corpo de prova;

b é a altura do corpo de prova;

L é o comprimento do corpo de prova;

t é a espessura do corpo de prova;

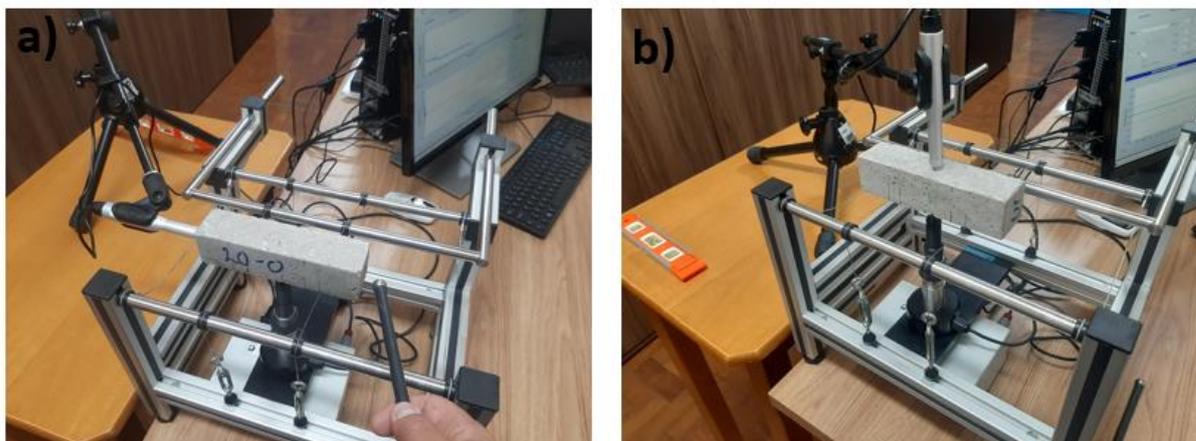
f_f é a frequência fundamental para o corpo de prova no modo de flexão;

T_1 é o fator de correção

f_1 é a frequência fundamental para o corpo de prova no modo longitudinal;

K é o fator de correção

Figura 85 – Ensaio de medição das frequências naturais de vibração longitudinais (a) e flexionais (b)



Fonte: Próprio autor.

Para determinação das massas específicas seca (ρ_s), saturada (ρ_{sat}) e real (ρ_r), bem como Índice de vazios permeáveis (I_v) e teor de absorção de água (A), foram utilizados os equipamentos da Figura 83, bem como secagem em estufa por 72 h à 105 ± 5 °C e imersão dos corpos de prova durante 5 h em água em ebulição (Figura 86), para saturação dos mesmos, visando a pesagem em balança hidrostática (Figura 87). Tais propriedades foram determinadas por meio das Equações 33 a 37.

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \quad (33)$$

$$\rho_{sat} = \frac{m_{sat}}{m_{sat} - m_i} \quad (34)$$

$$\rho_r = \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad (35)$$

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} 100 \quad (36)$$

$$A = \frac{m_{\text{sat}} - m_s}{m_s} 100$$

(37)

Onde:

m_s é a massa seca em estufa;

m_{sat} é a massa saturada;

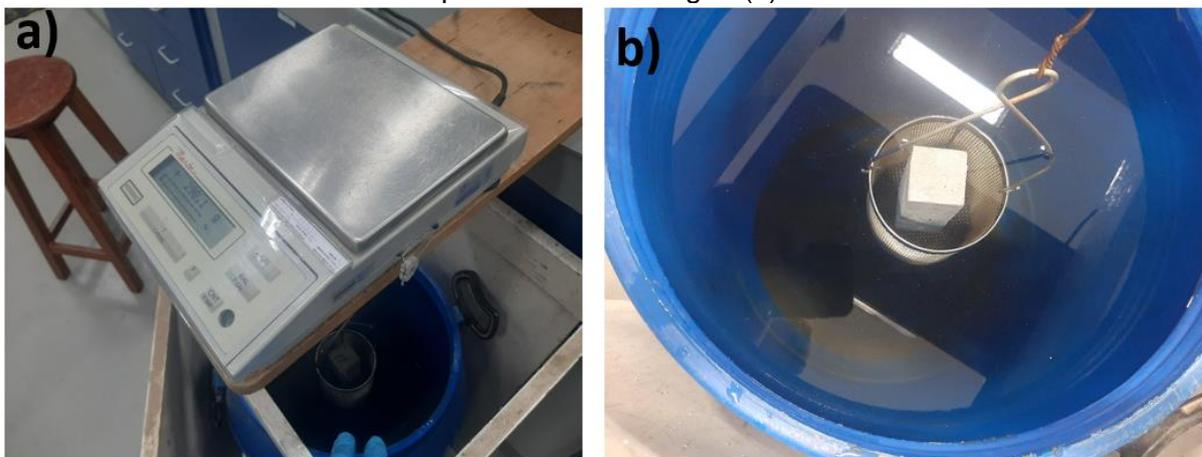
m_i é a massa imersa em água.

Figura 86 – Imersão de corpos de prova em água (a) com ebulição por 5 h (b) para determinação de m_{sat} e m_i



Fonte: Próprio autor.

Figura 87 – Ensaio de determinação de massa em balança hidrostática (a) com corpo de prova imerso em água (b)

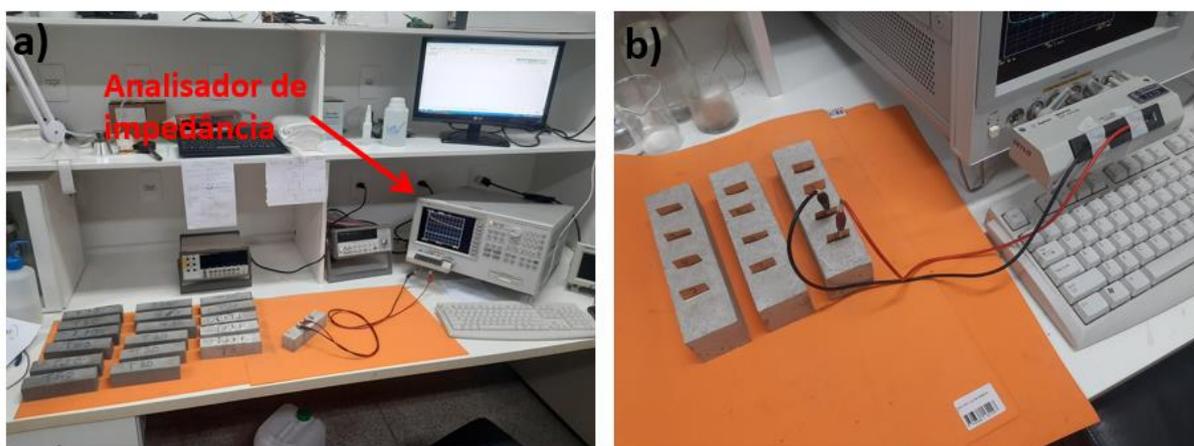


Fonte: Próprio autor.

3.1.2.4 Determinação de propriedades elétricas e piezorresistividade

Foram obtidas as grandezas de impedância elétrica (Z) e ângulo de fase (θ), por meio de um analisador de impedância modelo 4294A da marca Agilent, conforme Figuras 88 e 89. As medições foram realizadas em frequências de 40 Hz (mínimo do equipamento) a 1 MHz (Segura *et al.*, 2019; Belli *et al.*, 2020), numa amplitude de 1,00 volt, com registro de 800 leituras nesse intervalo de frequências.

Figura 88 – Uso do analisador de impedância elétrica (a) para medição de propriedades elétricas nos corpos de prova (b)

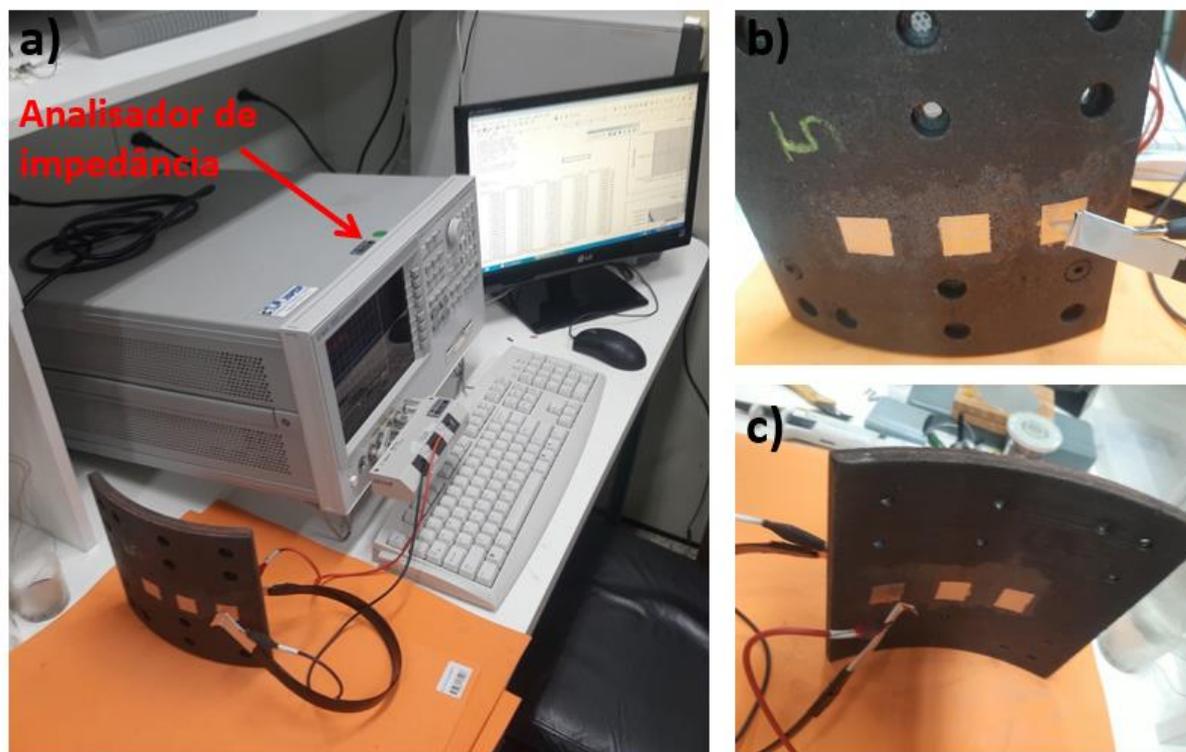


Fonte: Próprio autor.

Tanto nas medições de propriedades elétricas, como nas de piezorresistividade elétrica, os corpos de prova foram ensaiados com idade ≥ 28 dias, bem como após secagem em estufa (temperatura de 105 ± 5 °C) por 24 horas (Nalon *et al.*, 2021).

No caso da análise de propriedades elétricas das lonas de freio, apenas a amostra de lona de freio “5” (dentre as 8 amostras da Figura B9 do Apêndice B) não apresentou continuidade no limite de 50Ω no teste com o multímetro. Com isto, foi possível efetuar a avaliação por meio do analisador de impedâncias (Figura 89). Foram criados 3 pares (frente e verso) de pontos de contatos com tinta condutora (Figuras 89b e 89c), pigmentada com flocos de cobre revestidos de prata, modelo 843WB da marca MG Chemicals.

Figura 89 – Medição de impedância elétrica e ângulo de fase da amostra de lona de freio usada n.º 5 (a). Pontos de contato com tinta condutora na frente (b) e verso (c) da lona

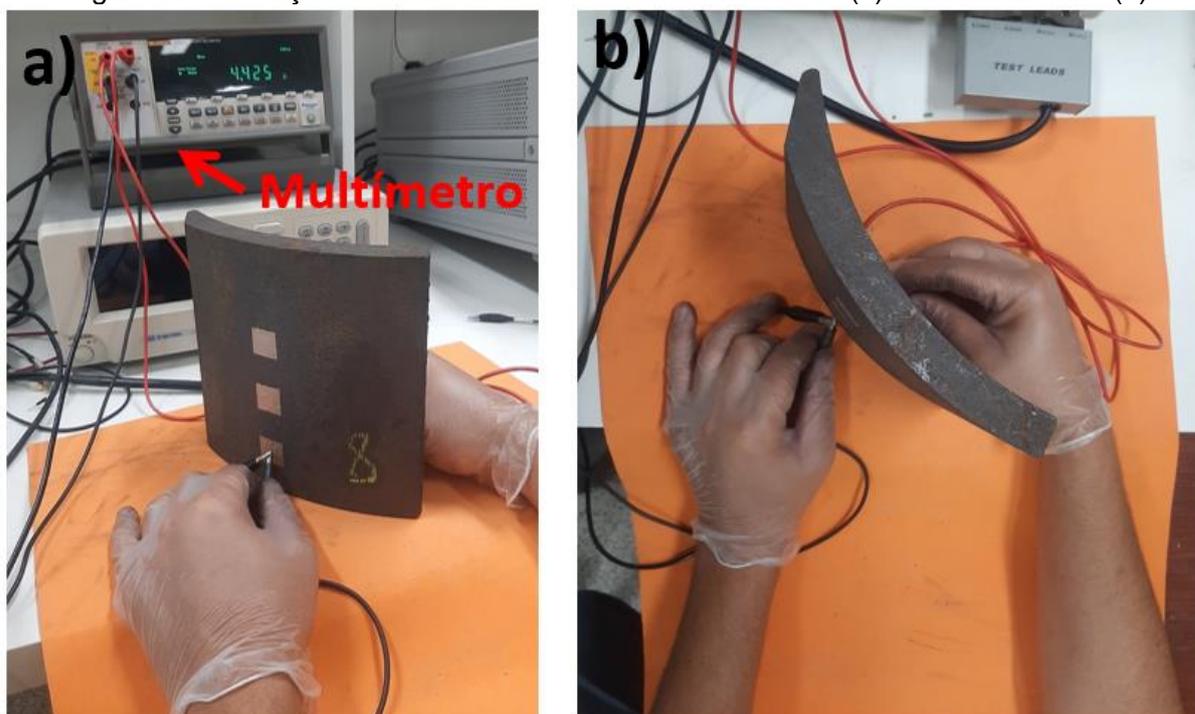


Fonte: Próprio autor.

A partir da medição de impedância elétrica (Z) e ângulo de fase (θ), foram determinadas as seguintes grandezas: resistividade elétrica (ρ), condutividade elétrica (σ_e), impedância imaginária (Z'') e resistência elétrica (R), respectivamente conforme Equações 2, 4, 18 e 19. Tais grandezas foram utilizadas para, dentre outras questões na elaboração dos diagramas de *Nyquist* e *Bode*.

As lonas de freio (amostras 1 a 8), tiveram sua resistência elétrica (R) determinada diretamente por meio do multímetro modelo 8808A da marca Fluke, utilizado na função ohmímetro (Figura 90).

Figura 90 – Medição de resistência elétrica com multímetro (a) em lona de freio (b)



Fonte: Próprio autor.

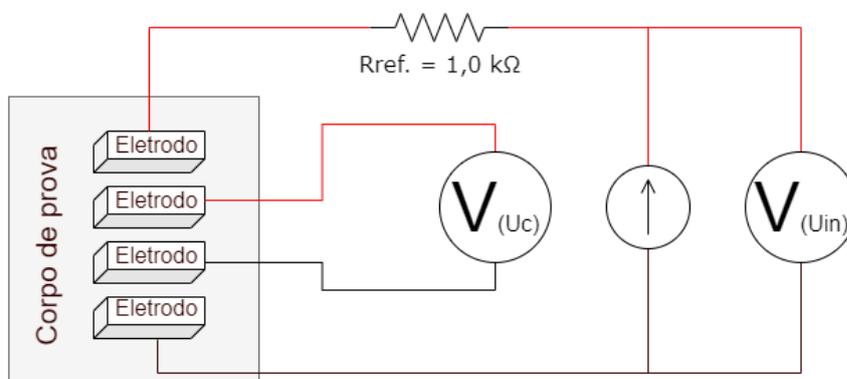
Também foi verificado se as amostras de lona de freio apresentavam comportamento ôhmico, por meio da medição de corrente elétrica (I) e voltagem (U), mediante uso do circuito da Figura 32a, baseado no experimento de Borges, Gabriel e Salem (2006). O circuito foi alimentado em CC com uma variação de 1,5 volts (aproximadamente de 0,5 a 2,0 volts) por uma fonte de bancada modelo SKFA-05D, da marca Skill-Tec. As grandezas elétricas (I e U), foram obtidas por meio do uso de multímetro modelo 179 da marca Fluke.

As análises de piezorresistividade foram realizadas com circuito (Figura 91) alimentado por uma tensão de 5,00 volts (Dong *et al.*, 2022; Nalon *et al.*, 2021; Carísio *et al.*, 2021), com um resistor de referência de 1 k Ω (Birgin *et al.*, 2020; Nalon *et al.*, 2021; Demirciloglu *et al.*, 2022). O resistor de referência selecionado contou com uma tolerância de 0,1% e coeficiente de variação da resistência elétrica com a temperatura (TCR^7) de 25 ppm, do tipo *metal film*. O resistor foi utilizado para determinação da resistência elétrica (R), conforme Equação 25. Foi utilizada alimentação em corrente contínua no circuito de medição de piezorresistividade, que necessitou de um sistema

⁷ do inglês *temperature coefficient of resistance*.

de aquisição de dados (*DAQ*⁸) de múltiplos canais, o qual somente aquisitava corrente contínua, o que é típico desses sistemas.

Figura 91 – Esquema do circuito elétrico para medição de resistência elétrica



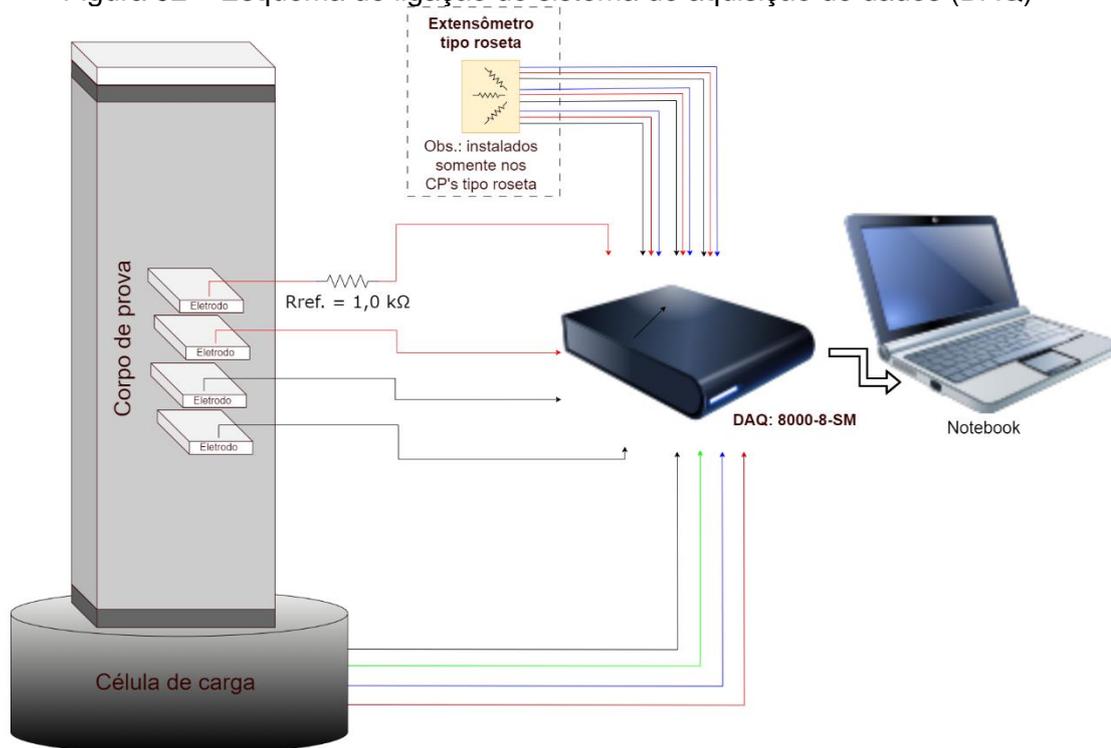
Fonte: Próprio autor.

O sistema de aquisição contou com o uso equipamento modelo 8000-8-SM da marca Micro-Measurements.

Nos ensaios de piezorresistividade foram adquiridos simultaneamente (Figura 92), numa taxa de 10 Hz, as leituras de voltagem (a partir dos eletrodos dos corpos de prova), força de compressão (mediante uso de célula de carga) e deformação específica (ϵ) (mediante uso de extensômetros) no caso dos corpos de prova (CPs) tipo “roseta” das séries “D” (parcial) e “E” (parcial).

⁸ do inglês *data acquisition*.

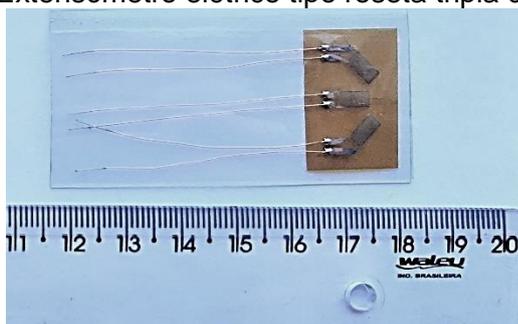
Figura 92 – Esquema de ligação do sistema de aquisição de dados (DAQ)



Fonte: Próprio autor.

A medição de deformação específica (ϵ) no caso dos corpos de prova da Figura 80, foi realizada mediante o uso de extensômetros de resistência elétrica do tipo roseta tripla de 0, 45 e 90°, modelo PA-06-250RB-120-L (Figura 93), da marca Excel Sensores, com fator de sensibilidade (FS) de 2,12.

Figura 93 – Extensômetro elétrico tipo roseta tripla de 0, 45 e 90°



Fonte: Próprio autor.

A foto dos corpos de prova com os extensômetros constam na Figura B8 do Apêndice B.

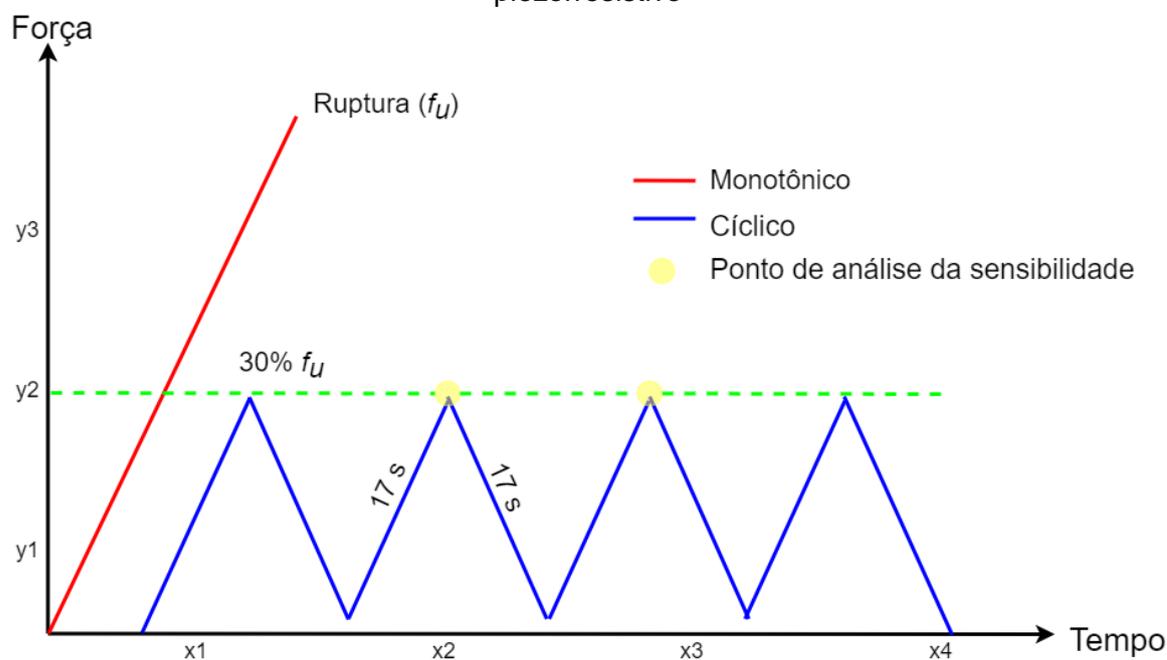
As medições de tensão elétrica (voltagem) somente foram realizadas após a estabilização do efeito de polarização, conforme prática observada na literatura (Ding

et al., 2022; Nalon *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2022; Rao; Sasmal, 2022). Tal estabilização ocorria entre 1 a 10 minutos, a depender do traço/composição do corpo de prova.

Os ensaios de piezorresistividade foram realizados com carregamento cíclicos e monotônicos (Song *et al.*, 2021; Frac *et al.*, 2022; Cholker; Tantray, 2019; Qiu *et al.*, 2021), conforme Figura 94. No caso dos carregamentos cíclicos os mesmos foram limitados a 30% da resistência de ruptura do CCA (ABNT NBR 8522-1, 2021; Nalon *et al.*, 2021). Essa limitação foi calculada a partir da menor resistência à compressão de cada traço no caso das séries “B” a “D”. No caso dos CPs cilíndricos e tipo roseta (com os respectivos eletrodos), foi rompido um de cada traço para cálculo da referida limitação.

A duração de 17 segundos das rampas de carregamento e de descarregamento foi baseada em Tian *et al.* (2022). Os carregamentos monotônicos foram aplicados até a ruptura, os quais foram realizados nos corpos de provas cilíndricos e tipo roseta das séries “D” (parcial) “E” (parcial), seguindo respectivamente os padrões de ensaios das normas ABNT NBR 7222 (2011) e ABNT NBR 13279 (2005).

Figura 94 – Ilustração esquemática da aplicação dos carregamentos de ensaio piezorresistivo



Fonte: Próprio autor.

Para análise dos resultados dos ensaios de piezorresistividade, foram comparados os valores de variação de força de compressão (f_c) e variação de voltagem (ΔU), conforme Equação 38 (Shahzad *et al.*, 2022), também praticado por outros

pesquisadores (Ferdiansyah, Balayssac e Turatsinze, 2022; Segura *et al.*, 2019). Tal análise se deu de forma gráfica, bem como por correlação numérica, conforme detalhado na seção de análise estatística (Item 3.1.2.6). Além dessa análise, foi determinada a sensibilidade (SS) por tensão de compressão (σ), a partir da mudança fracionária de resistividade elétrica (FCR), conforme Equações 39 e 40, baseadas na literatura (Kim *et al.*, 2021; Franç *et al.*, 2022).

$$\Delta U = (U_n - U_0) \quad (38)$$

Onde:

U_n é a leitura de voltagem no instante “n” ($n \geq 0$);

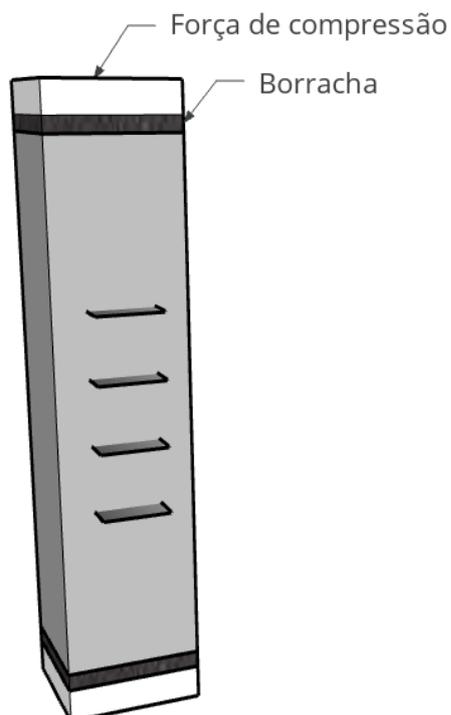
U_0 é a primeira (inicial) leitura de voltagem no instante “0” (zero).

$$FCR = \frac{\Delta \rho}{\rho_0} \quad (39)$$

$$SS = \frac{FCR}{\sigma} \quad (40)$$

Os ensaios de piezorresistividade à compressão foram realizados em corpos de prova prismáticos, cilíndricos e retangulares (tipo roseta), respectivamente conforme Figuras 95 a 100, os quais foram isolados da máquina de ensaios (modelo 23-600 da marca EMIC/Instron), mediante aplicação de camada de borracha rígida nas extremidades dos corpos de prova, visando isolar a passagem de corrente elétrica entre os corpos de prova e a máquina de ensaio.

Figura 95 – Corpo de prova prismático no ensaio de piezorresistividade à compressão



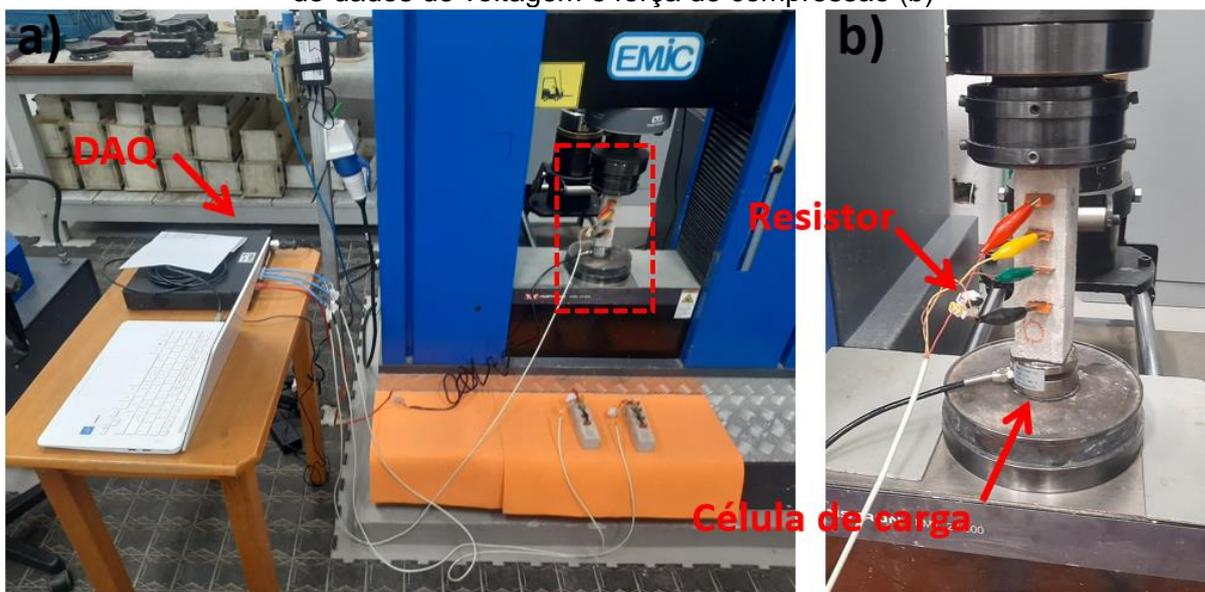
Fonte: Próprio autor.

No caso do carregamento cíclico, além da limitação de cargas a 30% da força de ruptura, também foi limitado à carga crítica de Euler (P_{cr}) conforme Equação 41, determinada em função do Módulo de Elasticidade (E), do Momento de Inércia (I) e do comprimento efetivo de flambagem (L_{ef}), de modo que não ocorresse flambagem, tendo em vista a esbeltez do corpo de prova prismático. Entretanto nenhum valor de P_{cr} foi igual ou menor que 30% da força de ruptura do CCA.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(L_{ef})^2}$$

(41)

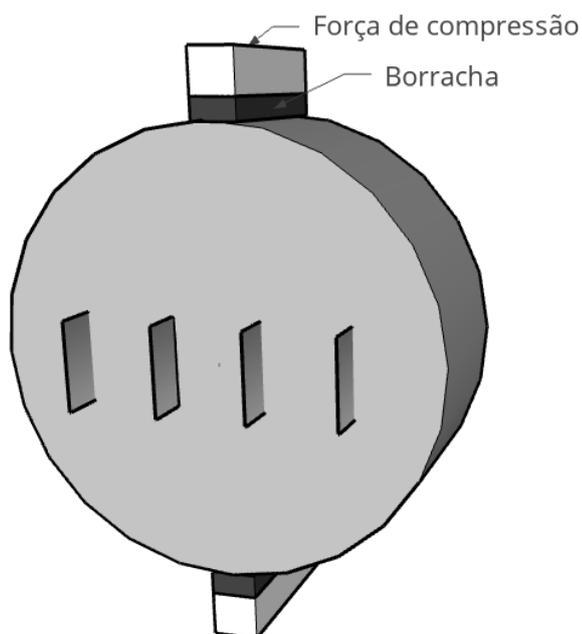
Figura 96 – Ensaio de piezorresistividade em corpos de prova prismáticos (a) com aquisição de dados de voltagem e força de compressão (b)



Fonte: Próprio autor.

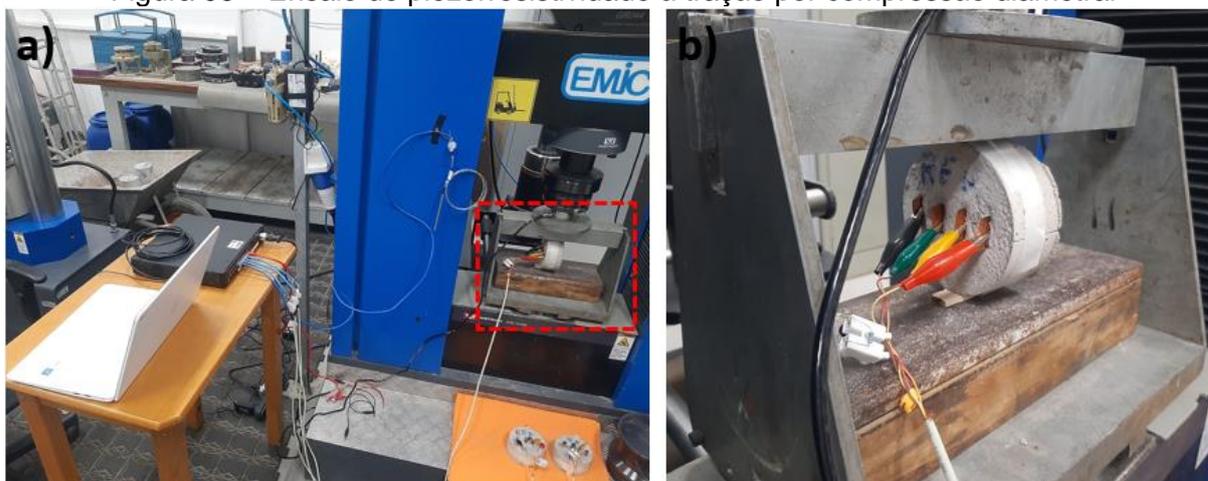
No caso do comportamento piezorresistivo à tração, adaptado do ensaio de resistência à tração por compressão diametral da norma ABNT NBR 7222 (2011), a disposição dos eletrodos em relação a força aplicada seguiu o esquema das Figuras 97 e 98.

Figura 97 – Corpo de prova cilíndrico no ensaio de piezorresistividade à tração à compressão diametral baseado na norma ABNT NBR 7222 (2011)



Fonte: Próprio autor.

Figura 98 – Ensaio de piezorresistividade à tração por compressão diametral



Fonte: Próprio autor.

A ruptura dos corpos de prova cilíndricos (Figura 99) se deu no mesmo aparato que do ensaio de carregamento cíclico.

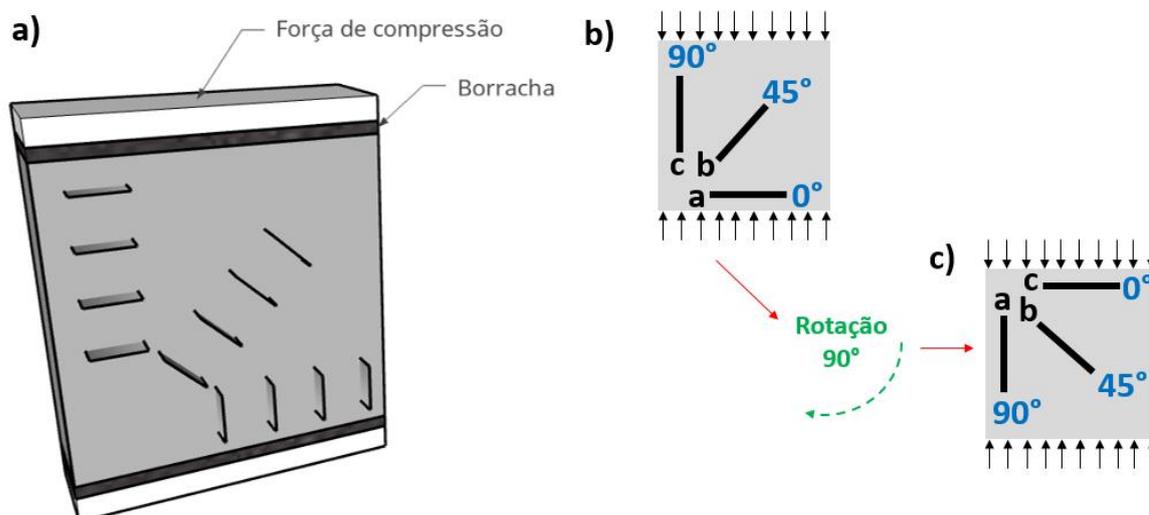
Figura 99 – Ensaio de piezorresistividade com ruptura à tração por compressão diametral



Fonte: Próprio autor.

A avaliação do comportamento piezorresistivo do CCA em várias direções teve os corpos de prova retangular “tipo roseta” dispostos conforme esquema da Figura 100a. Os corpos de prova tiveram os extensômetros instalados em suas faces traseiras. Esses foram inicialmente ensaiados na posição indicada na Figura 100b e na sequência rotacionados 90° no sentido horário para ensaio na posição indicada na Figura 100c.

Figura 100 – Corpo de prova prismático tipo roseta no ensaio de piezorresistividade à compressão (a), em sua posição inicial (b) e após rotação horária de 90° (c)



Fonte: Próprio autor.

No caso da análise dos resultados do ensaio piezorresistivo do corpo de prova tipo roseta, além da comparação gráfica e da correlação entre variação de deformação (ϵ) e de voltagem (U), por se tratar de ensaio de caráter original, foram propostas as análises das variações entre as relações estabelecidas pelas Equações 42 a 44. A relação $\epsilon^{0^\circ}/\epsilon^{90^\circ}$ equivale à relação do coeficiente de Poisson.

$$\frac{U^{0^\circ}}{U^{90^\circ}} \text{ em comparação a } \frac{\epsilon^{0^\circ}}{\epsilon^{90^\circ}} \quad (42)$$

$$\frac{U^{90^\circ}}{U^{45^\circ}} \text{ em comparação a } \frac{\epsilon^{90^\circ}}{\epsilon^{45^\circ}} \quad (43)$$

$$\frac{U^{45^\circ}}{U^{0^\circ}} \text{ em comparação a } \frac{\epsilon^{45^\circ}}{\epsilon^{0^\circ}} \quad (44)$$

A Figura 101 apresenta a realização dos ensaios piezorresistivos nos corpos de prova tipo roseta, com os respectivos extensômetros.

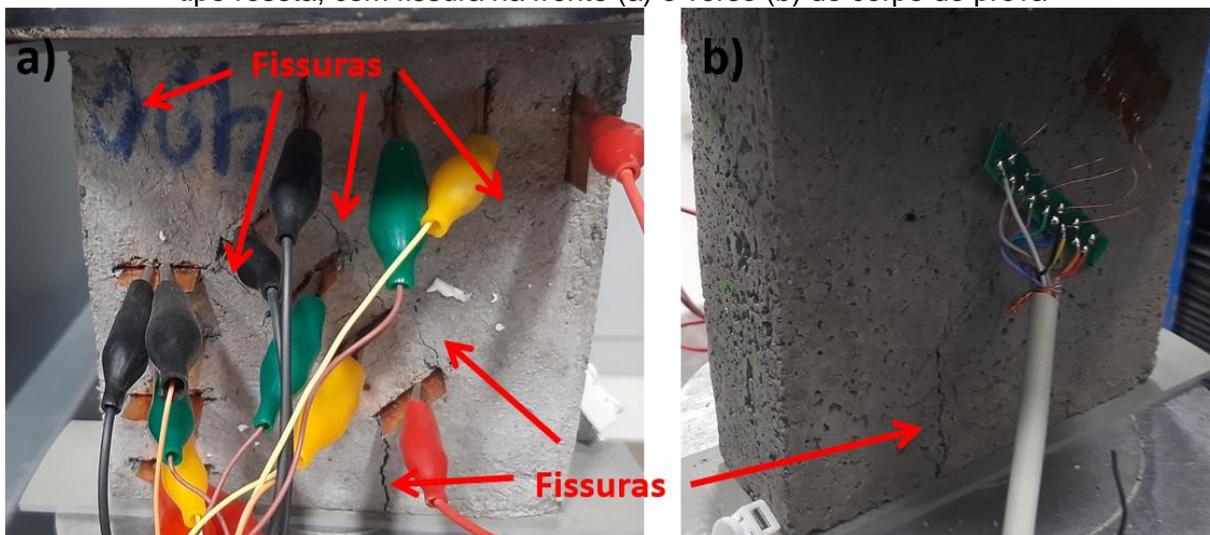
Figura 101 – Ensaio de piezorresistividade à compressão dos corpos de prova tipo roseta (a), na posição inicial (b), com extensômetro na face inferior (c), ensaio na posição rotacionada 90° (d) e detalhe do extensômetro tipo roseta (e)



Fonte: Próprio autor.

A ruptura dos corpos de prova tipo roseta foi realizada com esses na posição rotacionados 90° no sentido horário. A ruptura pode ser observada nas diversas fissuras formadas nos corpos de prova, conforme foi o caso do traço TE-40-00-III da Figura 102.

Figura 102 – Ensaio de piezorresistividade com ruptura à compressão dos corpos de prova tipo roseta, com fissura na frente (a) e verso (b) do corpo de prova



Fonte: Próprio autor

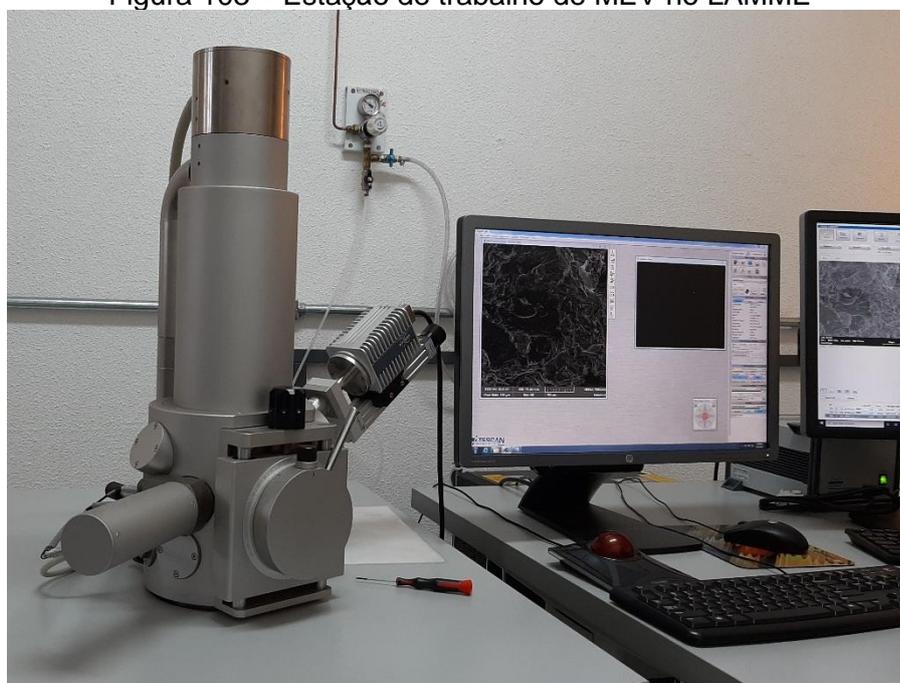
Os resultados dos ensaios de propriedades elétricas e de piezorresistividade, foram estatisticamente analisados conforme descrito na seção 3.1.2.6.

3.1.2.5 Análise da microestrutura do CCA

Foram feitas análises da microestrutura dos CCAs desenvolvidos, por meio dos equipamentos do Laboratório Multidisciplinar de Microscopia Eletrônica (LAMME) da Faculdade de Tecnologia da UNICAMP. Os principais equipamentos empregados na análise microestrutural foram o microscópio eletrônico de varredura (MEV), bem o detector de espectroscopia de raios X por energia dispersiva (EDS), do fabricante Bruker (modelo XFlash 630M).

O MEV utilizado foi o modelo VEGA 3 SEM da fabricante TESCAN (Figura 103), com filamento de tungstênio, energia máxima de 30 kV, com resolução teórica máxima de 3 nm e 8 nm com energia de 3 kV.

Figura 103 – Estação de trabalho de MEV no LAMME



Fonte: Próprio autor.

As amostras passaram por processo de redução da umidade por 24 h, mediante a utilização de estufa, numa temperatura de 105 ± 5 °C. Após o devido resfriamento, as amostras foram acondicionadas em frascos com fechamento hermético e passaram por cobrimento de metalização quando necessário.

3.1.2.6 Análise estatística

Foi realizada análise estatística por meio de variância para verificação da existência de diferença em nível de significância de 95%. A verificação de significância estatística foi realizada por meio da análise de variância do tipo *One Way ANOVA* e *Tukey Test*.

A análise de correlação foi baseada na literatura (Silva; Lintz; Gachet, 2022), a qual se deu por meio do coeficiente de Pearson (r). Para comparação com resultados de outros autores, foi utilizado o Coeficiente de Determinação (r^2).

O tipo de análise estatística para cada ensaio foi conforme elencado na Tabela 20.

Tabela 20 – Tipo de análise estatística para o resultado de cada ensaio

Ensaio	Tipo
Resistência à compressão aos 7 e 28 dias	ANOVA e <i>Tukey Test</i> *
Resistência à tração na Flexão aos 7 e 28 dias	
Densidade de massa aparente	
Módulo de elasticidade dinâmico por onda ultrassônica	
Módulo de elasticidade dinâmico pelo método das frequências naturais de vibração	
Fator de amortecimento	
Absorção de água, índice de vazios e massas específicas	
Condutividade elétrica	
Piezorresistividade	Correlação de Pearson e Coeficiente de Determinação (r^2)

*Resultados gráficos da análise *Tukey Test* são apresentados no Apêndice A

Fonte: Próprio autor.

As análises estatísticas foram feitas mediante uso dos softwares MS-Excel® e Origin Lab-PRO®.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CCA desenvolvido com resíduo e fibra de carbono

4.1.1 Caracterização dos materiais

Os resultados da caracterização do cimento Portland CP-V são apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 – Resultados da caracterização do cimento Portland CP-V

Parâmetro	Resultado
Massa específica	3,06 kg/dm ³
Massa unitária	0,91 kg/dm ³

Fonte: Próprio autor.

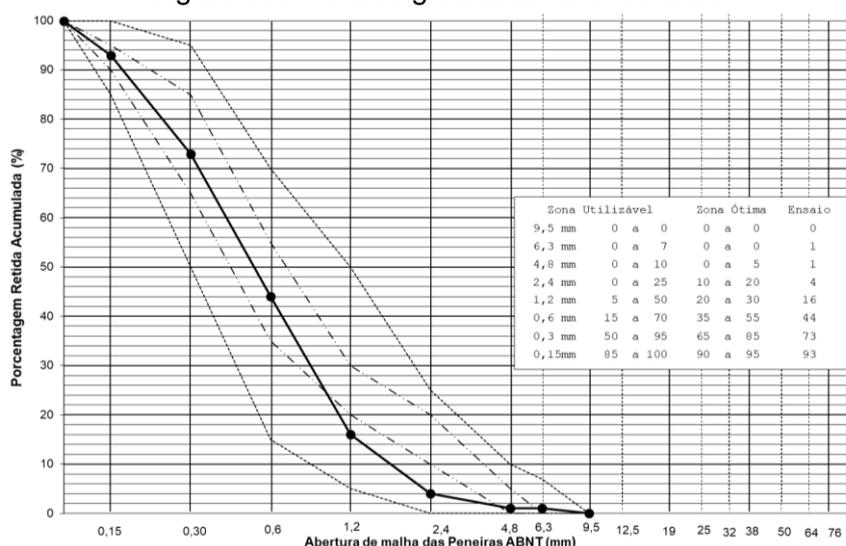
A areia utilizada obteve os resultados de caracterização apresentados na Tabela 22 e Figura 104, quanto à curva granulométrica.

Tabela 22 – Resultados da caracterização da areia

Parâmetro	Resultado
Massa específica	2,57 g/cm ³
Massa unitária	1,52 g/cm ³
Diâmetro máximo	2,40 mm
Módulo de finura	2,31

Fonte: Próprio autor.

Figura 104 – Curva granulométrica da areia



Fonte: Próprio autor.

Quanto aos resíduos de lona de freio, após trituração os mesmos apresentaram os resultados constantes da Tabela 23, quanto à análise das massas específica e unitária e da Tabela 24 quanto ao teor de umidade.

Tabela 23 – Resultados das massas específica e unitária do resíduo de lona freio

Parâmetro	Resultado
Massa específica	1,99 g/cm ³
Massa unitária da 1ª etapa de trituração	868,34 kg/m ³
Massa unitária da 2ª etapa de trituração	829,83 kg/m ³
Massa unitária da 3ª etapa de trituração	761,53 kg/m ³

Fonte: Próprio autor.

Na comparação do resíduo com a areia, a massa específica da mesma ficou 29,25% maior que a do resíduo. Nos casos de massa unitária, a da areia ficou maior que a do resíduo em 74,16%, 82,55% e 99,37%, respectivamente, 1ª, 2ª e 3ª etapas de trituração.

Tabela 24 – Resultados dos teores de umidade do resíduo de lona freio

Parâmetro	Resultado
Teor de umidade da 1ª etapa de trituração	1,26%
Teor de umidade da 2ª etapa de trituração	1,11%
Teor de umidade da 3ª etapa de trituração	1,15%

Fonte: Próprio autor.

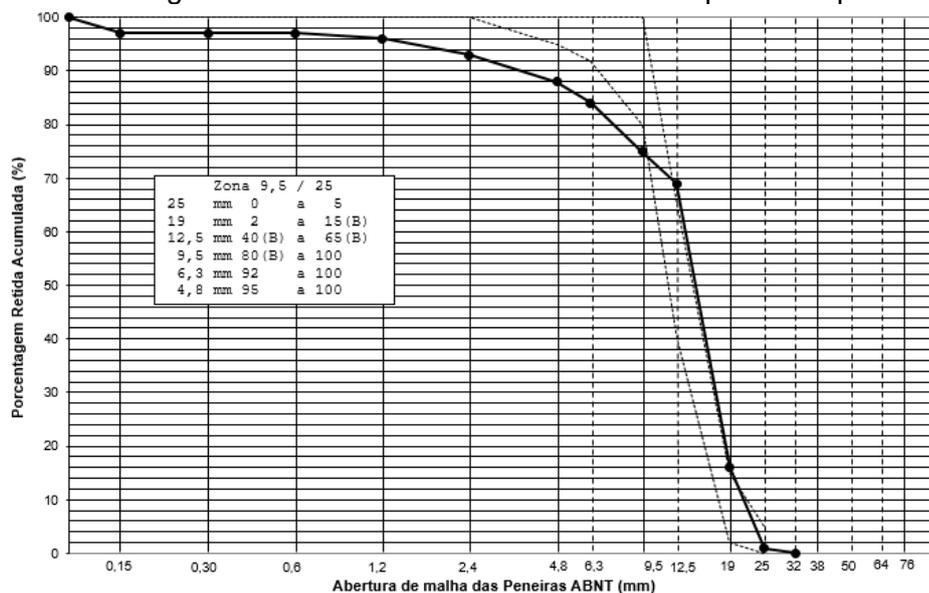
Em relação à análise granulométrica, correspondente às três diferentes etapas de trituração, os resíduos de lona de freio apresentaram os resultados constantes da Tabela 25 e curvas granulométricas das Figuras 105 a 107.

Tabela 25 – Resultados das análises granulométricas dos resíduos de lona freio

Etapa de trituração	Módulo de Finura	Dimensão máxima característica	Classificação
1ª	4,65	25 mm	Zona 9,5 / 25
2ª	3,02	6,30 mm	Zona utilizável superior
3ª	0,93	0,60 mm	Aproximou-se de Agregado Miúdo - Areia Muito Fina (Zona 1), com um desvio máximo de 25% e com somatório dos desvios de 43%

Fonte: Próprio autor.

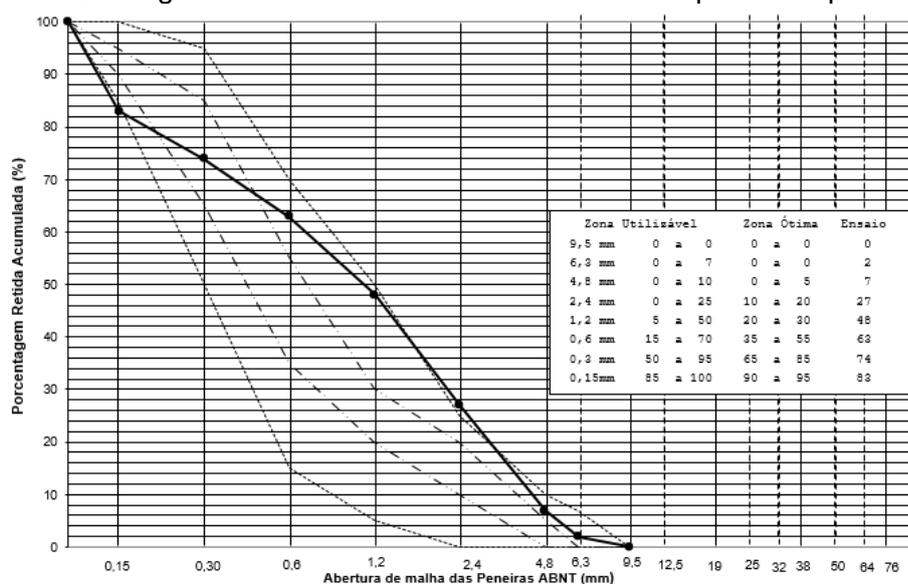
Figura 105 – Curva granulométrica do resíduo de lona freio após 1ª etapa de trituração



Fonte: Próprio autor.

Os resultados da análise granulométrica da 1ª etapa de trituração confirmaram sua caracterização como similar à de um agregado graúdo. No caso dos resultados da análise granulométrica da 2ª etapa de trituração, o resíduo ficou praticamente enquadrado dentro da Zona Utilizável para agregados miúdos.

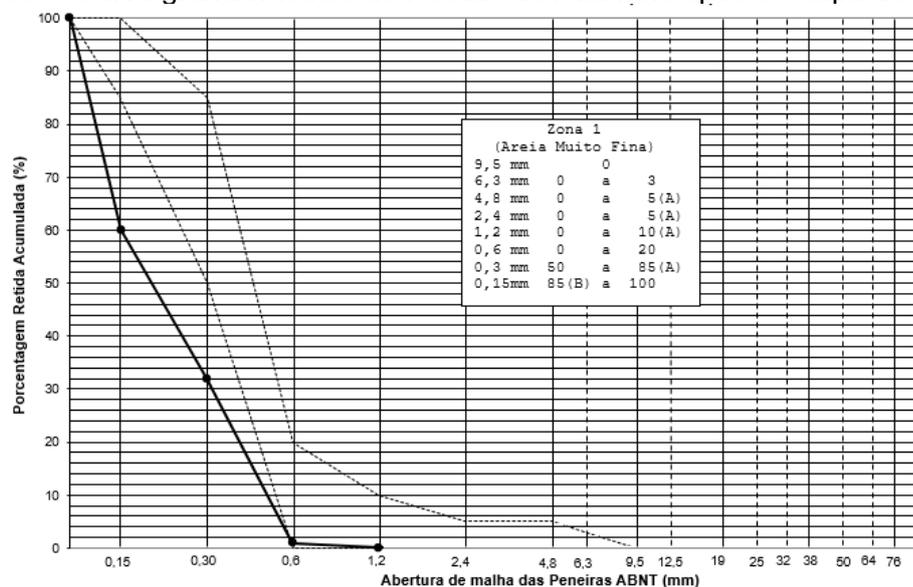
Figura 106 – Curva granulométrica do resíduo de lona freio após 2ª etapa de trituração



Fonte: Próprio autor.

Por fim, os resultados da 3ª etapa de trituração demonstraram uma caracterização próxima a de uma areia muito fina.

Figura 107– Curva granulométrica do resíduo de lona freio após 3ª etapa de trituração



Fonte: Próprio autor.

Em relação à análise de classificação de resíduos sólidos, os resultados obtidos para o resíduo de lona freio são apresentados na Tabela 26.

Tabela 26 – Resumo da análise do resíduo sólido de lona de freio de acordo com ABNT NBR 10004 (2004)

Análise	Resultado
Teor de Sólidos	98,208%
Ponto de Fulgor	133,653 °C
pH	6,916
Análise de massa bruta	Dentro dos limites da ABNT NBR 10004 (2004)
Análise de lixiviação	Dentro dos limites da ABNT NBR 10004 (2004)
Análise de solubilização	Parcialmente dentro dos limites da ABNT NBR 10004 (2004)

Fonte: Próprio autor.

Todos os parâmetros da análise de massa bruta e da análise de lixiviação realizados pelo laboratório PLANTEC – P.T.A. LTDA, atenderam aos padrões estabelecidos pela legislação vigente conforme ABNT NBR 10004 (2004).

Em relação à análise de solubilização, o Índice de Fenóis foi de 0,115 mg/L, ou seja, superior ao limite de 0,01 mg/L. Os demais itens da análise de solubilização da amostra atenderam aos padrões estabelecidos pela ABNT NBR 10004 (2004).

Uma maior quantidade de fenóis já era previsível, uma vez que a resina fenólica é largamente utilizada como aglomerante na produção de lonas de freio (Confiengo; Faga, 2022; Shang *et al.*, 2022).

Ainda assim, esse valor de fenol está abaixo do limite máximo de 5,0 mg/L para lançamento em sistema público de esgoto provido de estação de tratamento, bem como abaixo do limite máximo de 0,5 mg/L para emissão de esgotos diretamente no corpo receptor, conforme Decreto Estadual n.º 8.468/76 e Resolução CONAMA n.º 430/11 do (CETESB, 2021).

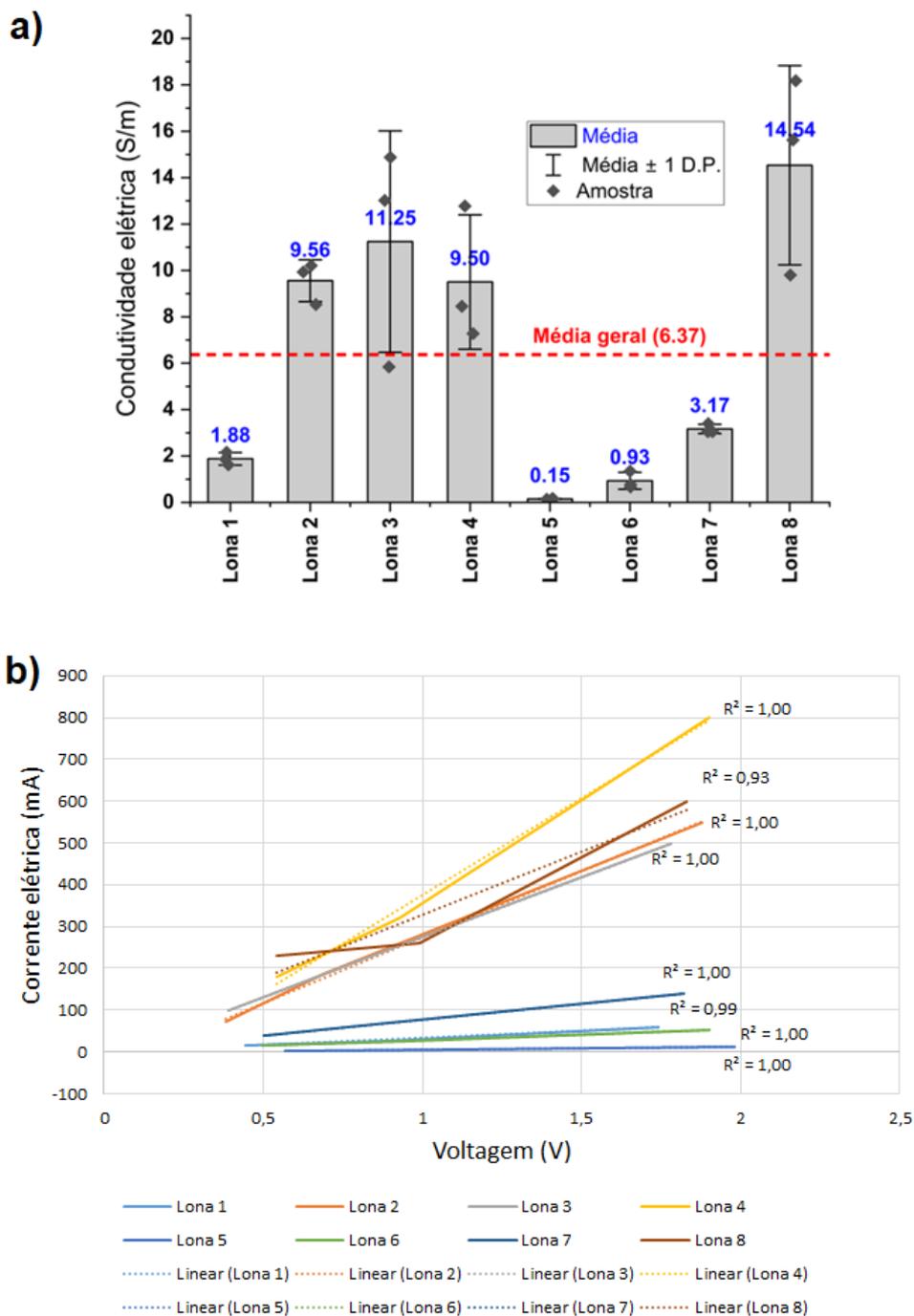
Entretanto, mesmo que o limite do Índice de Fenóis tenha sido ultrapassado na análise por solubilização, o resíduo de lona de freio foi classificado como “*Classe II A - Não Inerte*” de acordo com a ABNT NBR 10004 (2004), conforme Relatório de Ensaio⁹. Ou seja, não se trata de resíduo sólido perigoso, o que já se esperava, conforme descrito na Seção 2.2.1 deste trabalho e na Figura 51.

Quanto à caracterização das propriedades elétricas das amostras de lonas de freio usadas, os valores de condutividade elétrica obtidos por meio da medição direta de resistência elétrica, são apresentados na Figura 108a.

Em relação a análise da Figura 108b, foi possível constatar que a maioria das amostras de lona de freio apresentaram comportamento com tendência ôhmica num intervalo de aproximadamente 0,5 a 2,0 volts, dada a linearidade dos resultados dos coeficientes de determinação (r^2) que ficaram em 0,93 a 1,00.

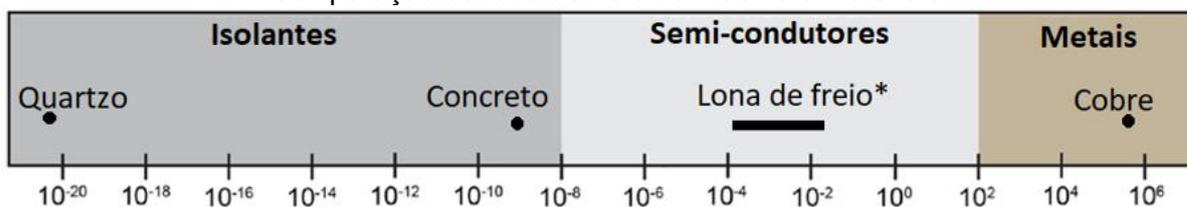
⁹ Relatório de Ensaio n.º 1858/2022.1.A de 17/03/2022 - PLANTEC – P.T.A. LTDA.

Figura 108 – Condutividade elétrica das amostras de lona de freio (a) e análise de tendência de comportamento ôhmico (b)



As amostras apresentaram condutividade elétrica equivalente à de materiais semicondutores, conforme classificação mostrada na escala da Figura 109.

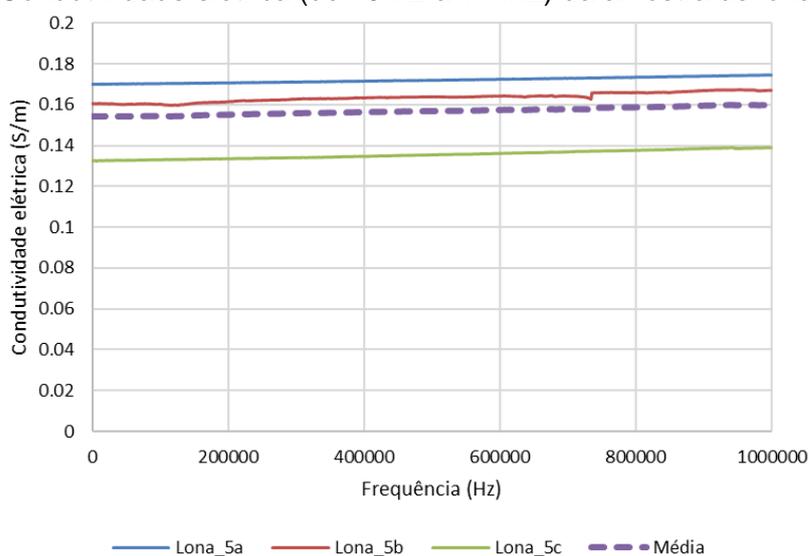
Figura 109 – Escala de condutividade elétrica condutividade elétrica (S/cm) com comparação da lona de freio com demais materiais



* intervalo aproximado dos resultados da Figura 108a
 Fonte: adaptado de Solazzo *et al.* (2019); Mitchell (2003).

A partir da análise de impedância elétrica e ângulo de fase da lona de freio “5” foi possível verificar que não houve variação significativa da condutividade elétrica entre as frequências de 40 Hz a 1 MHz, conforme Figura 110.

Figura 110 – Condutividade elétrica (de 40 Hz a 1 MHz) da amostra de lona de freio n.º 5

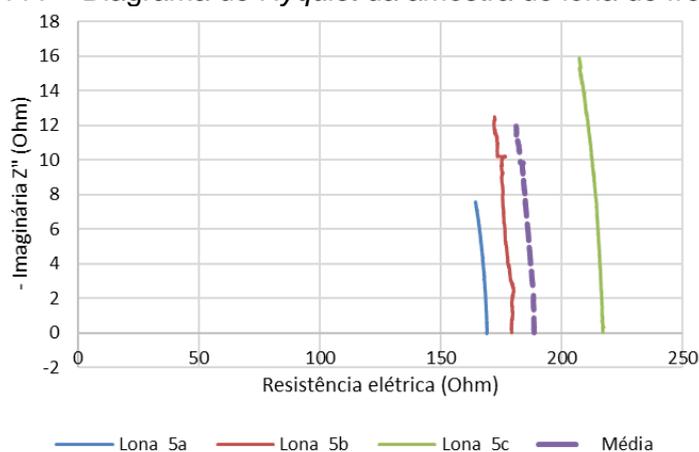


Fonte: Próprio autor.

Também foi possível constatar que os valores condutividade elétrica entre diferentes métodos medição (direta de resistência elétrica *versus* impedância e ângulo de fase) foram muito próximos para a amostra de lona n.º 5, ou seja, ambos por volta de 0,15 S/m.

Por meio da análise do diagrama de *Nyquist* da Figura 111, foi possível constatar que mesmo com o aumento da frequência, ocorreu pouca alteração na resistência elétrica, mostrando que o material apresenta pouca influência da reatância em sua resistência elétrica.

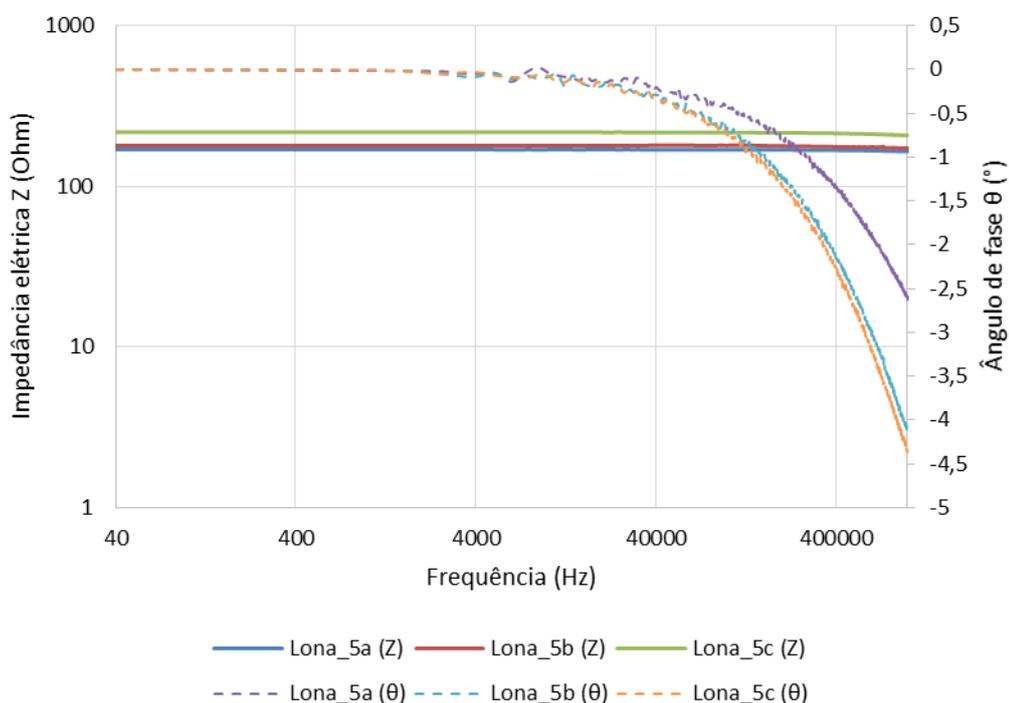
Figura 111 – Diagrama de *Nyquist* da amostra de lona de freio n.º 5



Fonte: Próprio autor.

Quanto à análise pelo diagrama de *Bode* da Figura 112, observou-se que mesmo com a variação acentuada do ângulo de fase houve pouca variação da impedância elétrica (Z), o que pode indicar pouca influência provocada pela variação da frequência.

Figura 112 – Diagrama de *Bode* da amostra de lona de freio L5



Fonte: Próprio autor.

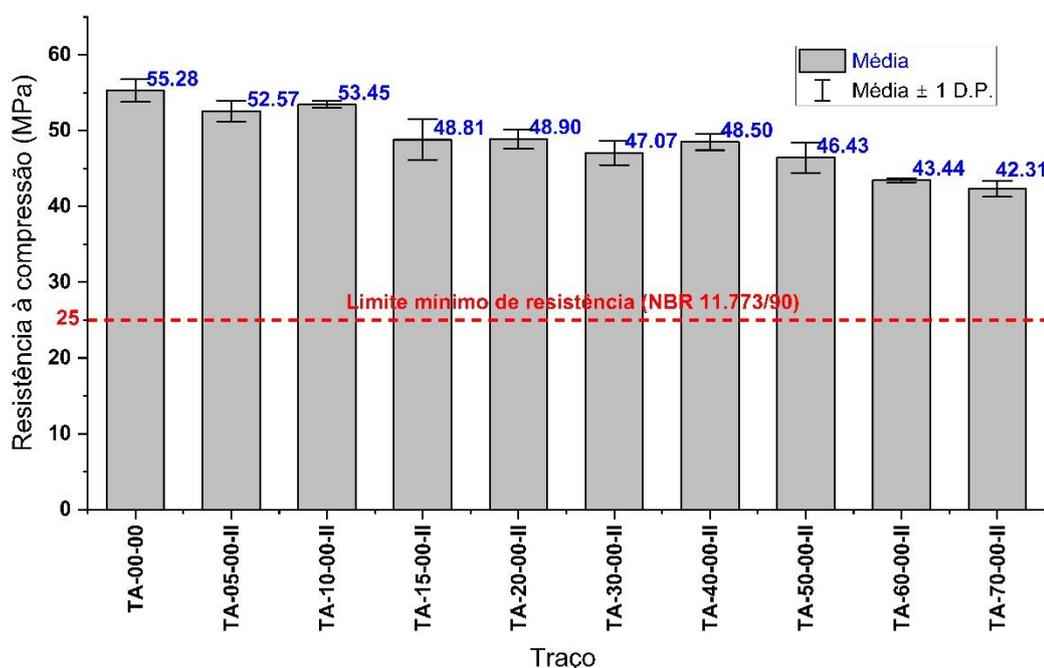
Tais análises (Figuras 110 a 112) possibilitaram observar que as amostras de lona de freio apresentaram comportamento com tendência ôhmica, quando comparados a materiais com comportamento dielétrico.

4.1.2 Caracterização do CCA

A seguir são apresentados os resultados das análises físicas e mecânicas dos diferentes traços de CCAs.

Em relação a resistência à compressão, foi possível observar sua redução à medida que se aumentava a substituição da areia pelo resíduo de lona de freio conforme resultados dos gráficos da Figura 113 a 115 e 117, independentemente do traço e da granulometria do resíduo. Esse comportamento de redução também foi observado por Wang *et al.* (2017) para os traços TA-05-00-II e TA-10-00-II reproduzidos nesta pesquisa. Contudo, aqueles autores observaram uma redução de aprox. 10,30% e 19,00%, respectivamente de TA-05-00-II e TA-10-00-II em relação ao traço de referência (TA-00-00-II), enquanto que nesta pesquisa a redução foi de apenas 4,91% e 3,32%. Essa variação pode ser explicada especialmente em razão dos resíduos de lona de freio serem constituídos por diferentes materiais, o que lhes confere diferentes propriedades.

Figura 113 – Resistência à compressão do CCA com o traço da série “A” aos 28 dias

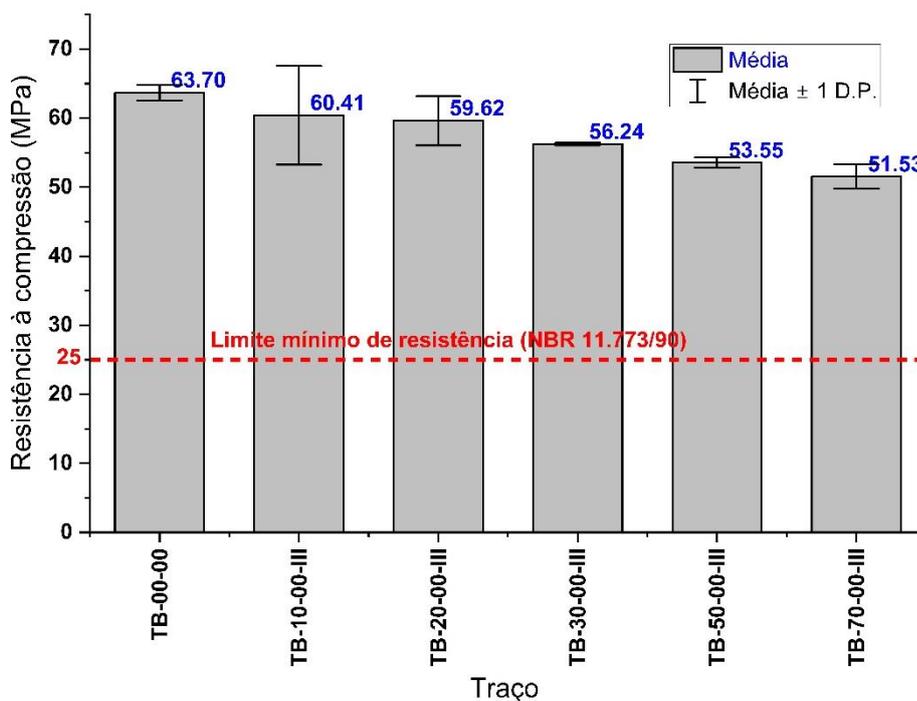


Fonte: Próprio autor.

Os traços TA-05-00-II e TA-10-00-II não apresentaram diferença estatisticamente significativa na redução de resistência à compressão, em relação ao traço de referência (TA-00-00), conforme *Tukey Test* (Figura A1).

O aumento dos valores de resistência à compressão dos traços da série “B”, quando comparados aos traços da série “A”, pode esse estar relacionado ao uso do aditivo redutor de água e até mesmo ao tipo do corpo de prova.

Figura 114 – Resistência à compressão do CCA com o traço da série “B” aos 28 dias



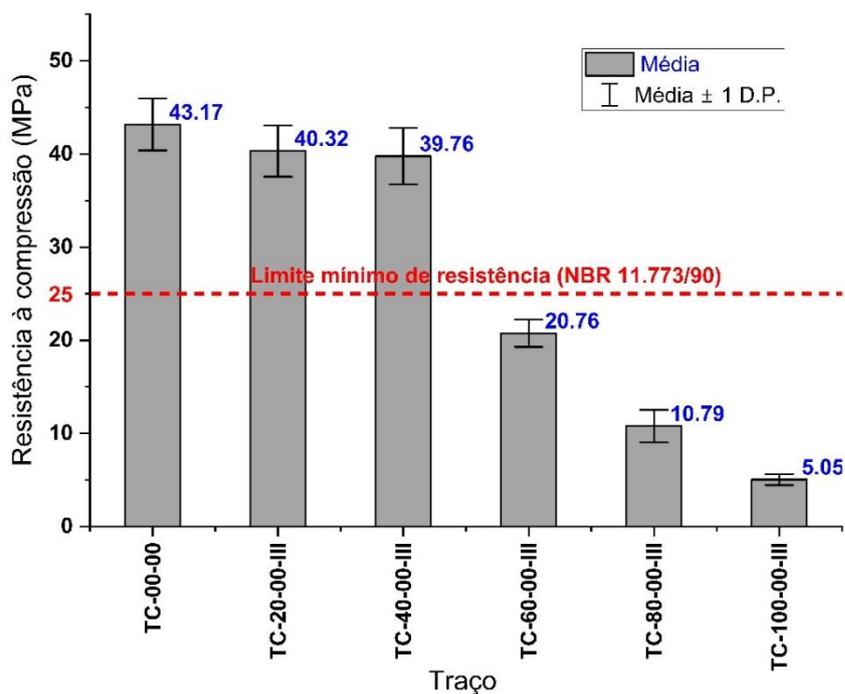
Fonte: Próprio autor.

Os traços TB-10-00-III, TB-20-00-III e TB-30-00-III não apresentaram diferença estatisticamente significativa na redução de resistência à compressão, em relação ao traço de referência (TB-00-00), conforme *Tukey Test* (Figura A2).

Quanto aos resultados da série “C”, os mesmos apresentaram menores reduções de resistência à compressão com até 40% de substituição em relação às séries anteriores (“A” e “B”). Contudo, uma queda brusca de resistência foi observada nos traços com mais de 40% de substituição. Esse comportamento divergente em relação às demais séries pode ser explicado em função da mudança do traço, que a partir da série “C”, passou-se a seguir os limites estabelecidos para argamassas armadas de 1:2 e não mais os traços de Wang *et al.* (2017) de 1:1.

Os traços TC-20-00-III e TC-40-00-III não apresentaram diferença estatisticamente significativa na redução de resistência à compressão, em relação ao traço de referência (TC-00-00), conforme *Tukey Test* (Figura A3).

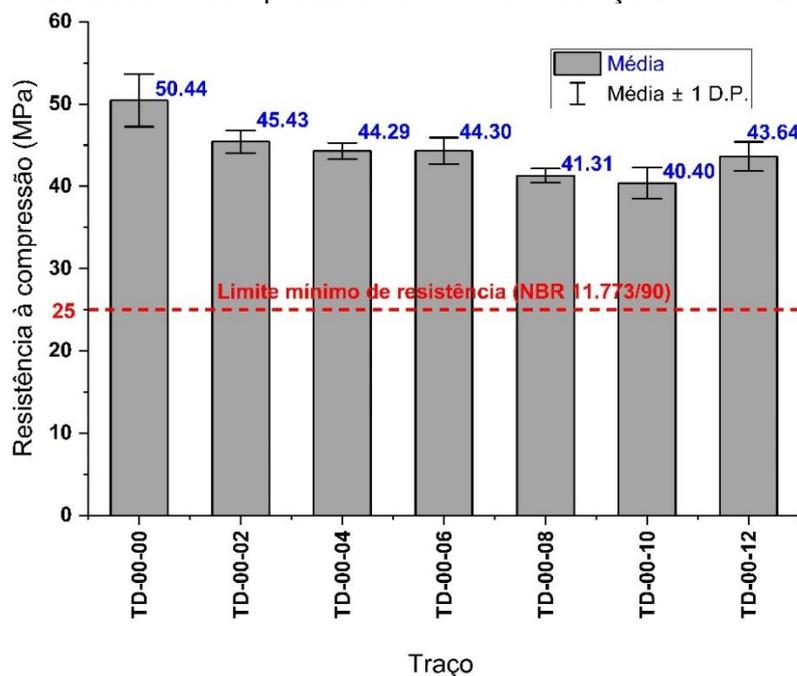
Figura 115 – Resistência à compressão do CCA com o traço da série “C” aos 28 dias



Fonte: Próprio autor.

Quanto aos resultados de resistência à compressão da série “D” (Figura 116), ou seja, somente com fibra de carbono, ocorreu uma redução já reportada na literatura (Belli *et al.*, 2018), o que pode estar associado a dificuldade de compactação na matriz cimentícia (Donnini; Bellezze; Corinaldesi, 2018).

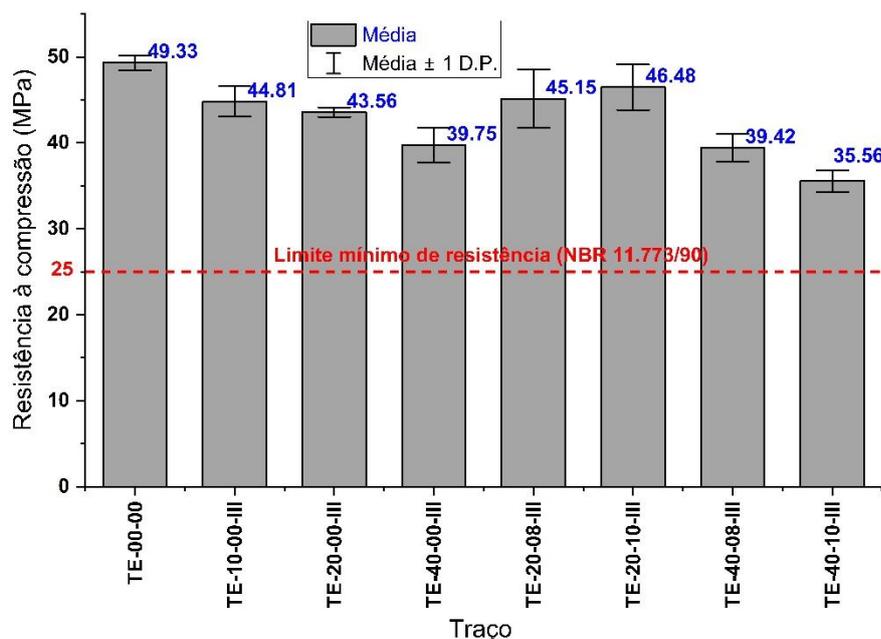
Figura 116 – Resistência à compressão do CCA com o traço da série “D” aos 28 dias



Fonte: Próprio autor.

Em relação à combinação do resíduo de lona de freio e à fibra de carbono na série “E” (Figura 117), os resultados de resistência à compressão mostraram que as combinações TE-20-08-III e TE-20-10-III, foram capazes de atenuar de forma significativa as variações de redução observadas no uso em separado de cada material.

Figura 117 – Resistência à compressão do CCA com o traço da série “E” aos 28 dias



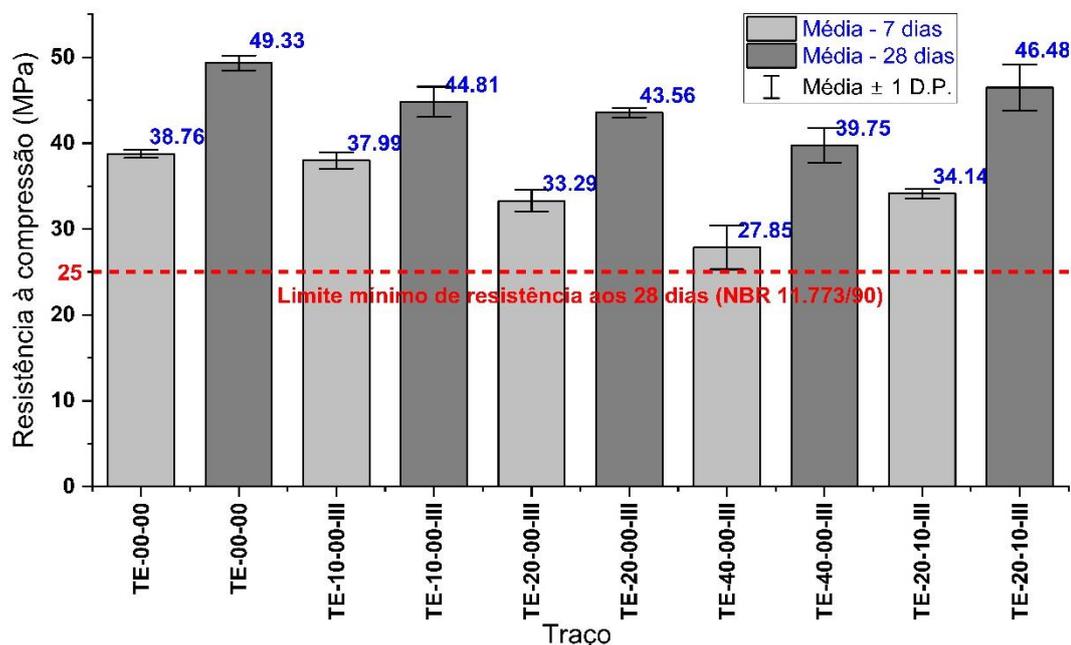
Fonte: Próprio autor.

O traço TE-20-10-III não apresentou diferença estatisticamente significativa na redução de resistência à compressão, em relação ao traço de referência (TE-00-00), conforme *Tukey Test* (Figura A5).

Na análise de resistência à compressão aos 7 dias de idade (Figura 118), foi possível constatar que o traço TE-10-00-III apresentou pouca variação em relação à de referência (TE-00-00), quando comparada com aos demais traços analisados na mesma série (“E”).

O traço TE-10-00-III não apresentou diferença estatisticamente significativa na redução de resistência à compressão aos 7 dias, em relação ao traço de referência (TE-00-00), conforme *Tukey Test* (Figura A6).

Figura 118 – Resistência à compressão do CCA com os traços da “E” (parcial) aos 7 e 28 dias



Fonte: Próprio autor.

A partir dos resultados individuais de resistência à compressão das séries “A” a “E”, foi obtido P-valor da análise de variância constante da Tabela 27, consolidando a hipótese alternativa de que há diferença entre os grupos (de uma mesma série) para um nível crítico de significância de 0,05.

Tabela 27 – Análise de variância dos resultados de resistência à compressão

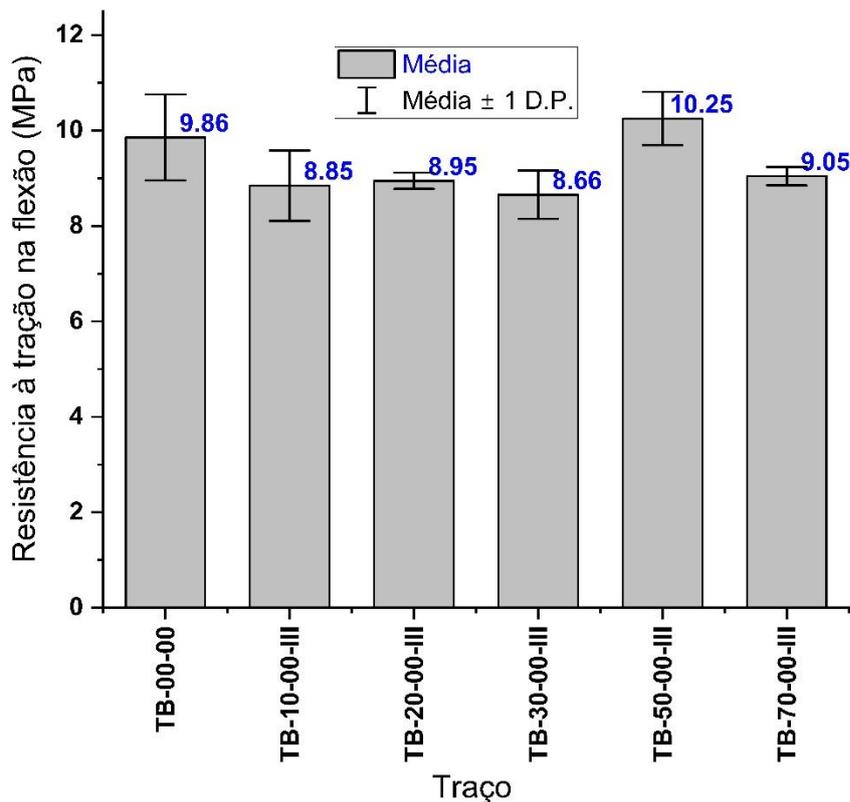
Série (traço)	Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F*	P-valor
A	1	9	471,63622	52,40402	23,89957	<0,0001
	2	20	43,85353	2,19268		
B	1	5	312,90849	62,5817	5,45786	0,00756
	2	12	137,5962	11,46635		
C	1	5	8307,86722	1661,57344	330,2142	<0,0001
	2	30	150,95417	5,03181		
D	1	6	381,39232	63,56539	19,16795	<0,0001
	2	35	116,06813	3,31623		
E	1	7	835,17585	119,31084	30,62522	<0,0001
	2	40	155,83345	3,89584		
E 7 dias	1	4	456,24167	114,06042	59,80492	<0,0001
	2	25	47,6802	1,90721		

*Razão entre as médias quadradas; 1) Entre grupos; 2) Dentro dos grupos (Residual)
Fonte: Próprio autor.

Quanto à resistência à tração na flexão (Figuras 119, 120 e 122), houve em alguns casos, como dos traços TB-50-00-III, TC-20-00-III e TC-40-00-III, um pequeno

aumento médio em relação aos traços de referência de cada série. Esse comportamento de aumento de resistência à tração na flexão também foi obtido por Wang *et al.* (2017) em outros traços similares, que pode ter ocorrido em função das fibras comumente existentes nas lonas e pastilhas de freios, o que nesta pesquisa foi confirmado na análise microestrutural, conforme resultados descritos na Seção 4.1.5.

Figura 119 – Resistência à tração na flexão do CCA com o traço da série “B” aos 28 dias

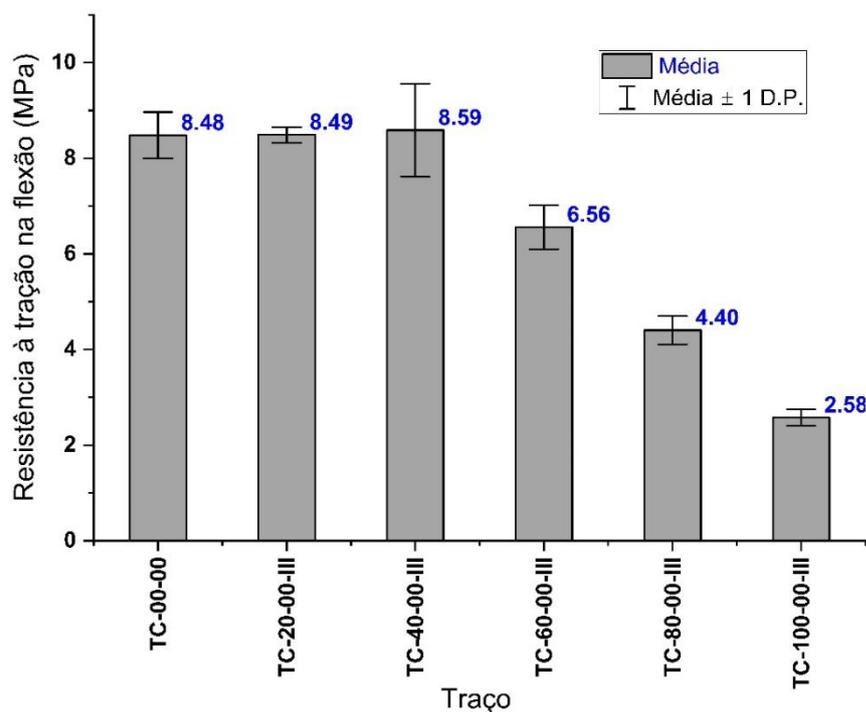


Fonte: Próprio autor.

Nenhum traço da série “B” apresentou diferença estatisticamente significativa na redução de resistência à tração na flexão, em relação ao traço de referência (TB-00-00), conforme *Tukey Test* (Figura A7).

Da mesma forma que nos resultados de resistência à compressão entre as séries “B” e “C”, houve menores reduções de resistência à tração na flexão até 40% de substituição na série “C”, quando comparado aos resultados da série “B”. Contudo, uma queda brusca de resistência foi observada nos traços com mais de 40% de substituição na série “C”.

Figura 120 – Resistência à tração na flexão do CCA com o traço da série “C” aos 28 dias



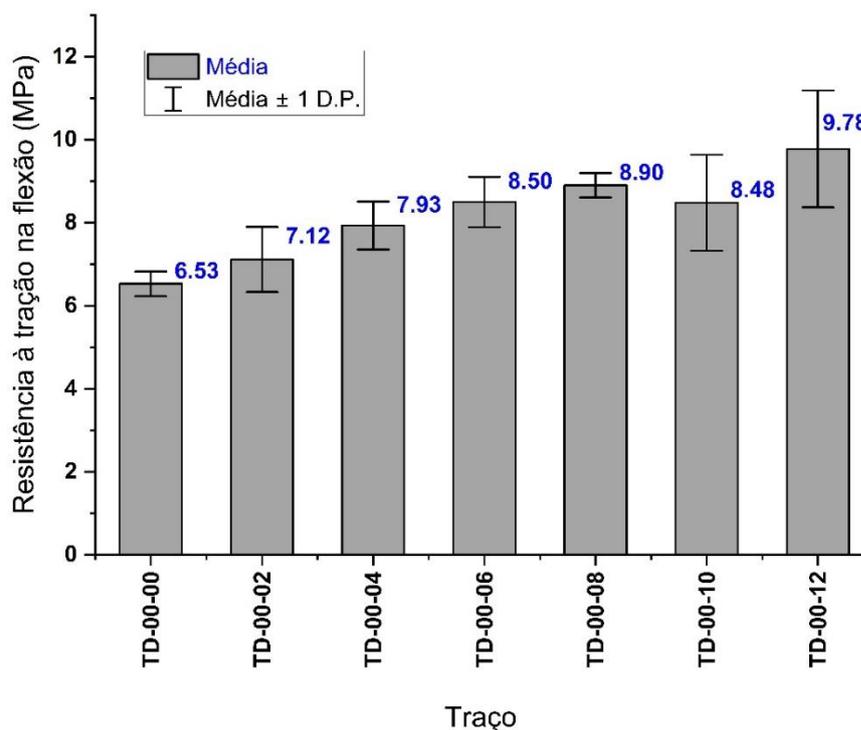
Fonte: Próprio autor.

Os traços TC-20-00-III e TC-40-00-III não apresentaram diferença estatisticamente significativa na redução de resistência à tração na flexão, em relação ao traço de referência (TC-00-00), conforme *Tukey Test* (Figura A8).

Quanto aos resultados de resistência à tração na flexão da série “D” (Figura 121), ocorreu um aumento de resistências. Tal aumento é comumente reportado na literatura, quando do uso de fibras de carbono em compósitos cimentícios (Belli *et al.*, 2018; Donnini; Bellezze; Corinaldesi, 2018; Safiuddin; Abdel-Sayed; Hearn, 2022; Muthukumarana *et al.*, 2023).

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), conforme *Tukey Test* (Figura A9).

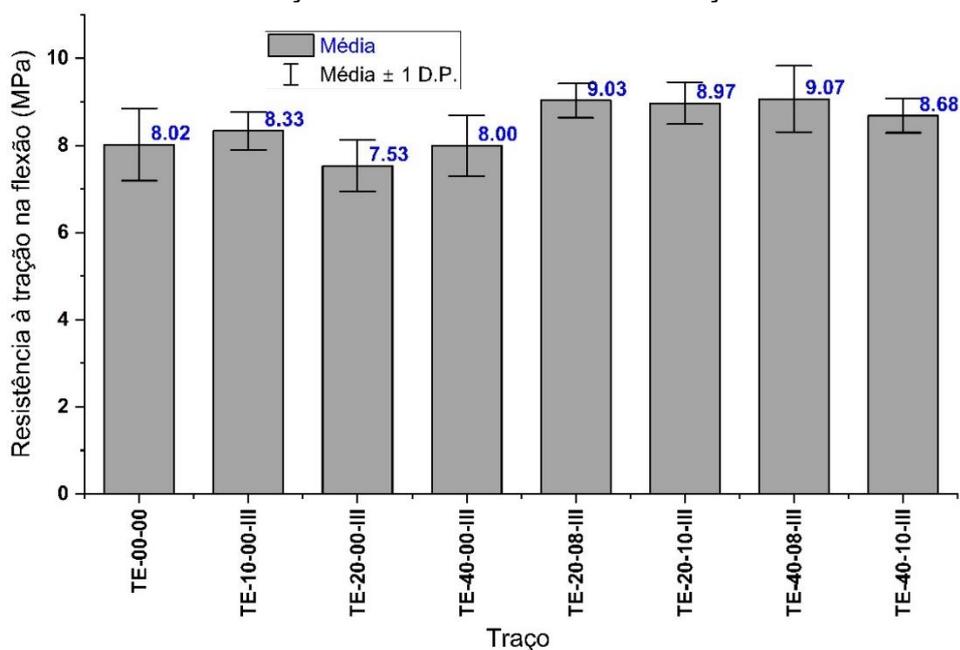
Figura 121 – Resistência à tração na flexão do CCA com o traço da série “D” aos 28 dias



Fonte: Próprio autor.

Em relação à combinação do resíduo com a fibra de carbono, nenhum traço (Figura 122), ficou inferior ao de referência (TE-00-00) na análise de resistência à tração na flexão. Ainda de acordo com a Figura 122, no caso dos traços somente com resíduo (TE-10-00-III a TE-40-00-III), não ocorreu nenhuma perda significativa da resistência.

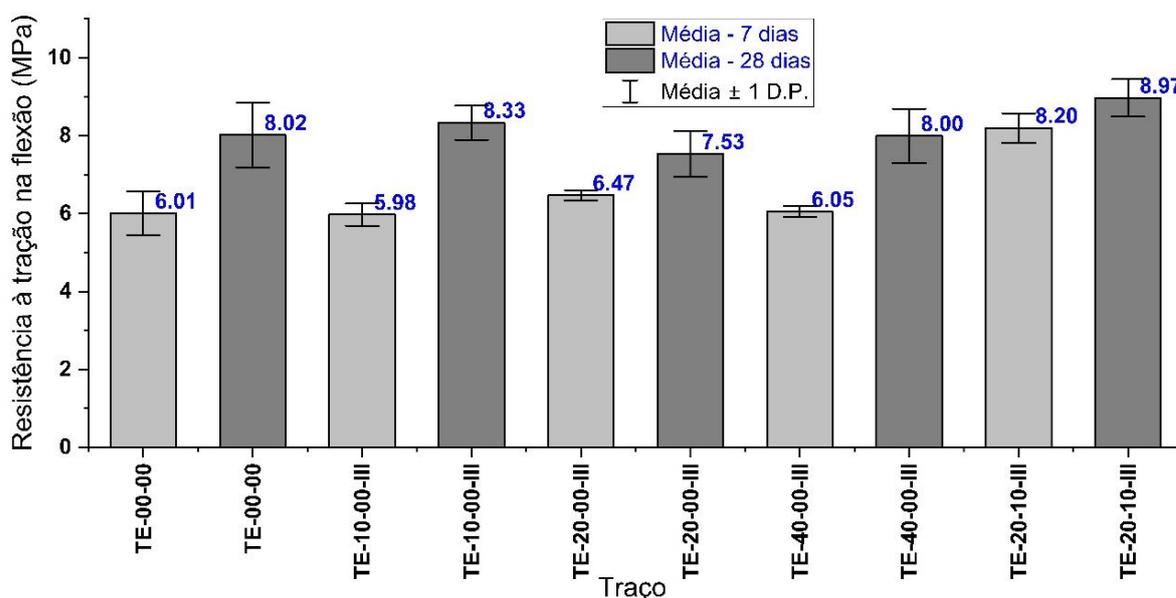
Figura 122 – Resistência à tração na flexão do CCA com o traço da série “E” aos 28 dias



Fonte: Próprio autor.

Quanto às comparações entre 7 e 28 dias de idade (Figura 123), de resistência à tração na flexão, o traço TE-20-10-III foi o que teve a menor variação entre ambas as idades. Tal constatação seguiu o comportamento do traço TE-20-00-III.

Figura 123 – Resistência à tração na flexão do CCA com os traços da série “E” (parcial) aos 7 e 28 dias



Fonte: Próprio autor.

O traço TE-20-10-III apresentou diferença estatisticamente significativa no ganho de resistência à tração na flexão, em relação ao traço de referência (TE-00-00), conforme *Tukey Test* (Figura A11).

A partir dos resultados individuais de resistência à tração na flexão das séries “B” a “E”, foi obtido P-valor da análise de variância constante da Tabela 28, consolidando a hipótese alternativa de que há diferença entre os grupos (de uma mesma série) para um nível crítico de significância de 0,05.

Tabela 28 – Análise de variância dos resultados de resistência à tração na flexão

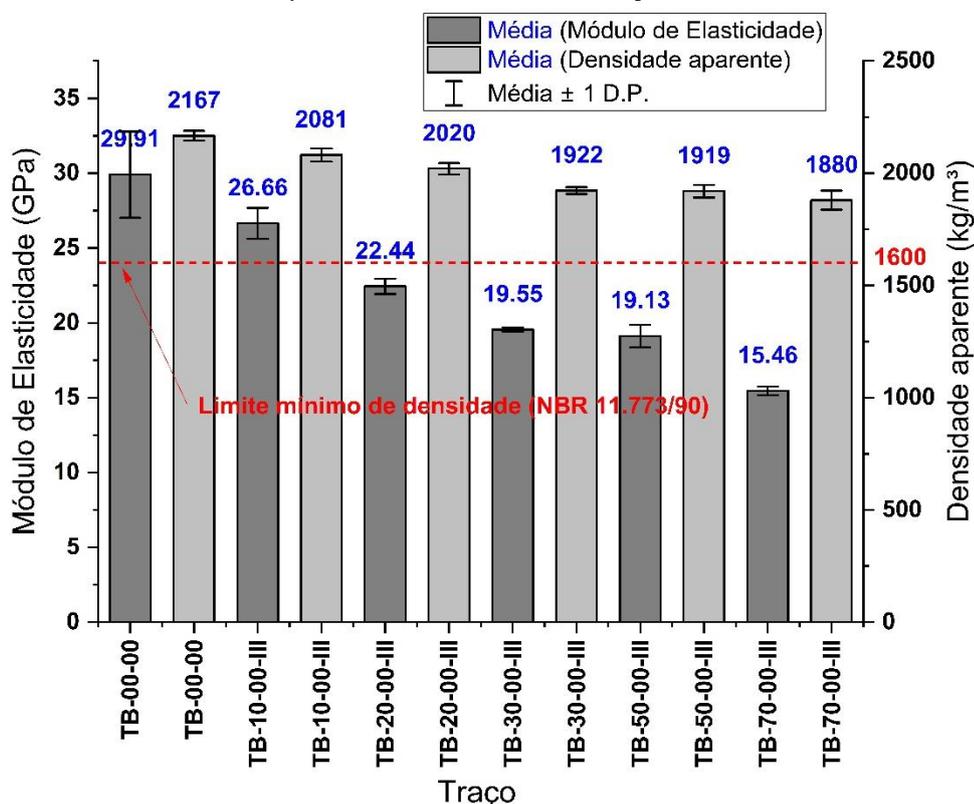
Série (traço)	Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F*	P-valor
B	1	5	6,06596	1,21319	3,67286	0,0301
	2	12	3,96375	0,33031		
C	1	5	96,09416	19,21883	74,90456	<0,0001
	2	12	3,07893	0,25658		
D	1	6	21,57486	3,59581	5,2273	0,00513
	2	14	9,63047	0,68789		
E	1	7	6,8612	0,98017	2,77859	0,04288
	2	16	5,64413	0,35276		

Série (traço)	Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F*	P-valor
E 7 dias	1	4	10,42658	2,60664	21,39874	0,00013
	2	9	1,09632	0,12181		

*Razão entre as médias quadradas; 1) Entre grupos; 2) Dentro dos grupos (Residual)
Fonte: Próprio autor.

Nas análises de densidade aparente e módulo de elasticidade (propagação de onda ultrassônica) apresentadas nos gráficos das Figuras 124, 125 e 127, é possível observar uma correlação entre ambas as grandezas, à medida que a densidade diminuía o módulo de elasticidade também apresentava redução. Essa provável correlação pode ser explicada pela menor densidade do resíduo de lona de freio em relação à areia, uma vez que quanto menor a densidade do material, menor será a velocidade de propagação da onda ultrassônica e conseqüentemente menor será o módulo de elasticidade. Outro fator que pode ter colaborado de maneira significativa para a redução de ambas as grandezas, foi o aumento do Índice de vazios constatado na referida análise (Figura 132), o que também pode guardar relação com os vazios observados na análise de microestrutura por MEV (Figura 195) de traço com resíduo de lona de freio.

Figura 124 – Módulo de elasticidade dinâmico (propagação de onda ultrassônica) e densidade de massa aparente do CCA com o traço da série “B” aos 28 dias



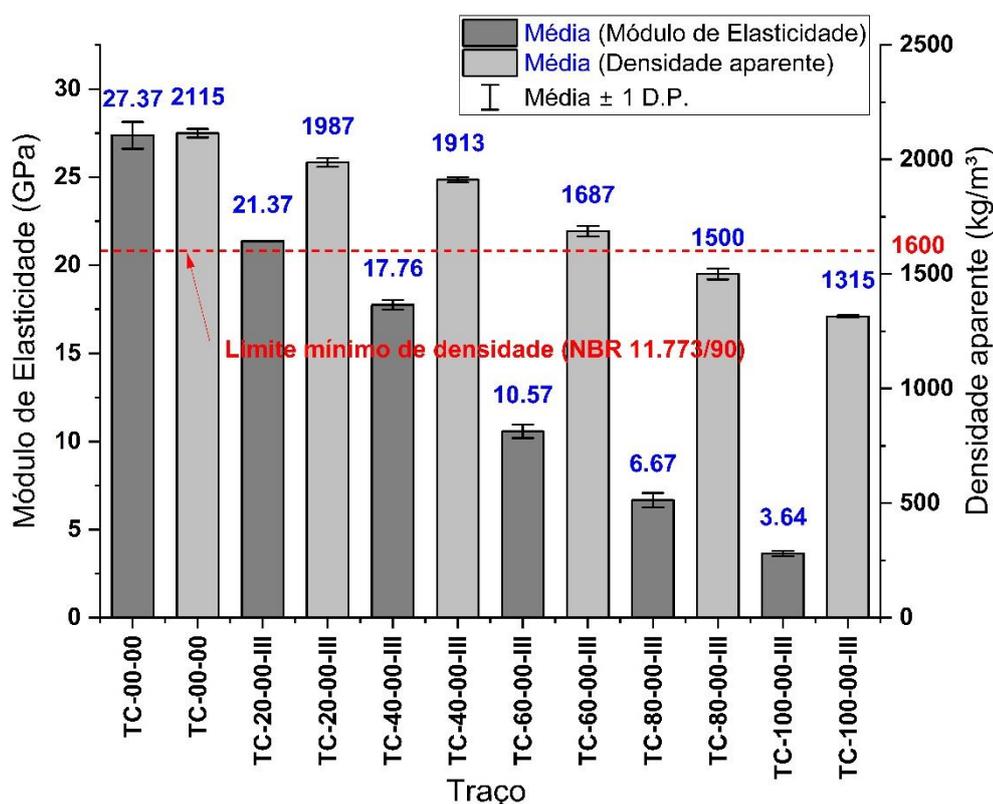
Fonte: Próprio autor.

O traço TB-10-00-III não apresentou diferença estatisticamente significativa na alteração do módulo de elasticidade dinâmico, em relação ao traço de referência (TB-00-00), conforme *Tukey Test* (Figura A12).

Mediante análise de Correlação de Pearson, verificou-se que entre os valores de densidade aparente e módulo de elasticidade da série “B” o coeficiente foi de 0,99 e da série “C” de 0,98, o que significa alta correlação.

Em relação à densidade de massa aparente, os únicos resultados que não atenderam ao disposto no limite preconizado pela ABNT NBR 11173 (1990), foram os traços TC-80-00-III e TC-100-00-III.

Figura 125 – Módulo de elasticidade dinâmico (propagação de onda ultrassônica) e densidade de massa aparente do CCA com o traço da série “C” aos 28 dias



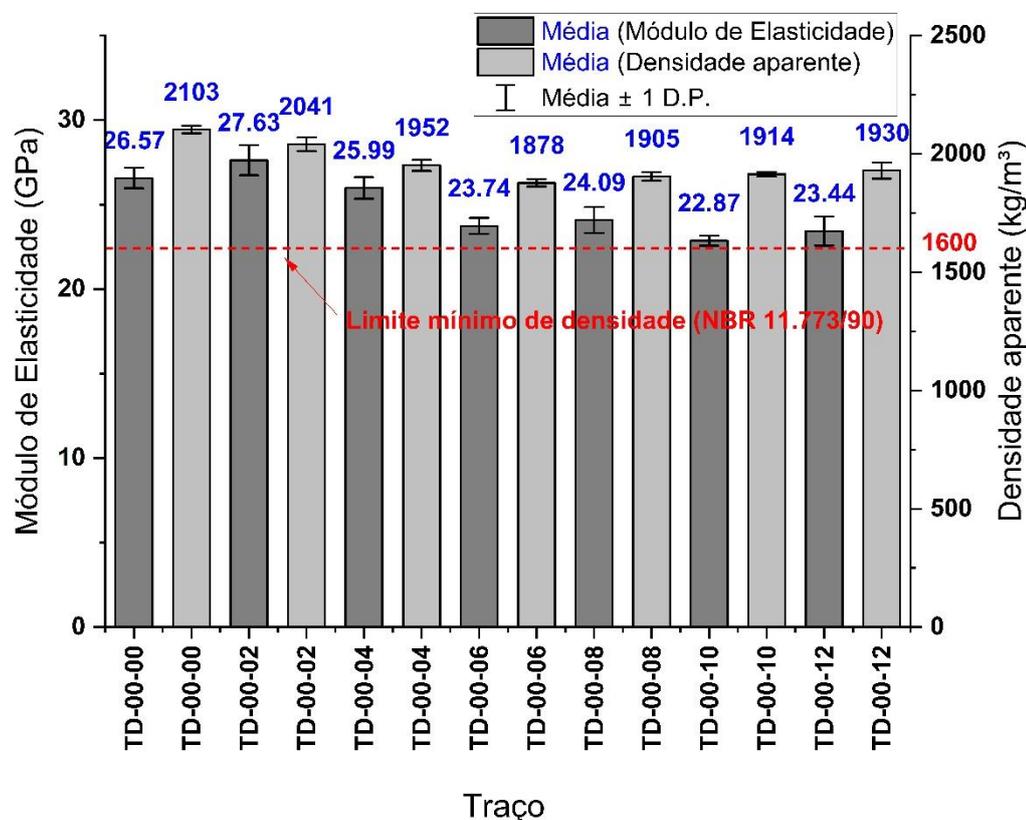
Fonte: Próprio autor.

Os maiores valores de densidade aparente e módulo de elasticidade dos traços da série “B” em relação a série “C”, se dão devido à diferença de proporção de agregado miúdo de 1:1 para 1:2.

No caso da correlação entre o módulo de elasticidade e a densidade da série “D” (Figura 126), essa foi de 0,82. Tal situação pode estar associada à diferença de

densidade entre a fibra de carbono e o resíduo de lona de freio.

Figura 126 – Módulo de elasticidade dinâmico (propagação de onda ultrassônica) e densidade de massa aparente do CCA com o traço da série “D” aos 28 dias

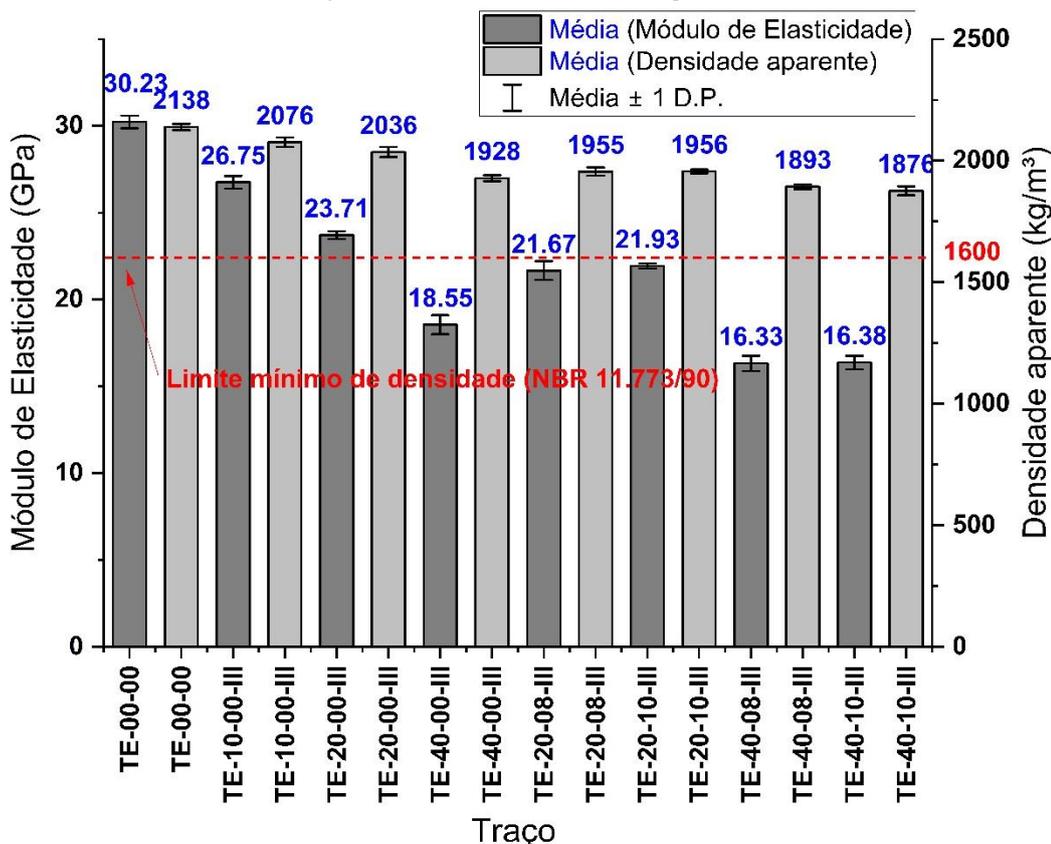


Fonte: Próprio autor.

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), conforme *Tukey Test* (Figura A14).

Quanto à combinação do resíduo com a fibra de carbono, a correlação entre o módulo de elasticidade e densidade foi de 0,98 nos casos dos traços TE-20-08-III, TE-20-10-III, TE-40-08-III, TE-40-10-III (Figura 127). Tal situação pode ser um indicativo de que a densidade do resíduo e o aumento do Índice de vazios (Figura 132) exerceu mais influência no módulo de elasticidade, do que a adição da fibra de carbono.

Figura 127 – Módulo de elasticidade dinâmico (propagação de onda ultrassônica) e densidade de massa aparente do CCA com o traço da série “E” aos 28 dias

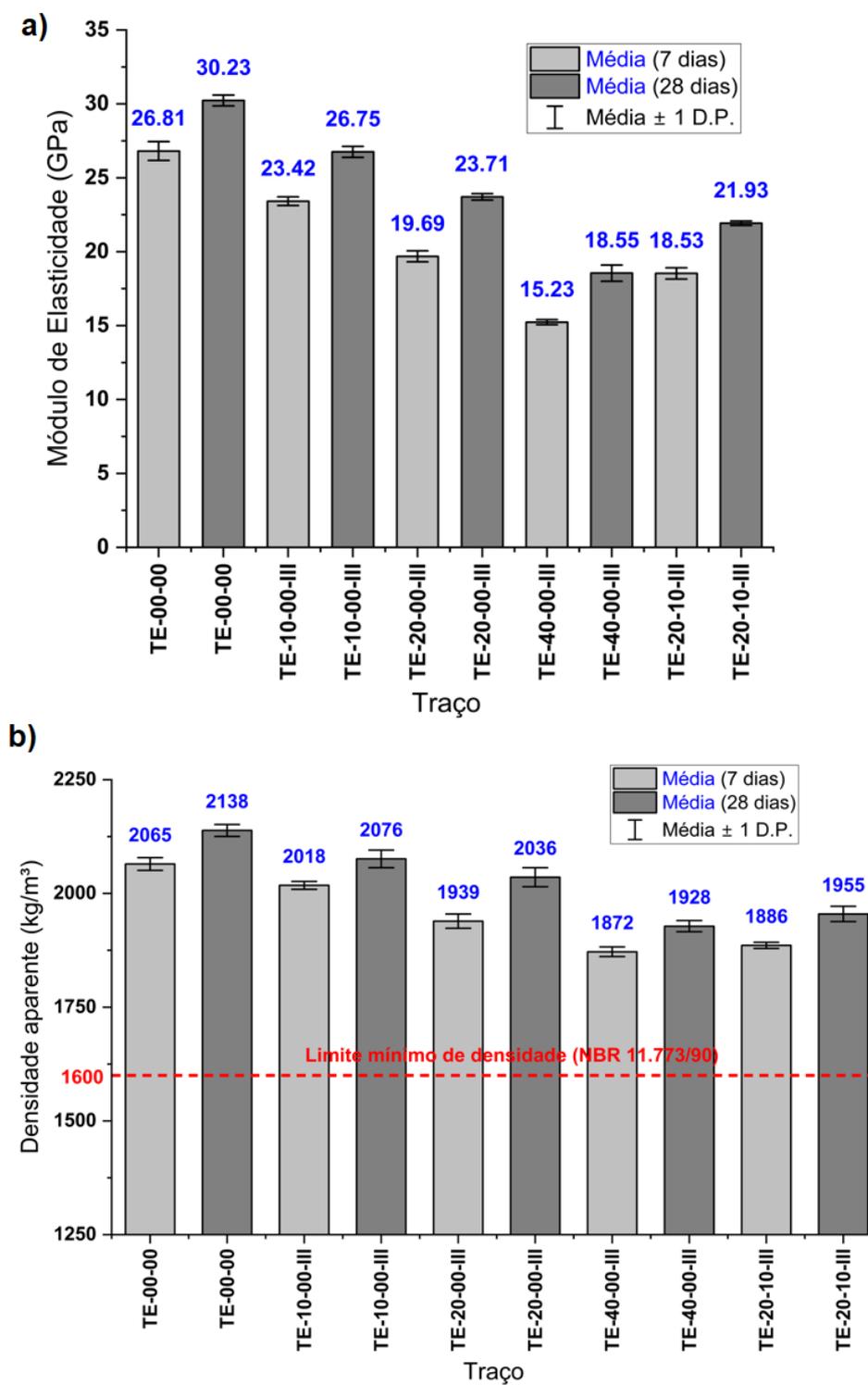


Fonte: Próprio autor.

Na análise aos 7 dias de idade (Figura 128) dos traços selecionados, a correlação entre as grandezas (módulo de elasticidade e densidade) permaneceu em 0,98. A variação da densidade entre 7 e 28 dias foi pequena, o que indica que a variação do módulo de elasticidade entre ambas as idades, possivelmente ficou associada ao processo de cura do cimento e perda de água.

A partir dos resultados individuais de módulo de elasticidade dinâmico das séries “B” a “E”, foi obtido P-valor da análise de variância constante da Tabela 29, consolidando a hipótese alternativa de que há diferença entre os grupos (de uma mesma série) para um nível crítico de significância de 0,05.

Figura 128 – Módulo de elasticidade dinâmico (propagação de onda ultrassônica) (a) e densidade de massa aparente (b) do CCA nos traços da série “E” (parcial) aos 7 e 28 dias



Fonte: Próprio autor.

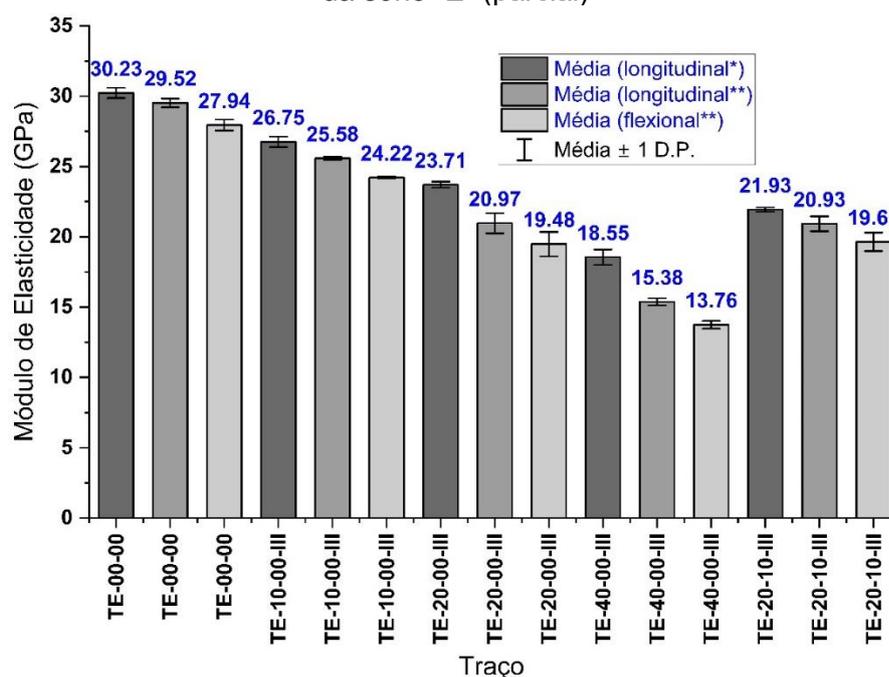
Tabela 29 – Análise de variância dos resultados de módulo de elasticidade dinâmico (propagação de onda ultrassônica)

Série (traço)	Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F*	P-valor
B	1	5	423,82928	84,76586	49,47998	<0,0001
	2	12	20,55761	1,71313		
C	1	5	1254,72974	250,94595	1513,206	<0,0001
	2	12	1,99005	0,16584		
D	1	6	59,01057	9,83509	21,42237	<0,0001
	2	14	6,42745	0,4591		
E	1	7	507,13769	72,44824	452,4593	<0,0001
	2	16	2,56194	0,16012		
E 7 dias	1	4	241,0389	60,25973	374,4091	<0,0001
	2	10	1,60946	0,16095		

*Razão entre as médias quadradas; 1) Entre grupos; 2) Dentro dos grupos (Residual)
Fonte: Próprio autor.

Na comparação (Figura 129) entre as diferentes técnicas para determinação do módulo de elasticidade dinâmico, as variações entre os diferentes traços se mostraram coerentes com cada uma das técnicas adotadas. Isso indica que não há comprometimento dos resultados nas análises com resíduos de lona de freio nos traços estudados por diferentes técnicas. Isto destaca-se em um cenário onde até então não se tinha registro na literatura da determinação de módulo de elasticidade de argamassa ou concreto com resíduo de lona de freio.

Figura 129 – Módulo de elasticidade dinâmico (propagação de onda ultrassônica* e frequências naturais de vibração**) e densidade de massa aparente do CCA com os traços da série “E” (parcial)



Fonte: Próprio autor.

A partir dos resultados individuais de módulo de elasticidade dinâmico (técnica de frequências naturais de vibração) da série “E” (parcial) foi obtido P-valor da análise de variância constante da Tabela 30, consolidando a hipótese alternativa de que há diferença entre os grupos para um nível crítico de significância de 0,05.

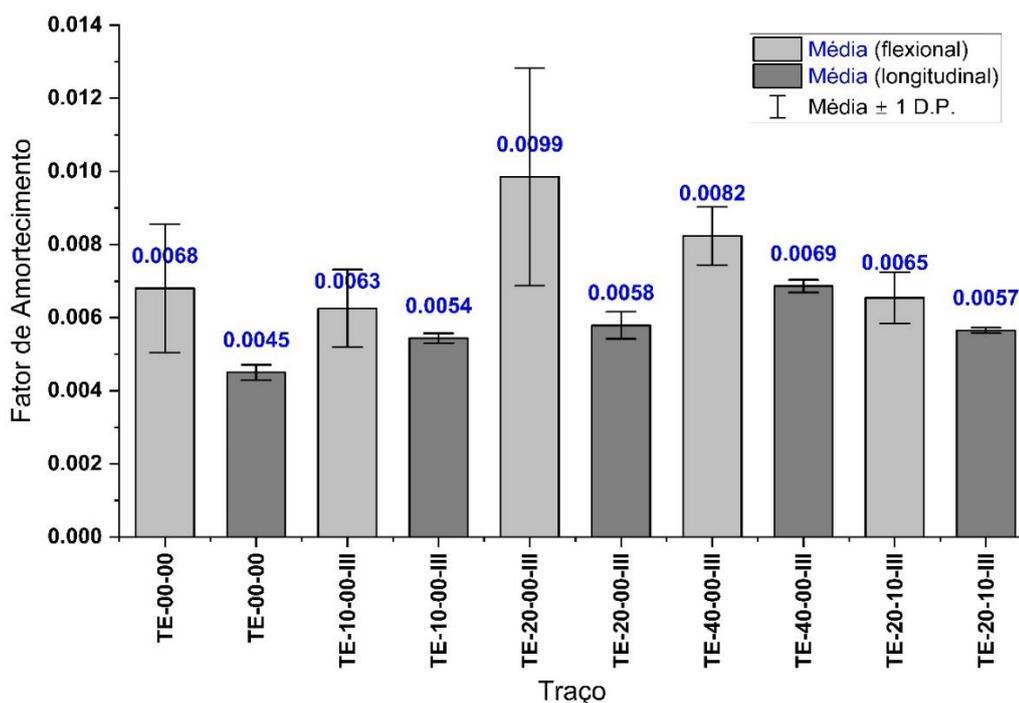
Tabela 30 – Análise de variância dos resultados de módulo de elasticidade dinâmico (técnica de frequências naturais de vibração)

Tipo	Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F*	P-valor
Long.	1	4	342,90137	85,72534	451,4712	<0,0001
	2	10	1,8988	0,18988		
Flex.	1	4	345,49271	86,37318	307,3050	<0,0001
	2	10	2,81067	0,28107		

*Razão entre as médias quadradas; 1) Entre grupos; 2) Dentro dos grupos (Residual)
Fonte: Próprio autor.

O aumento da substituição da areia por resíduo de lona de freio provocou uma elevação no Fator de Amortecimento (Figura 130). Esse comportamento também é observado com a incorporação de outros materiais em compósitos cimentícios (Sridhar; Prasad, 2019; Habib; Yildirim; Eren, 2020; Tian *et al.*, 2020). Contudo, o método flexional apresentou desvio padrão elevado em cada uma das análises, quando comparado ao desvio obtido pelo método longitudinal.

Figura 130 – Fator de amortecimento (frequências naturais de vibração) do CCA com os traços da série “E” (parcial)



Fonte: Próprio autor.

A partir dos resultados individuais do Fator de Amortecimento da série “E” (parcial) foi obtido P-valor da análise de variância constante da Tabela 31, consolidando a hipótese alternativa de que há diferença entre os grupos no caso do método longitudinal e de que não há diferença método flexional, para um nível crítico de significância de 0,05.

Tabela 31 – Análise de variância dos resultados do Fator de Amortecimento (frequências naturais de vibração)

Tipo	Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F*	P-valor
Long.	1	4	8,60E-06	2,15E-06	4,53E+01	<0,0001
	2	10	4,75E-07	4,75E-08		
Flex.	1	4	2,71E-05	6,77E-06	2,38347	0,12096
	2	10	2,84E-05	2,84E-06		

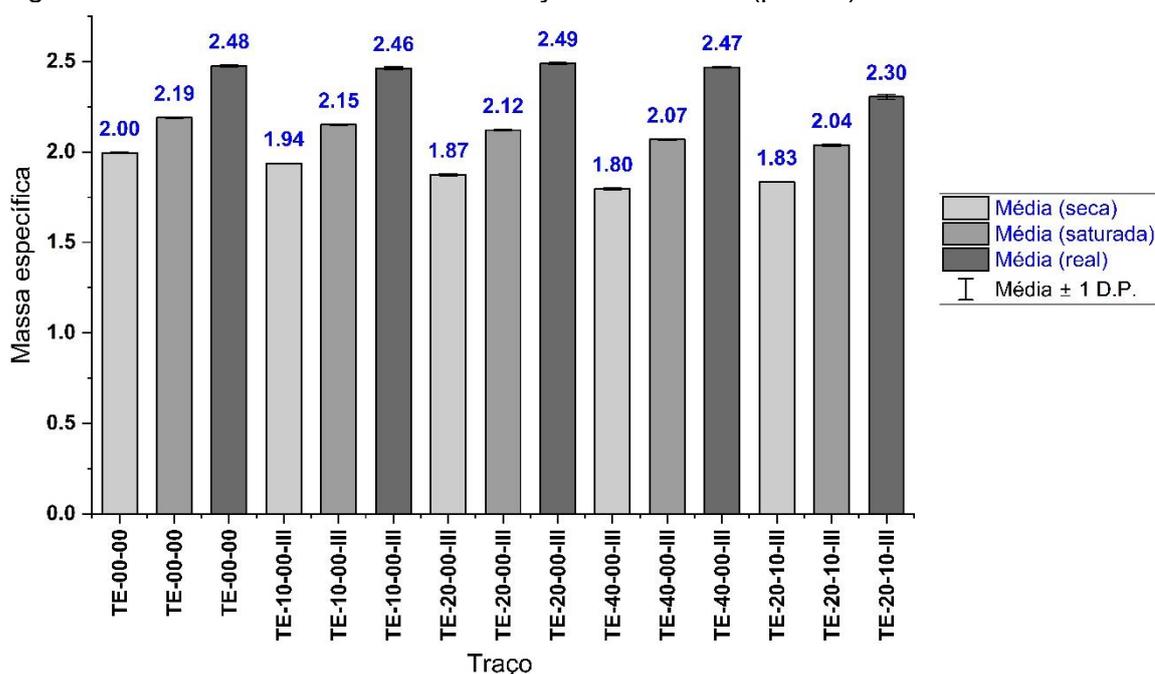
*Razão entre as médias quadradas; 1) Entre grupos; 2) Dentro dos grupos (Residual)
Fonte: Próprio autor.

Em relação à análise das massas específicas (Figura 131), apesar da diferença de densidade entre a areia e o resíduo de lona de freio, a massa específica real do CCA teve variações insignificantes quando comparada à amostra de referência (TE-00-00). Tal situação não ocorreu com o traço TE-20-10-III, o que provavelmente se deu em função da influência da densidade da fibra de carbono.

Ainda em relação às massas específicas (Figura 131), a redução da massa seca com a substituição da areia pelo resíduo pode estar associada ao aumento da porosidade (Figura 132, Índice de vazios) ocorrido com a substituição em questão. Tal situação é ligeiramente atenuada com a adição da fibra de carbono, como mostra o resultado do traço TE-20-10-III. Quanto à variação da massa específica saturada, esta pode estar associada ao preenchimento dos poros permeáveis pela água.

A partir dos resultados individuais das massas específicas, foi obtido P-valor da análise de variância constante da Tabela 32, consolidando a hipótese alternativa de que há diferença entre os grupos para um nível crítico de significância de 0,05.

Figura 131 – Massas do CCA com os traços da série “E” (parcial) no estado endurecido



Fonte: Próprio autor.

Tabela 32 – Análises de variância das massas específicas (seca, saturada e real) entre os diferentes traços analisados

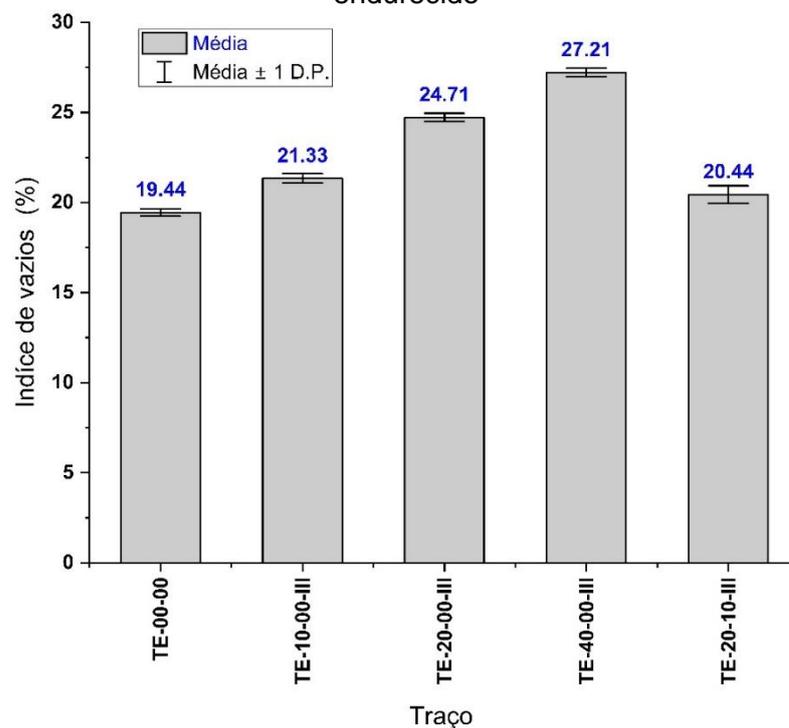
Tipo	Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F*	P-valor
Seca	1	4	0,07637	0,01909	2466,268	<0,0001
	2	10	7,74E-05	7,74E-06		
Saturada	1	4	0,04488	0,01122	1183,361	<0,0001
	2	10	9,48E-05	9,48E-06		
Real	1	4	0,07019	0,01755	262,2353	<0,0001
	2	10	6,69E-04	6,69E-05		

*Razão entre as médias quadradas; 1) Entre grupos; 2) Dentro dos grupos (Residual)
Fonte: Próprio autor.

Os traços TE-10-00-III, TE-20-00-III e TE-40-00-III não apresentaram diferença estatisticamente significativa na alteração massa específica real, em relação ao traço de referência (TE-00-00), conforme *Tukey Test* (Figura A23).

A respeito do Índice de vazios (Figura 132) e da absorção de água (Figura 133), ambos estão diretamente correlacionados entre si, ao ponto que o Coeficiente de Pearson entre as duas grandezas para os traços TE-00-00, TE-10-00-III, TE-20-00-III e TE-40-00-III é 1. Esse aumento de vazios mediante a substituição da areia por resíduo de lona de freio também observado por Wang *et al.* (2017) mediante uso da técnica de penetração de mercúrio. Este aumento do Índice de vazios afeta diretamente outras propriedades mecânicas, como resistências e deformação.

Figura 132 – Índice de vazios do CCA com os traços da série “E” (parcial) no estado endurecido



Fonte: Próprio autor.

A partir dos resultados individuais de Índice de vazios da série “E” (parcial) foi obtido P-valor da análise de variância constante da Tabela 33, consolidando a hipótese alternativa de que há diferença entre os grupos para um nível crítico de significância de 0,05.

Tabela 33 – Análise de variância do Índice de vazios da série “E” (parcial)

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F*	P-valor
Entre grupos	4	125,93312	31,48328	339,38595	<0,0001
Dentro dos grupos**	10	0,92765	0,09277		

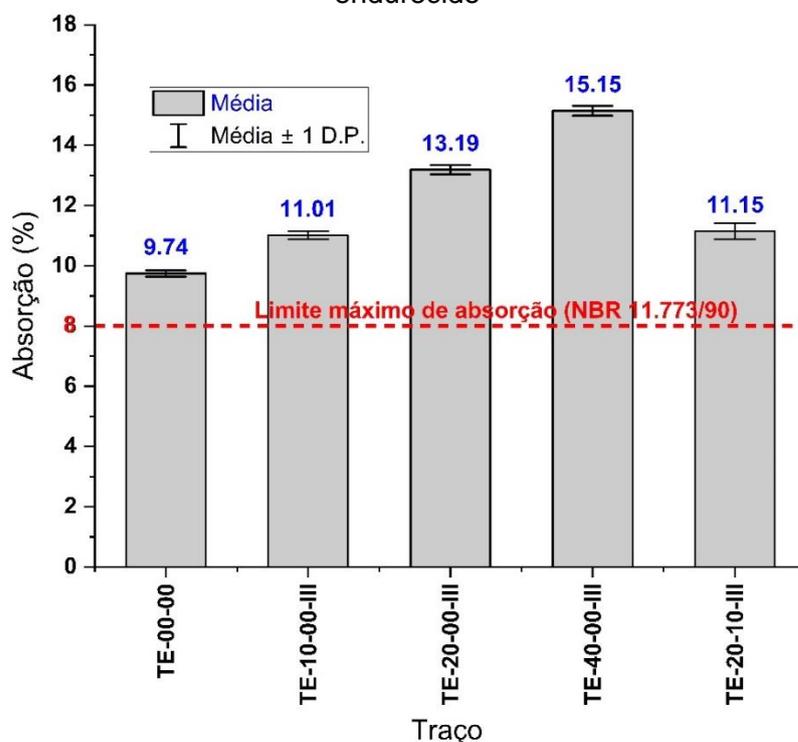
*Razão entre as médias quadradas; **Residual

Fonte: Próprio autor.

Todos os percentuais de absorção de água obtidos (Figura 133), ficaram superiores ao limite estabelecido pela ABNT NBR 11773 (1990), inclusive o traço de referência (TE-00-00), o qual está dentro dos parâmetros de relação água/cimento e agregado/cimento da referida norma. Apesar de tal absorção não se mostrar benéfica ao compósito, especialmente no que se refere à maior vulnerabilidade de eventuais armaduras embutidas numa estrutura, Wang *et al.* (2017) constataram que a incorporação do resíduo de lona de freio pode melhorar a resistência à penetração de íons cloreto, uma vez que o resíduo influenciou no diâmetro dos poros. Tal aumento

de resistência a penetração de íons cloreto pode colaborar com a melhora da durabilidade do compósito.

Figura 133 – Absorção de água do CCA com os traços da série “E” (parcial) no estado endurecido



Fonte: Próprio autor.

A partir dos resultados individuais de absorção de água da série “E” (parcial) foi obtido P-valor da análise de variância constante da Tabela 34, consolidando a hipótese alternativa de que há diferença entre os grupos para um nível crítico de significância de 0,05.

Tabela 34 – Análise de variância da absorção de água da série “E” (parcial)

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F*	P-valor
Entre grupos	4	54,28919	13,5723	447,50034	<0,0001
Dentro dos grupos**	10	0,30329	0,03033		

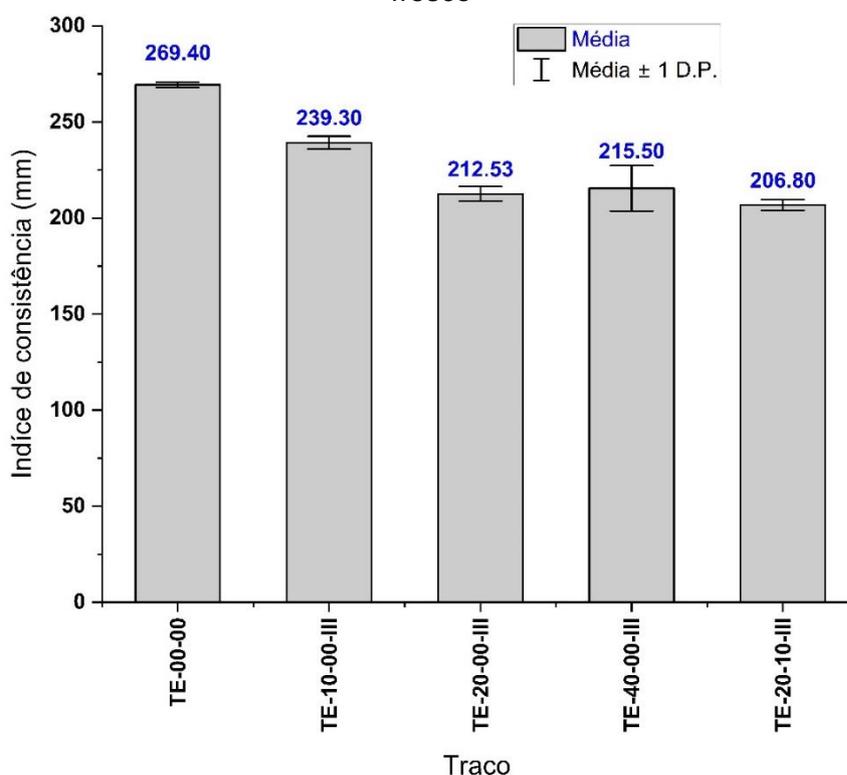
*Razão entre as médias quadradas; **Residual

Fonte: Próprio autor.

No estado fresco, a consistência do CCA sofreu influência significativa com a incorporação do resíduo (Figura 134), atingindo um patamar entre os traços TE-20-00-III e TE-40-00-III. A redução no Índice de consistência pode estar associada ao aumento da superfície específica do resíduo, quando comparado à da areia, visto que o resíduo na 3ª etapa de trituração apresentou menor granulometria que a da areia. A pouca diferença entre os traços TE-20-00-III e TE-20-10-III, se dá pelo fato de que a

segunda contou com o emprego de superplastificante, conforme Tabela 17 (tabela de traços da série “E”), fazendo com que a influência da fibra fosse atuada.

Figura 134 – Índice de consistência do CCA com o traço da série “E” (parcial) no estado fresco



Fonte: Próprio autor.

A partir dos resultados individuais do Índice de consistência da série “E” (parcial) foi obtido P-valor da análise de variância constante da Tabela 35, consolidando a hipótese alternativa de que há diferença entre os grupos para um nível crítico de significância de 0,05.

Tabela 35 – Análise de variância do Índice de consistência da série “E” (parcial)

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F*	P-valor
Entre grupos	4	8052,18267	2013,04567	57,00311	<0,0001
Dentro dos grupos**	10	353,14667	35,31467		

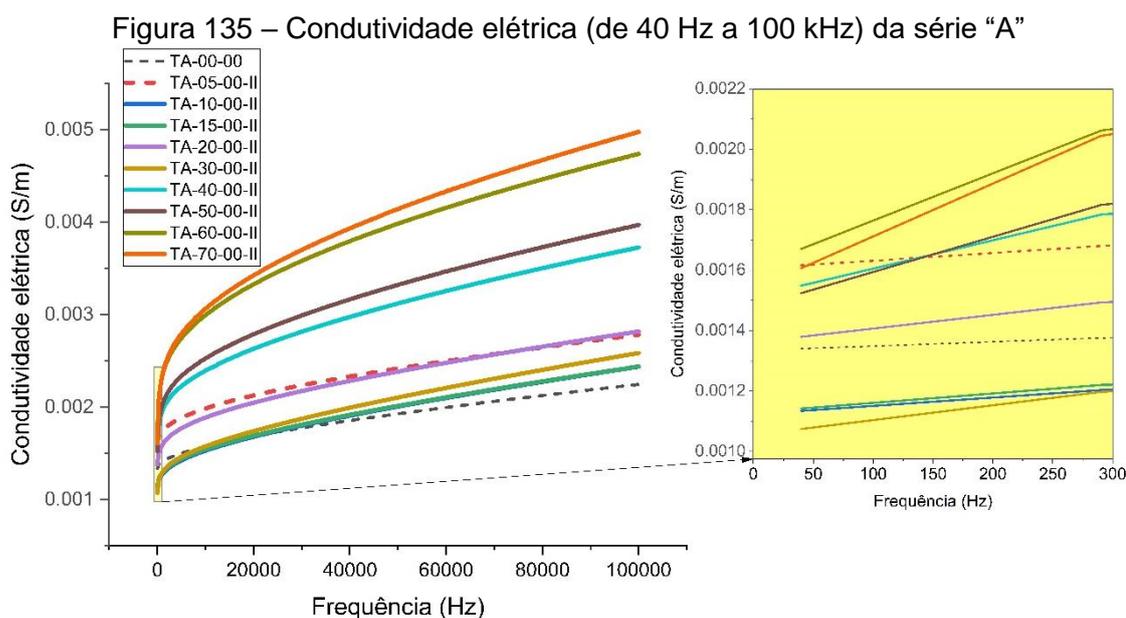
*Razão entre as médias quadradas; **Residual

Fonte: Próprio autor.

Ainda quanto ao Índice de consistência, este pode ser modificado mediante a utilização de aditivos específicos, como foi o caso dos traços das séries “B” e “C”.

4.1.3 Análise das propriedades elétricas

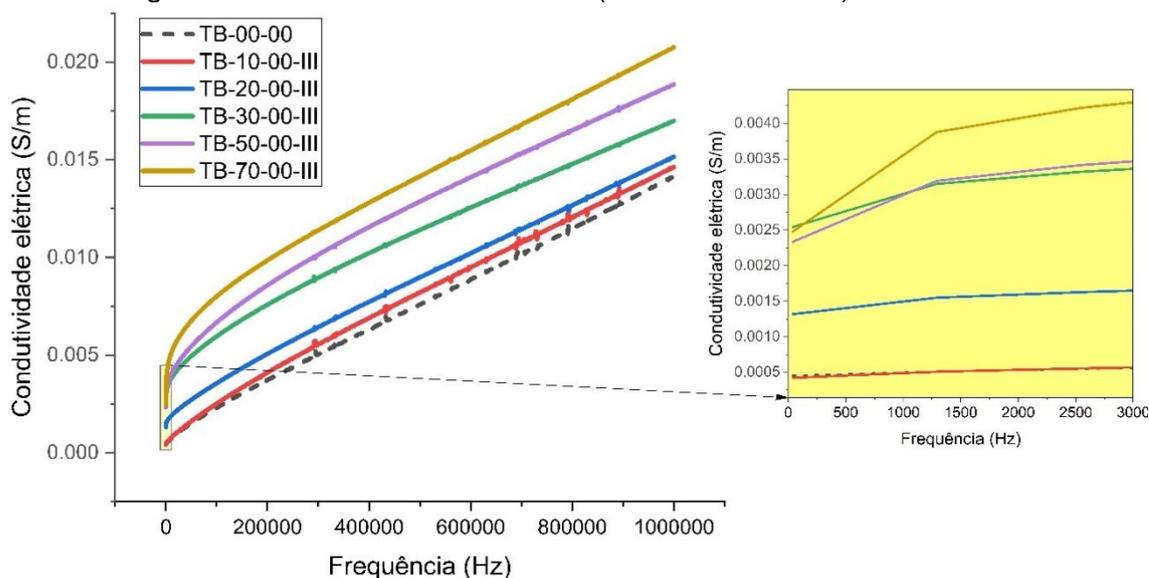
As Figuras 135 a 139 apresentam os resultados das análises de condutividade elétrica dos traços das séries “A” a “E”. No caso da série “A”, é possível observar que em baixas frequências (0,3% da máxima) na ampliação da Figura 135, nem todos os traços apresentaram maior condutividade que o traço de referência (TA-00-00). Por limitações operacionais quando da análise da série “A”, a frequência máxima foi de 100 kHz, enquanto que nas demais séries foi de 1 MHz.



O aumento de forma não gradual da condutividade elétrica com o aumento da incorporação do material condutor, como no caso do maior valor de condutividade de TA-05-00-II em relação a TA-10-00-II a TA-30-00-II, pode estar relacionado a dispersão não homogênea dos mesmos na matriz cimentícia (Belli *et al.*, 2018; Faneca *et al.*, 2018; Segura *et al.*, 2019).

Na série “B” (Figura 136), a qual contou com redução granulométrica do resíduo de lona de freio e incorporação de aditivo (inclusive no traço de referência) em relação à série “A”, foi possível observar que mesmo em baixas frequências (0,3% da máxima) quase todos os traços (exceto TB-10-00-III) apresentaram maior condutividade que o traço de referência (TB-00-00).

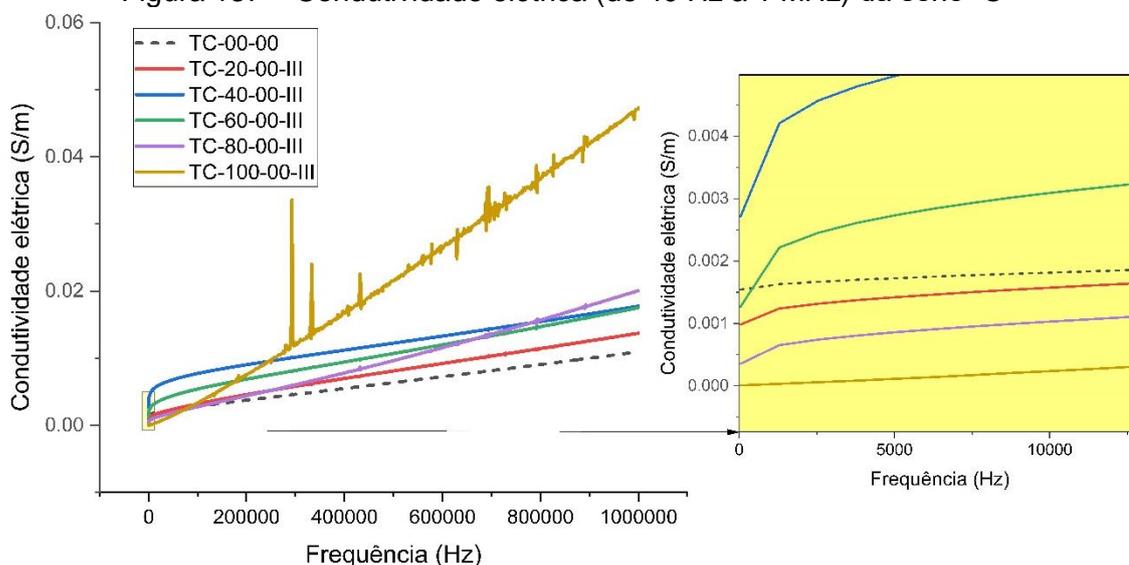
Figura 136 – Condutividade elétrica (de 40 Hz a 1 MHz) da série “B”



Fonte: Próprio autor.

A série “C” (Figura 137), em relação às anteriores, contou com a mudança do traço de 1:1:0,37 para 1:2:0,45. Em baixas frequências (1,5% da máxima) somente os traços TC-40-00-III e TC-60-00-III tiveram condutividade maior que o traço de referência (TC-00-00). Entretanto o destaque da série “C” foi o traço com a completa substituição da areia pelo resíduo de lona de freio (TC-100-00-III), que obteve resposta aparentemente linear da condutividade em relação ao aumento de frequência, o que correu de forma similar com o traço TC-80-00-III. Tal situação mostra quão influente a areia pode ser no comportamento da condutividade elétrica do compósito.

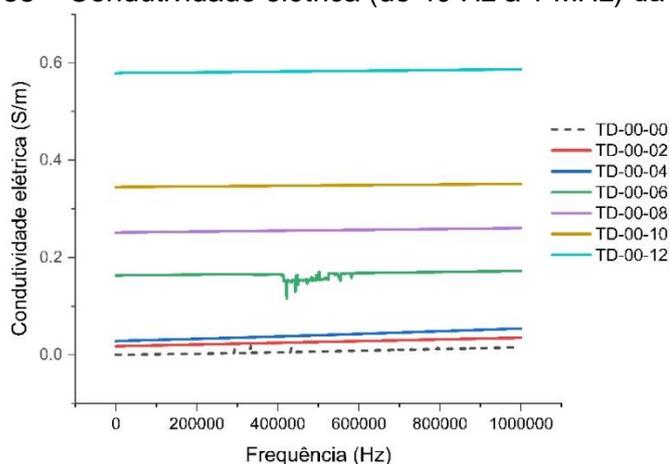
Figura 137 – Condutividade elétrica (de 40 Hz a 1 MHz) da série “C”



Fonte: Próprio autor.

Quanto a série “D” (Figura 138), essa não contou com resíduo, mas sim com fibra de carbono. Apesar de não ser possível observar a mudança da condutividade elétrica com o aumento da frequência, o traço TD-00-00 aumentou a condutividade em aproximadamente 1470 vezes entre 40 Hz a 1 MHz. Já os demais traços tiveram aumentos de apenas uma a duas vezes entre a menor e a maior frequência, o que mostra a baixa influência da frequência nos CCAs com fibra de carbono.

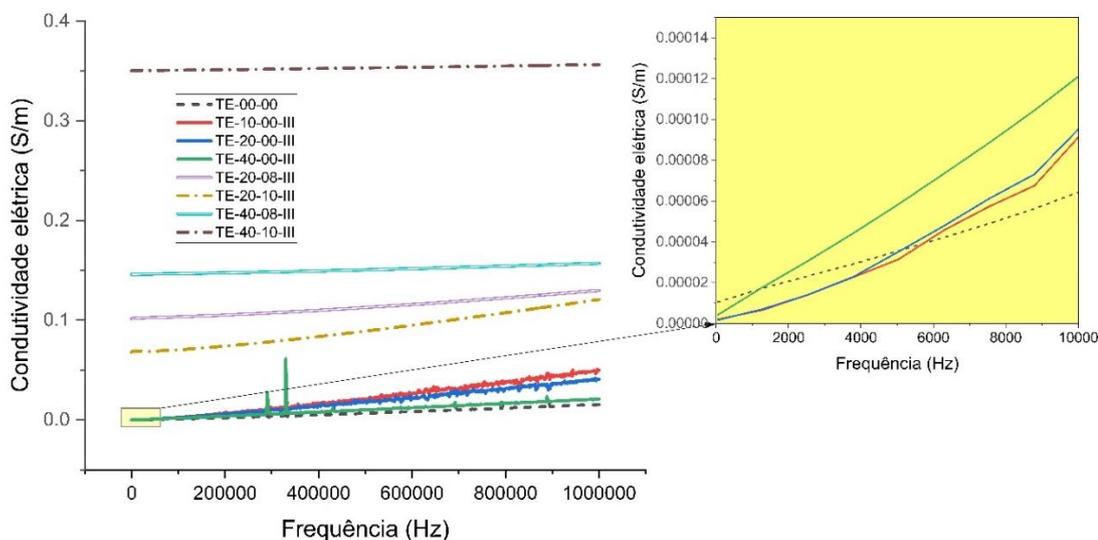
Figura 138 – Condutividade elétrica (de 40 Hz a 1 MHz) da série “D”



Fonte: Próprio autor.

Por fim, a série “E” (Figura 139), a qual combinou a incorporação do resíduo de lona de freio com a fibra de carbono, permitiu observar a prevalência do comportamento condutivo da fibra em relação a combinação com o resíduo. Entretanto, apesar da referida prevalência, à combinação provocou redução na condutividade, quando comparado aos traços da série “D”, ou seja, somente com a fibra de carbono.

Figura 139 – Condutividade elétrica (de 40 Hz a 1 MHz) da série “E”

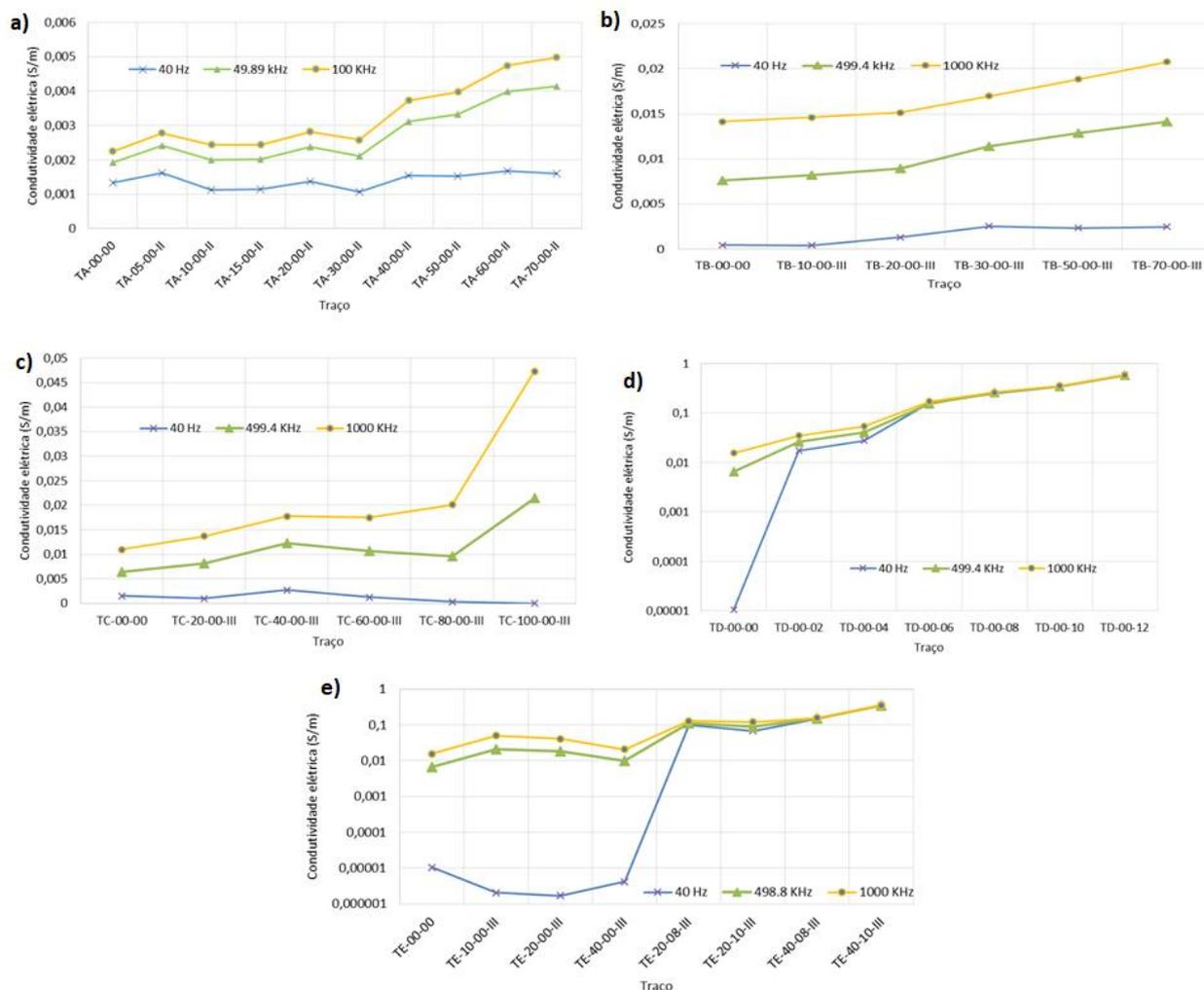


Fonte: Próprio autor.

A Figura 140, apresenta um comparativo de condutividade elétrica por traços de todas as séries (“A” a “E”), na frequência mínima, média e máxima de cada um dos ensaios. A partir da Figura 140a, é possível constatar que o aumento de condutividade começa a ser visualmente significativo a partir do traço TA-40-00-II. Na Figura 140b esse aumento começa a partir do traço TB-30-00-III. Na série “C” (Figura 140c) o aumento começa a partir do traço TC-40-00-III. Na Figura 140d o aumento começa a partir do traço TD-00-02, contudo, esse aumento fica mais significativo a partir da série TD00-06. Na série “E” (Figura 140e) além do aumento significativo com a incorporação da fibra de carbono é possível observar que em baixa frequência (40 Hz) o traço de referência (TE-00-00) e os demais somente com resíduo (TE-10-00-III a TE-40-00-III), têm comportamento bem distinto dos traços com a incorporação da fibra com o resíduo. Ainda quanto a série “E”, o traço TE-40-00-III apresentou em algumas frequências, condutividade menor que os traços TE-10-00-III e TE-20-00-III, o que pode ser explicado em função de datas diferentes de produção dos corpos de prova (possíveis variações de temperatura e umidade), bem como idade de realização do ensaio, que no caso do traço TE-40-00-III se deu com mais de 28 dias.

Embora relativamente subjetiva, à caracterização da zona do limiar de percolação, previamente ilustrada nas Figuras 13 e 14, pode ter tido início no traço TA-30-00-II da série “A”, conforme Figura 140a. No caso da série “B”, não foi observada redução abrupta que pudesse ser identificada na Figura 140b. Na série “C” o início da zona ficou mais evidente a partir do traço TC-80-00-III. No caso do CCA somente com fibras de carbono, apesar de pouco evidente, o início da zona pode ser caracterizado a partir do traço TD-00-04. Por fim, na série “E”, o início da zona ocorreu a partir do traço TE-40-00-III, seguido pelo traço TE-20-08-III, sendo esse segundo com a adição da fibra de carbono.

Figura 140 – Condutividade elétrica por traços, na frequência mínima, média e máxima dos ensaios



Fonte: Próprio autor.

A partir dos resultados individuais que subsidiaram os valores médios de condutividade elétrica da Figura 140, foi obtido P-valor da análise de variância para os casos constantes da Tabela 36, consolidando a hipótese de que não há diferença entre os grupos para um nível crítico de significância de 0,05, apenas para as análises na frequência de 40 Hz da série “A” e de 1 MHz da série “B”.

Tabela 36 – Análise de variância (ANOVA) da condutividade elétrica das séries “A” a “E”

Série	Freq.	Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F*	P-valor
A	40 Hz	1	9	2,29E-06	2,54E-07	1,69239	0,1176
		2	47	7,06E-06	1,50E-07		
	49,98 kHz	1	9	2,86E-05	3,18E-06	12,48457	<0,0001
		2	47	1,20E-05	2,54E-07		
	100 kHz	1	9	4,22E-05	4,69E-06	17,11913	<0,0001
		2	47	1,29E-05	2,74E-07		

Série	Freq.	Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F*	P-valor
B	40 Hz	1	5	5,00E-05	1,00E-05	38,8267	<0,0001
		2	48	1,24E-05	2,58E-07		
	499,4 kHz	1	5	2,15E-04	4,29E-05	7,49478	<0,0001
		2	48	2,75E-04	5,73E-06		
	1 MHz	1	5	2,33E-04	4,66E-05	1,7658	0,13791
		2	48	0,00127	2,64E-05		
C	40 Hz	1	5	4,12E-05	8,23E-06	52,39606	<0,0001
		2	48	7,54E-06	1,57E-07		
	499,4 kHz	1	5	0,00147	2,94E-04	85,67593	<0,0001
		2	48	1,65E-04	3,43E-06		
	1 MHz	1	5	0,00886	0,00177	151,7734	<0,0001
		2	48	5,61E-04	1,17E-05		
D	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		
E	40 Hz	1	7	9,19E-01	1,31E-01	72,20727	<0,0001
		2	61	1,11E-01	1,82E-03		
	498,8 kHz	1	7	0,85864	0,12266	73,53299	<0,0001
		2	61	0,10176	0,00167		
	1 MHz	1	7	0,79172	0,1131	78,11868	<0,0001
		2	61	0,08832	0,00145		

*Razão entre as médias quadradas; 1) Entre grupos; 2) Dentro dos grupos (Residual)
Fonte: Próprio autor.

No caso da série "A", os traços a partir da substituição de 40% da areia por resíduo (TA-40-00-II), apresentaram diferença estatisticamente significativa no aumento da condutividade elétrica em frequências de 49,98 kHz e 100 kHz, em relação ao traço de referência (TA-00-00), conforme *Tukey Test* (Figuras A28 e A29).

Em relação à série "B", os traços a partir da substituição de 20% da areia por resíduo (TB-20-00-III), apresentaram diferença estatisticamente significativa no aumento da condutividade elétrica em frequência de 40 Hz e somente o traço TB-70-00-III em frequência de 499,98 kHz, em relação ao traço de referência (TB-00-00), conforme *Tukey Test* (Figuras A28 e A29).

Quanto a série "C", apenas o traço TC-40-00-III apresentou diferença estatisticamente significativa no aumento da condutividade elétrica em frequência de 40 Hz. Nas frequências de 499,4 kHz e 1 MHz todos os traços a partir da substituição de 40% da areia por resíduo (TC-40-00-III) apresentaram diferença estatisticamente significativa

no aumento da condutividade elétrica em relação a referência (TC-00-00), conforme *Tukey Test* (Figuras A33, A34 e A35).

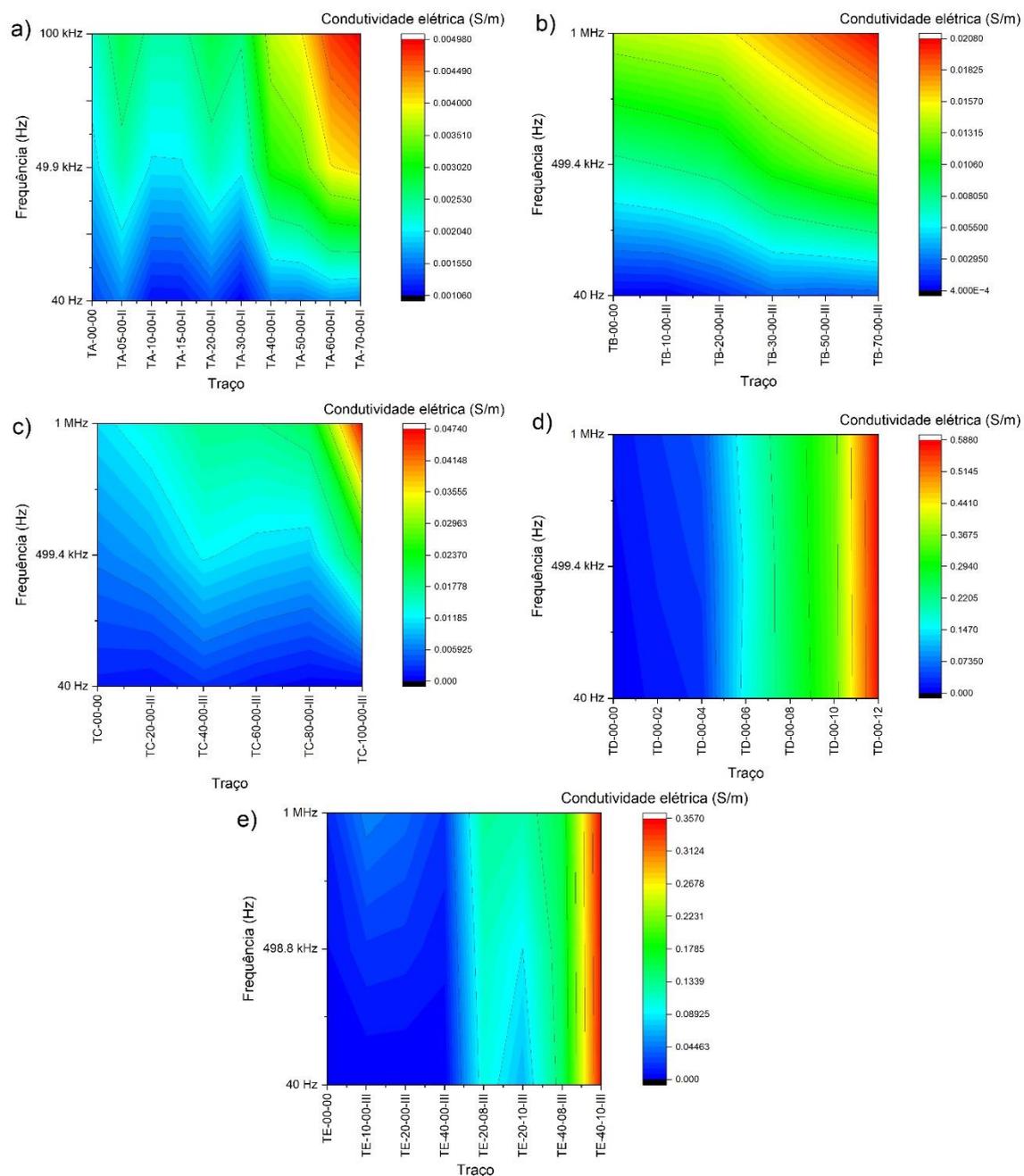
Na série “D”, nas frequências de 40 Hz, 499,4 kHz e 1 MHz todos os traços a partir da adição de 0,6% de fibra (TD-00-06) apresentaram diferença estatisticamente significativa no aumento da condutividade elétrica em relação à referência (TD-00-00), conforme *Tukey Test* (Figuras A36, A37 e A38).

Quanto à série “E”, em comparações dos traços com resíduo de lona de freio (sem fibra de carbono), todos apresentaram diferença estatisticamente significativa no aumento da condutividade elétrica em relação à referência (TE-00-00) nas frequências de 498,8 kHz e 1 MHz, conforme *Tukey Test* (Figuras A40 e A41).

Por fim, os traços com a combinação de resíduo de lona de freio e fibra de carbono da série “E”, apresentaram diferença estatisticamente significativa no aumento da condutividade elétrica em relação à referência (TE-00-00) nas frequências de 40 Hz, 498,8 kHz e 1 MHz, com exceção do traço TE-20-10-III na frequência de 40 Hz, conforme *Tukey Test* (Figuras A42 e A44).

A partir das curvas de condutividade elétrica por traços da Figura 141 é possível constatar graficamente no caso das séries “A” a “C” (Figuras 141a a 141c) que há aumento de condutividade por conta do aumento da quantidade de resíduo de lona de freio, ainda que haja influência da frequência ou até mesmo de outras variáveis como o traço, a relação a/c e o uso de aditivo. Já no caso das séries “D” (somente fibra de carbono, Figura 141d) e “E” (resíduo com fibra de carbono, Figura 141e), o principal componente de aumento da condutividade elétrica é a fibra de carbono, com exceção do traço TE-20-10-III que em baixa frequência (40 Hz), foi possivelmente influenciado pelo resíduo de lona de freio em sua redução de condutividade.

Figura 141 – Curvas de condutividade elétrica por traços, na frequência mínima, média e máxima dos ensaios



Fonte: Próprio autor.

A comparação dos resultados de condutividade elétrica desta pesquisa com outras de mesma natureza é algo extremamente complexo. Inicialmente pelo fato da escassez de pesquisas do gênero e da falta de padronização, especialmente no que tange às técnicas de medição. Contudo, foram selecionadas as pesquisas da Tabela 37, relativas à análise de propriedades elétrica de compósitos cimentícios na forma de

argamassas com resíduos e/ou materiais reciclados, para comparação (Figuras 142 e 143) com a presente pesquisa.

Tabela 37 – Referências para comparativos de propriedades elétricas de argamassas com resíduos e/ou materiais reciclados

Resíduo/Reciclado	Traço	Técnica de medição	Referência
Fibra de carbono reciclada (FCr)	1:3:0,5 com aditivo	Circuito de CC (cálculo de R a partir de U e I) com CPs secos a 60 °C	Belli <i>et al.</i> (2018)
Carvão gaseificado (CG) e fibra de carbono reciclada (FCr)	1:3:0,45 com aditivo	Analisador de impedância em frequências de 10 Hz a 1 MHz com amplitude de 10 mV	Mobili <i>et al.</i> (2022)
Cinza de bagaço de cana de açúcar (CBCA) e fibra de aço (FA)	1:0,3 ¹ :0,14 ² :0,09 ³ :0,25 com aditivo	Medidor LCR* em 100 kHz	Lian <i>et al.</i> (2024)
Cavaco de ferro (CF)	1:3:0,45	Circuito de CC (cálculo de R a partir de U e I) com amplitude de 30 V	Filazi, Yilmazel e Pul (2023)
Fibra de carbono reciclada (FCr)	1:1,45:0,07 ⁴ :0,28 ⁵ :0,14 com aditivo	Analisador de impedância em frequências de 50 Hz a 100 kHz	Segura <i>et al.</i> (2019)

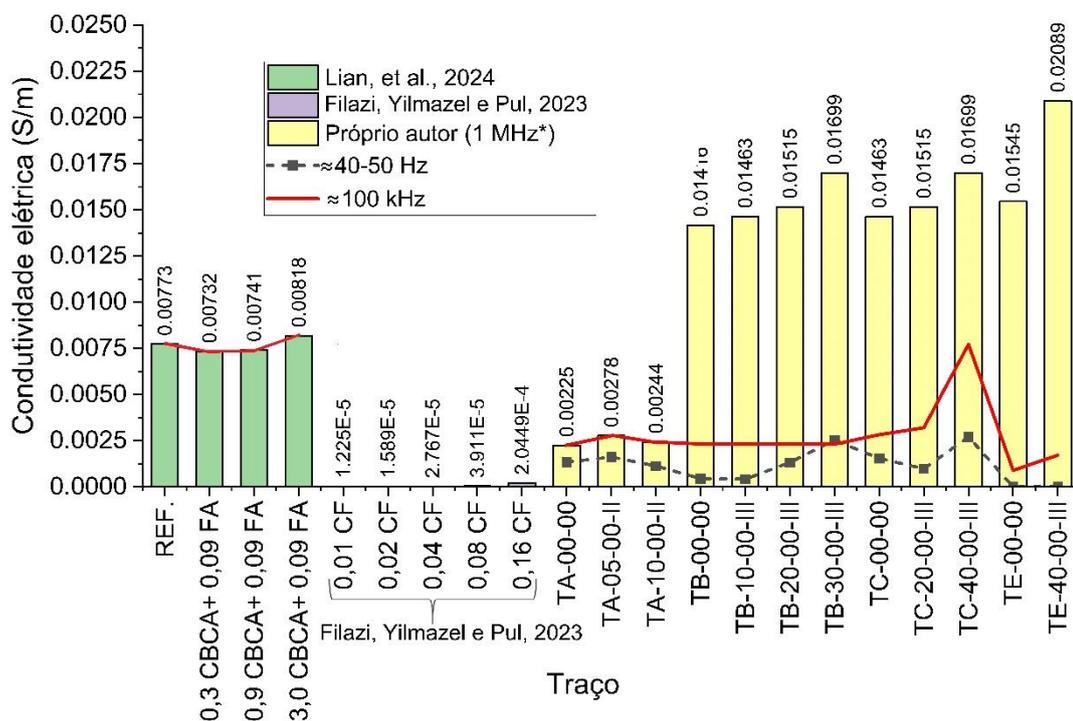
¹sílica ativa; ²cinza volante; ³fibra de aço; ⁴nano sílica; ⁵carbonato de cálcio; *indutância, capacitância e resistência

Fonte: Próprio autor.

Para comparação dos resultados de condutividade elétrica com de outros autores, foram selecionados apenas os traços da presente pesquisa que não apresentaram comprometimento estatisticamente significativos nas propriedades de resistências mecânicas do CCA. Ou seja, foram omitidos resultados com maior condutividade elétrica, como por exemplo o traço TC-100-00-III, o qual apresentou resistência mecânica muito baixa.

Comparando a condutividade elétrica do CCA com resíduo de lona de freio com a de outros resíduos como cinza de bagaço de cana de açúcar (CBCA) com fibra de aço (FA) (Mobili *et al.*, 2022) e cavaco de ferro (CF) (Filazi; Yilmazel; Pul, 2023) foi possível observar que especificamente nas análises a 100 kHz o traço TC-40-00-III teve aumento significativo em relação ao de referência (TC-00-00), quando feita comparação do resíduo CBCA+FA com seu traço de referência (REF.). Já o CF apresentou a maior variação entre os extremos (0,01 CF e 0,16 CF), apesar de apresentar os menores valores absolutos de condutividade da Figura 142.

Figura 142 – Análise comparativa da condutividade elétrica de argamassas com resíduos entre autores

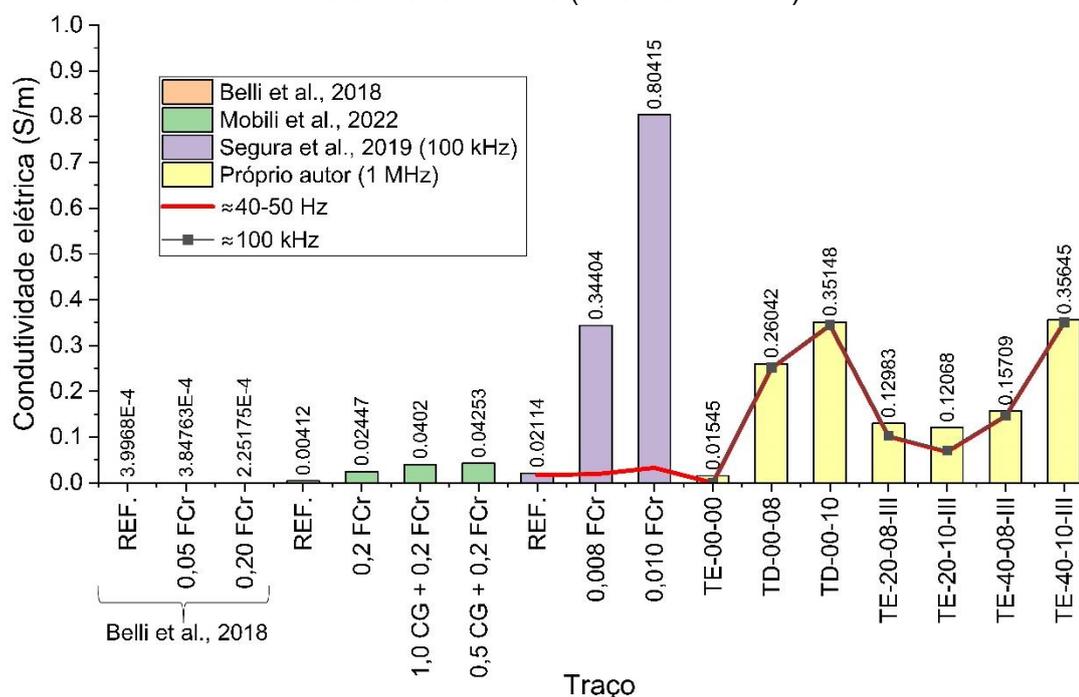


*Série "A" foi analisada até 100 kHz

Fonte: Próprio autor.

Na comparação da condutividade elétrica do CCA com resíduo de lona de freio e fibra de carbono com a de outras pesquisas com fibra de carbono reciclada (FCr) (Belli *et al.*, 2018; Mobili *et al.*, 2022; Segura *et al.*, 2019) observou-se que o maior aumento entre o traço de referência (REF.) e o traço mais condutivo foi o "0,010 FCr" (Segura *et al.*, 2019). Isto pode ser justificado, uma vez que as fibras dispunham de 12 mm de comprimento, enquanto que nesta pesquisa foram usadas fibras com ≈ 4 mm de comprimento. O aumento da condutividade mediante o aumento do comprimento da fibra é reportado em várias pesquisas, inclusive na de Segura *et al.* (2019).

Figura 143 – Análise comparativa de propriedades elétricas de argamassas com resíduos e materiais reciclados (fibra de carbono)



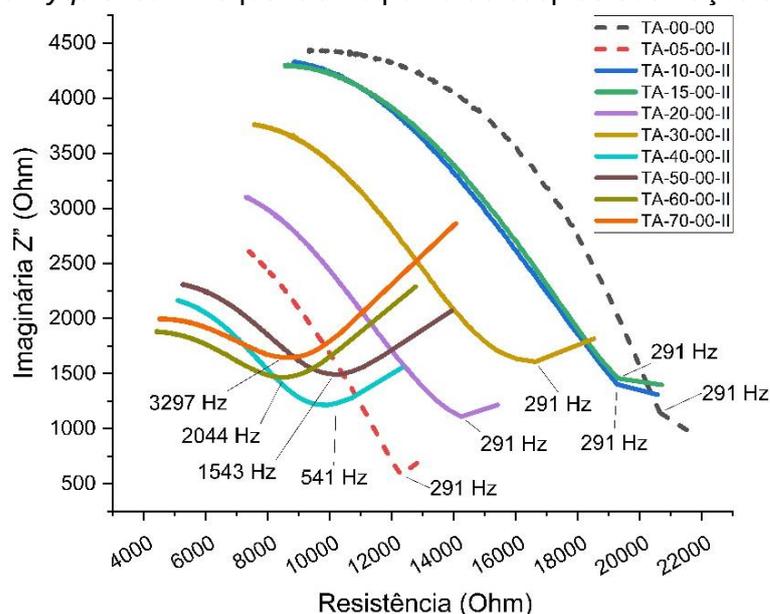
Fonte: Próprio autor.

Para uma melhor compreensão das variações de condutividade elétrica em função da variação da frequência da corrente elétrica, foram traçados os diagramas de *Nyquist* conforme Figura 144 a 148, para os traços das séries “A” a “E” desta pesquisa.

Na série “A” (Figura 144), é possível observar além do comportamento diferenciado para cada traço no que diz respeito aos valores de impedância imaginária (Z'') e resistência elétrica (R), um aumento gradual da frequência no ponto de cúspide, especialmente a partir do traço TA-40-00-II. Isto pode estar associado ao fato de que a resistência formada entre o eletrodo e a argamassa tenha sido maior com o aumento da quantidade de resíduo, quando comparado ao conceito estabelecido por Zhu *et al.* (2017) na Figura 22a, referente a resistência de interface (R_{int}) entre o compósito e o eletrodo.

Na série “B” (Figura 145) é possível observar que a partir do traço TB-30-00-III os valores de resistência elétrica foram significativamente menores que as demais, o que pode estar associado à menor influência das variáveis de reatância, visto que a impedância imaginária também foi menor nesses casos.

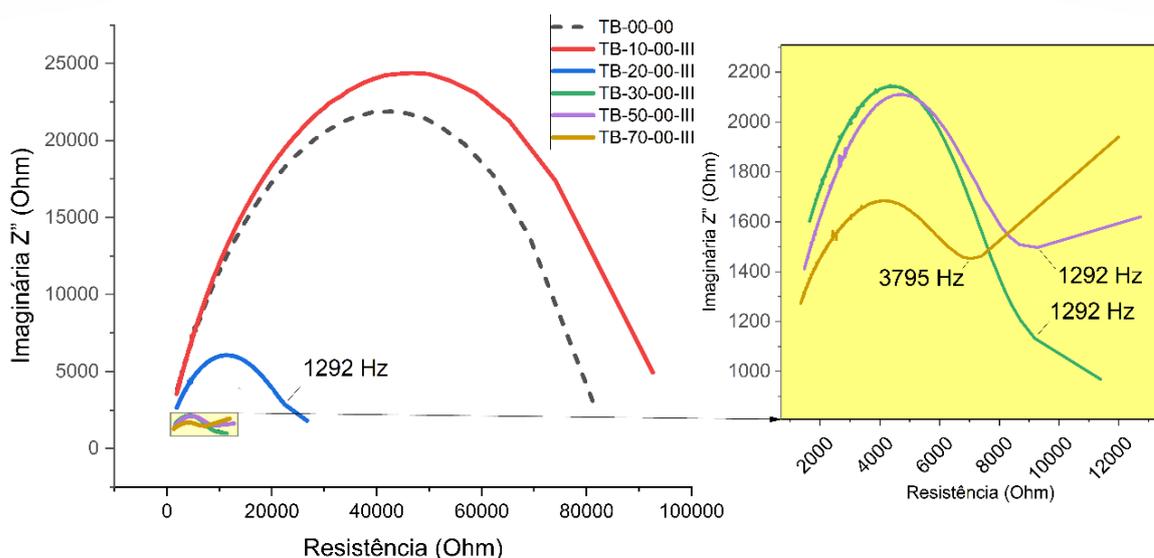
Figura 144 – Análise de resistência elétrica (R) e impedância imaginária (Z'') por meio do diagrama de Nyquist com frequência no ponto de cúspide dos traços da série "A"



Fonte: Próprio autor.

Quanto aos pontos de cúspide dos traços TB-00-00 e TB-10-00-III, os mesmos não foram identificados. Isto pode ter ocorrido em razão do valor de início do intervalo de frequência (a partir de 40 Hz) do ensaio, ou ainda em razão da quantidade de leituras em baixas frequências.

Figura 145 – Análise de resistência elétrica (R) e impedância imaginária (Z'') por meio do diagrama de Nyquist com frequência no ponto de cúspide dos traços da série "B"

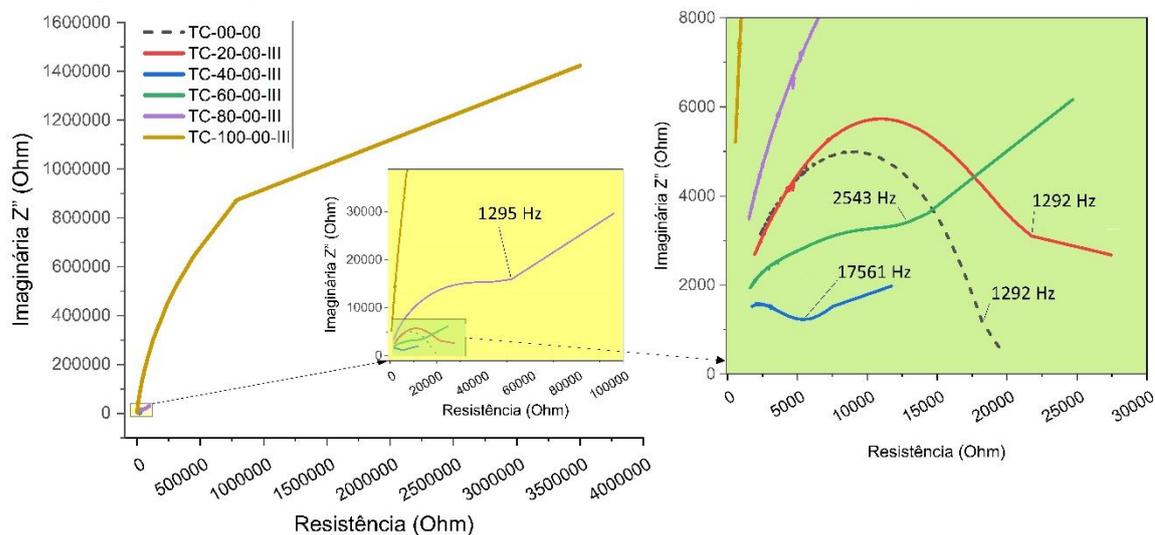


Fonte: Próprio autor.

Na Figura 146 é possível observar o comportamento destoante do traço TC-100-00-III em relação aos demais da série "C", o qual em baixas frequências apresenta alta

resistência elétrica, o que pode estar relacionado à influência das variáveis de reatância.

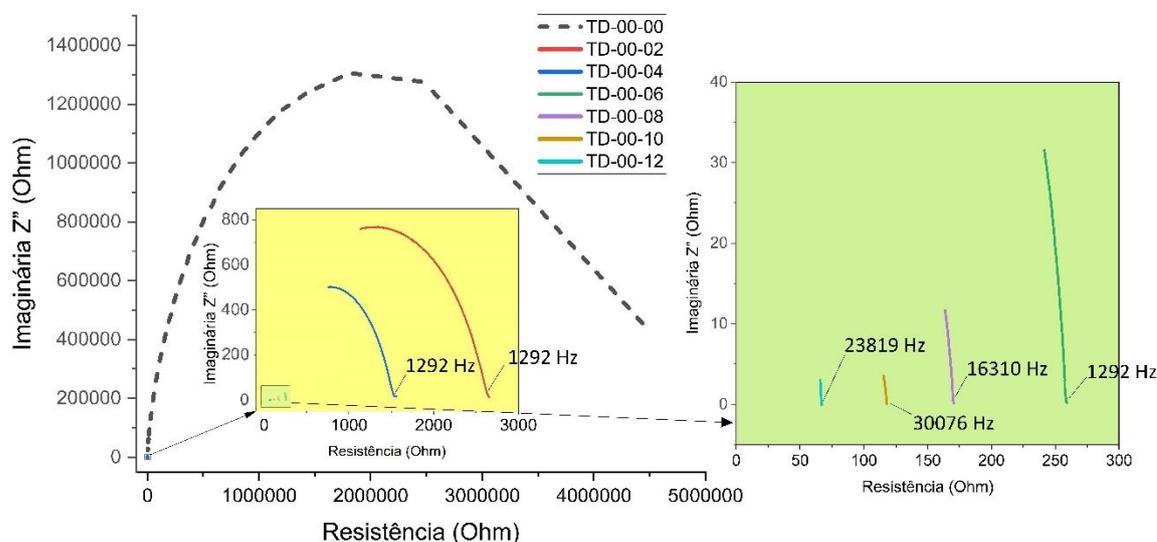
Figura 146 – Análise de resistência elétrica (R) e impedância imaginária (Z”) por meio do diagrama de Nyquist com frequência no ponto de cúspide dos traços da série “C”



Fonte: Próprio autor.

No caso da série “D” (Figura 147) é possível observar que a partir do traço TD-06-00 há pouca variação da resistência elétrica com o aumento da frequência, o que pode significar uma menor influência da reatância do compósito cimentício. Apesar de não estarem visíveis na Figura 174, ocorreram as deflexões nos pontos de cúspide, cujas frequências são apresentadas na mesma figura, com aumento observado a partir do traço TD-00-06.

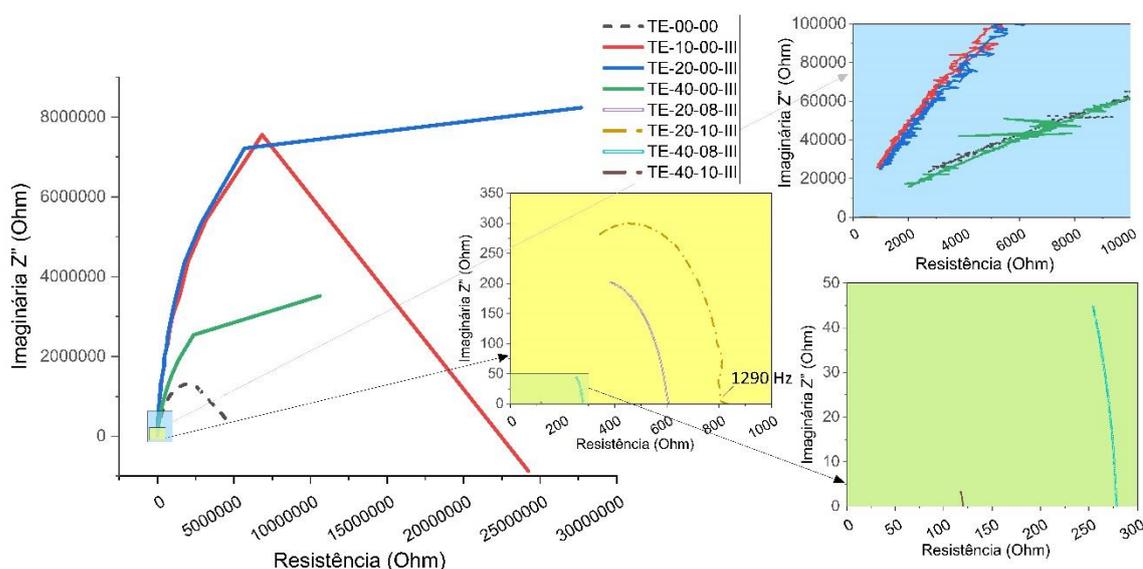
Figura 147 – Análise de resistência elétrica (R) e impedância imaginária (Z”) por meio do diagrama de Nyquist com frequência no ponto de cúspide dos traços da série “D”



Fonte: Próprio autor.

Por fim, os traços TE-40-08-III e TE-40-10-III da série “E” (Figura 148) sofreram menor influência da reatância quando comparados aos traços TE-20-08-III e TE-20-10-III. Isto demonstra que apesar do resíduo de lona de freio ter aumentado a resistência elétrica quando comparado à série “D” (somente fibra), o resíduo em 40% e a fibra, podem ter minimizado os efeitos de reatância intrínsecos de uma argamassa cimentícia. O único ponto de cúspide identificado na série “E”, foi no traço TE-20-10-III, o qual ocorreu em baixa frequência.

Figura 148 – Análise de resistência elétrica (R) e impedância imaginária (Z”) por meio do diagrama de Nyquist com frequência no ponto de cúspide dos traços da série “E”

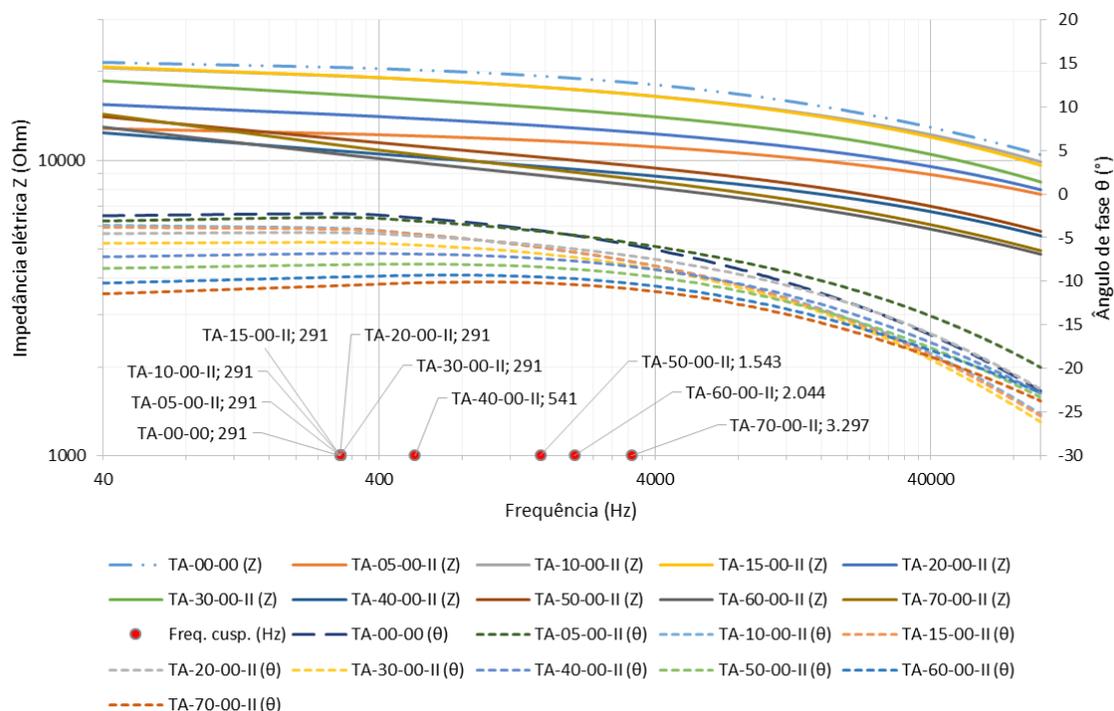


Fonte: Próprio autor.

Em continuidade à análise das propriedades elétricas, foram traçados os diagramas de Bode conforme Figura 149 a 153, para os traços das séries “A” a “E”. No caso da série “A” (Figura 149) observa-se que entre 400 Hz a 4 kHz começaram as variações da impedância e do ângulo de fase.

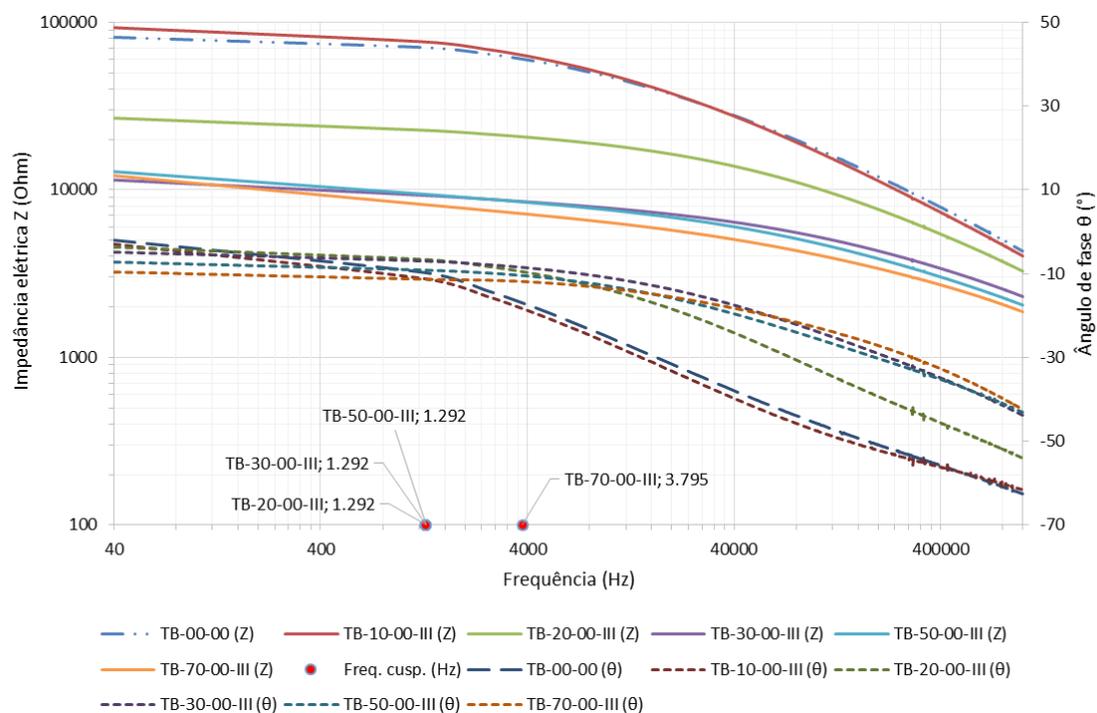
Na série “B” (Figura 150) observa-se que entre 400 Hz a 4 kHz começaram as variações da impedância e do ângulo de fase apenas nos traços TB-00-00 e TB-10-00-III, enquanto que nos demais foi entre 4 kHz e 40 kHz.

Figura 149 – Análise da impedância (Z) e do ângulo de fase (θ) por meio do diagrama de *Bode* com frequência no ponto de cúspide dos traços da série “A”



Fonte: Próprio autor.

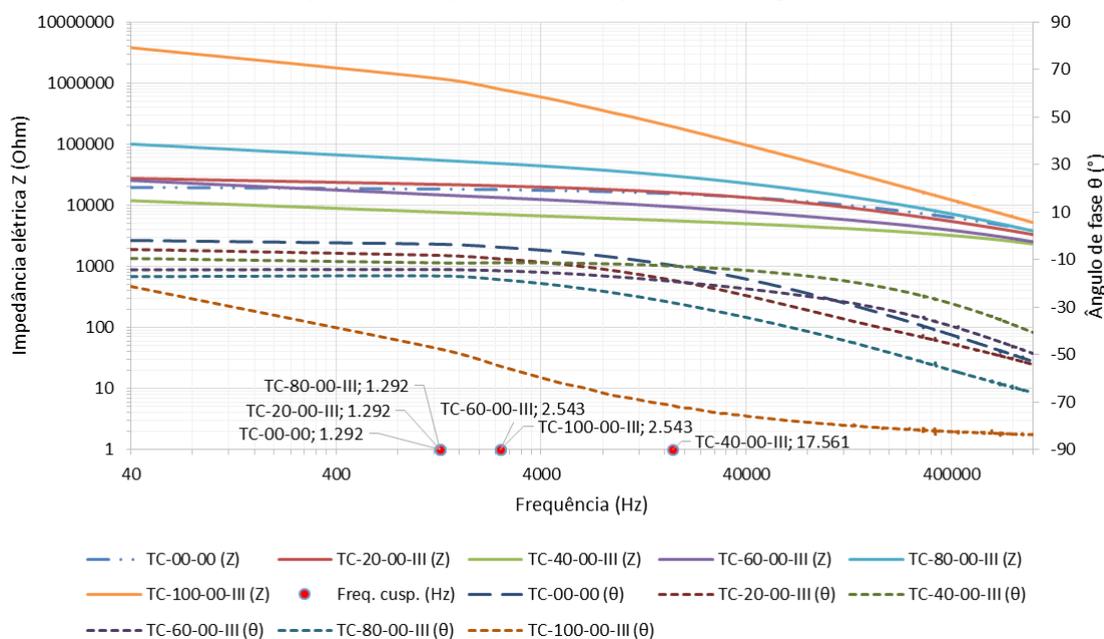
Figura 150 – Análise da impedância (Z) e do ângulo de fase (θ) por meio do diagrama de *Bode* com frequência no ponto de cúspide dos traços da série “B”



Fonte: Próprio autor.

Em relação a série “C” (Figura 151), o comportamento do traço TC-100-00-III novamente se destacou em relação aos demais, visto que apresentou contínua redução acentuada da impedância, desde baixas até altas frequências.

Figura 151 – Análise da impedância (Z) e do ângulo de fase (θ) por meio do diagrama de Bode com frequência no ponto de cúspide dos traços da série “C”

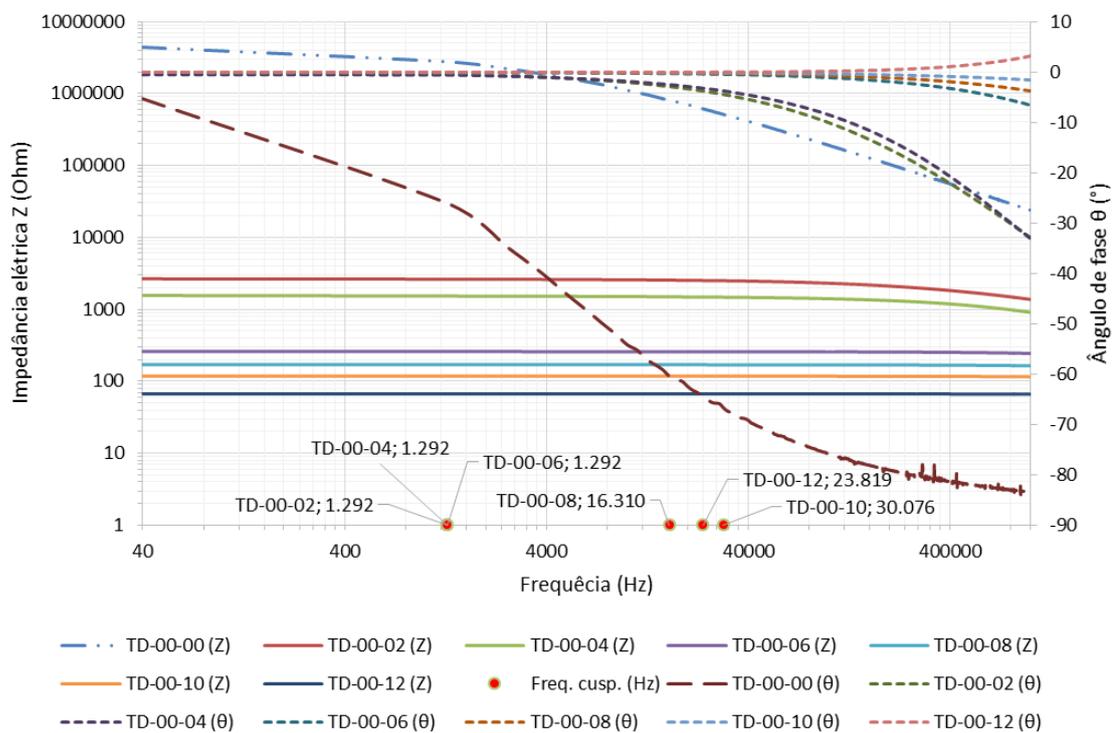


Fonte: Próprio autor.

No caso da série “D” (Figura 152) a partir do traço TD-06-00 foi possível observar que houve pouca variação da impedância (Z) em função do aumento de frequência, o que pode estar associado a uma menor influência da reatância em relação aos demais traços da série “D”. Contudo, mesmo com pouca variação da impedância (Z), houve um aumento do valor do ângulo de fase (θ), o qual provoca aumento da impedância imaginária (Z''), conforme observado na Figura 148.

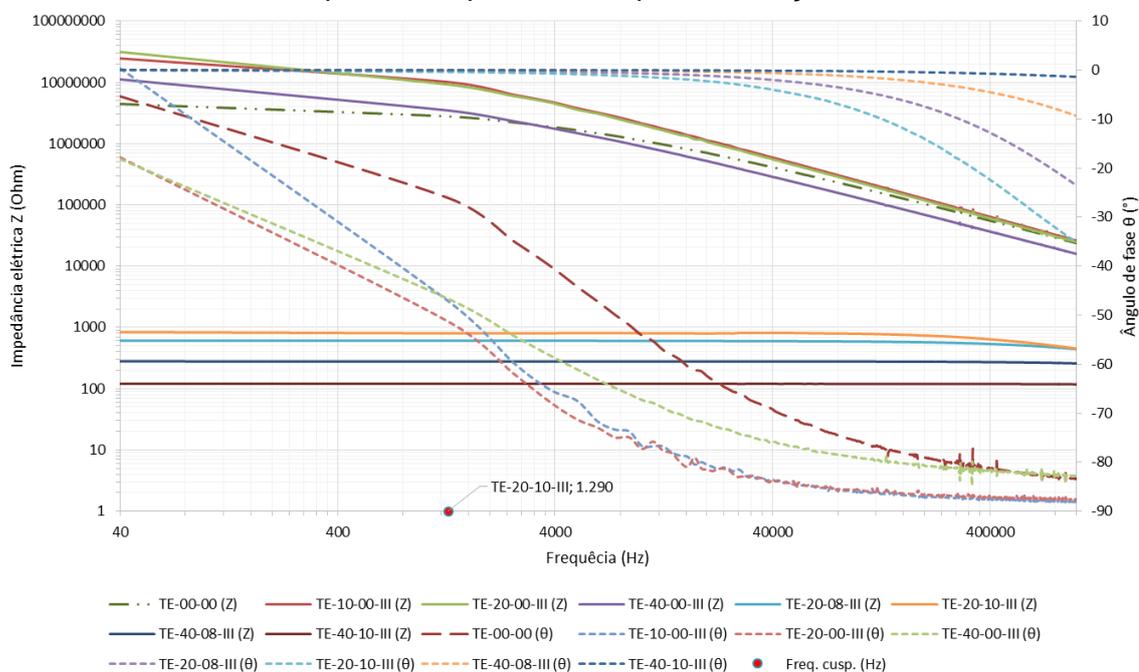
Quanto à série “E” (Figura 153) mesmo com a alteração no ângulo de fase dos traços TE-40-08-III e TE-40-10-III a partir de 400 kHz, não houve alteração graficamente perceptível na impedância dos referidos traços. Tal situação sugere que a tendência ôhmica da fibra de carbono (Can-Ortiz; Abot; Aviles, 2019) não sofreu influência significativa por conta da menor condutividade elétrica do resíduo de lona de freio ou do compósito cimentício.

Figura 152 – Análise da impedância (Z) e do ângulo de fase (θ) por meio do diagrama de Bode com frequência no ponto de cúspide dos traços da série “D”



Fonte: Próprio autor.

Figura 153 – Análise da impedância (Z) e do ângulo de fase (θ) por meio do diagrama de Bode com frequência no ponto de cúspide dos traços da série “E”

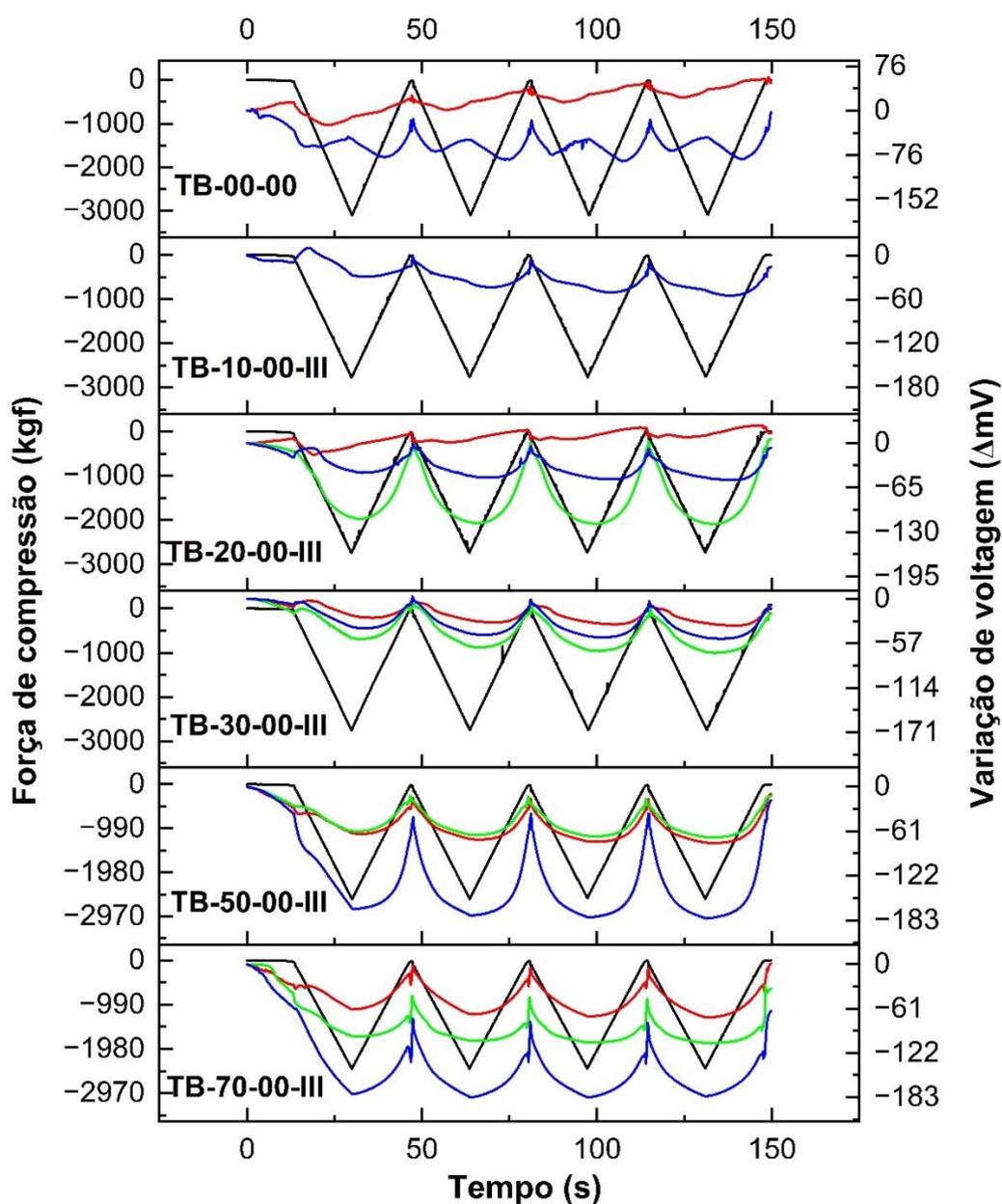


Fonte: Próprio autor.

4.1.4 Análise da piezorresistividade

A análise de piezorresistividade foi realizada a partir da série “B” (Figura 154), na qual foi possível observar que a partir do traço TB-20-00-III houve aumento da resposta elétrica em função da aplicação da força de compressão, o que possivelmente está associado ao aumento da condutividade elétrica, promovido pelo acréscimo gradual da quantidade de resíduo.

Figura 154 – Análise piezorresistiva dos corpos de prova da série “B”



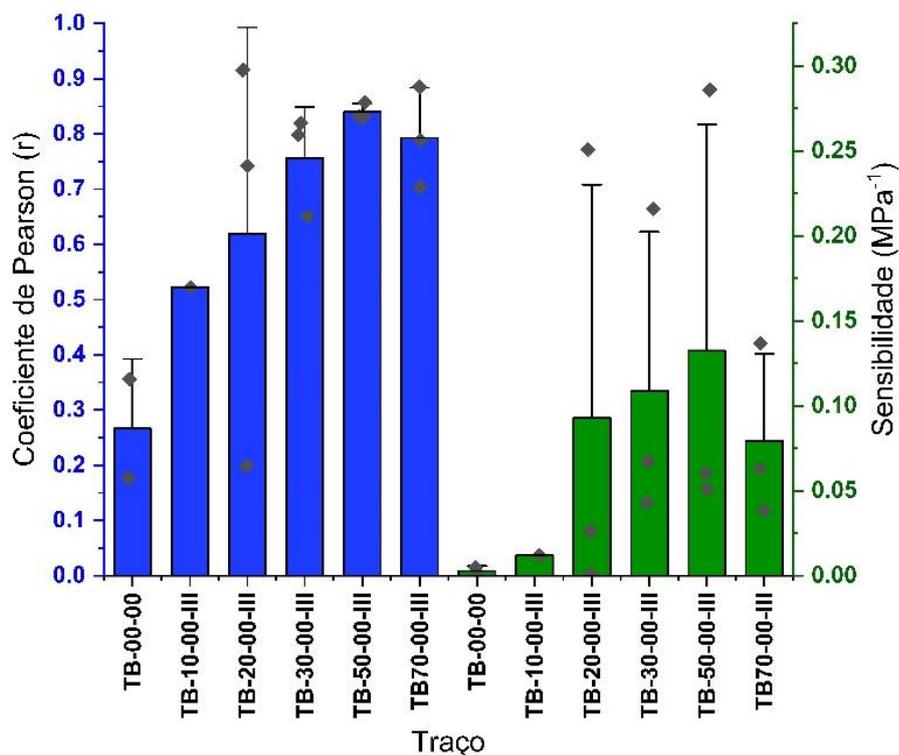
— Compressão (kgf) — CP_1 (mV) — CP_2 (mV) — CP_3 (mV)

Obs.: dois corpos de prova do traço TB-10-00-III foram danificados/fraturados o que comprometeu a realização da análise em questão.

Fonte: Próprio autor.

Na análise de correlação de Pearson e sensibilidade (Equação 40) da série “B” (Figura 155), foi possível observar que apesar dos desvios causados por alguns valores *outliers*, ainda assim, observou-se uma tendência de melhora na resposta piezorresistiva com a incorporação do resíduo de lona de freio em relação ao traço de referência (TB-00-00).

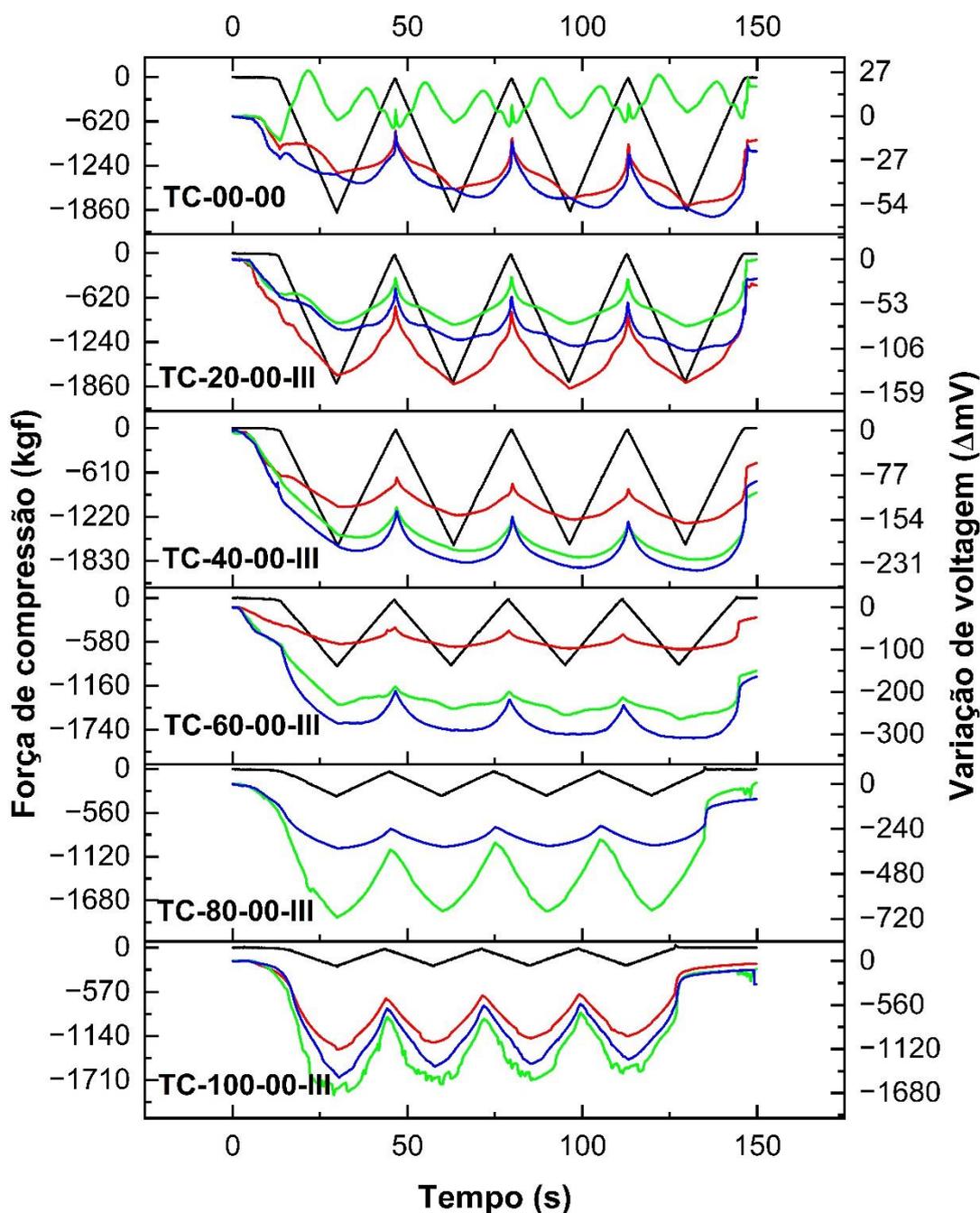
Figura 155 – Valores do coeficiente de Pearson e sensibilidade da análise piezorresistiva da série “B”



Fonte: Próprio autor.

Na série “C” (Figura 156), foi possível observar uma alta resposta elétrica com baixa força de compressão, especialmente no caso do traço TC-100-00-III. Contudo, mesmo o traço TC-20-00-III apresentou melhor resposta gráfica quando comparado ao traço de referência (TC-00-00).

Figura 156 – Análise piezorresistiva dos corpos de prova da série “C”

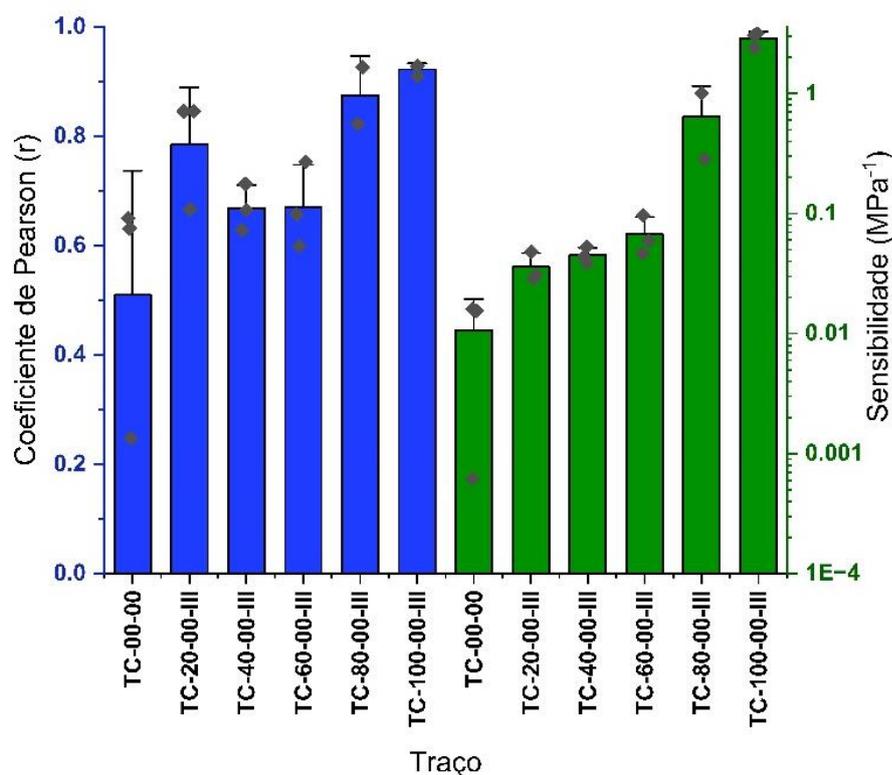


Obs.: um corpo de prova do traço TC-80-00-III foi danificado/fraturado o que comprometeu a realização da análise em questão.

Fonte: Próprio autor.

Tanto o traço TC-80-00-III, quanto o traço TC-100-00-III, apresentaram boa resposta piezorresistiva quando analisado o coeficiente de Pearson e o fator sensibilidade (Figura 157) dos mesmo em relação aos demais traços.

Figura 157 – Valores de coeficiente de Pearson e sensibilidade da análise piezorresistiva da série “C”

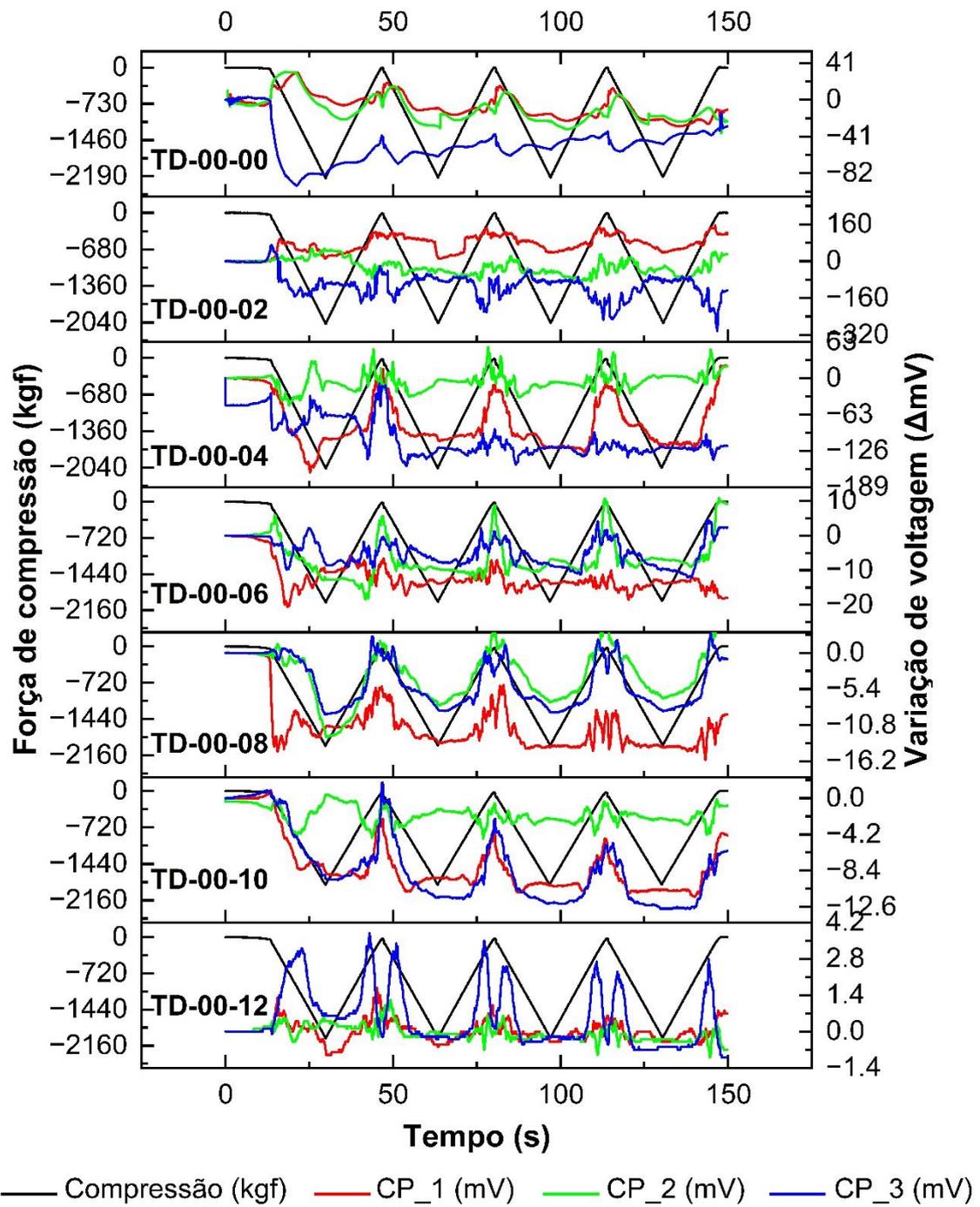


Fonte: Próprio autor.

Nos traços que continham somente fibra de carbono (série “D”) no compósito, foi possível observar (Figura 158) que a melhora da resposta piezorresistiva não necessariamente melhorou com o incremento gradual da fibra de carbono. Isto pode se dar pelo fato de que nem sempre as amostras com maior condutividade apresentam uma melhora da resposta piezorresistiva, conforme apontado por Nalon *et al.* (2022).

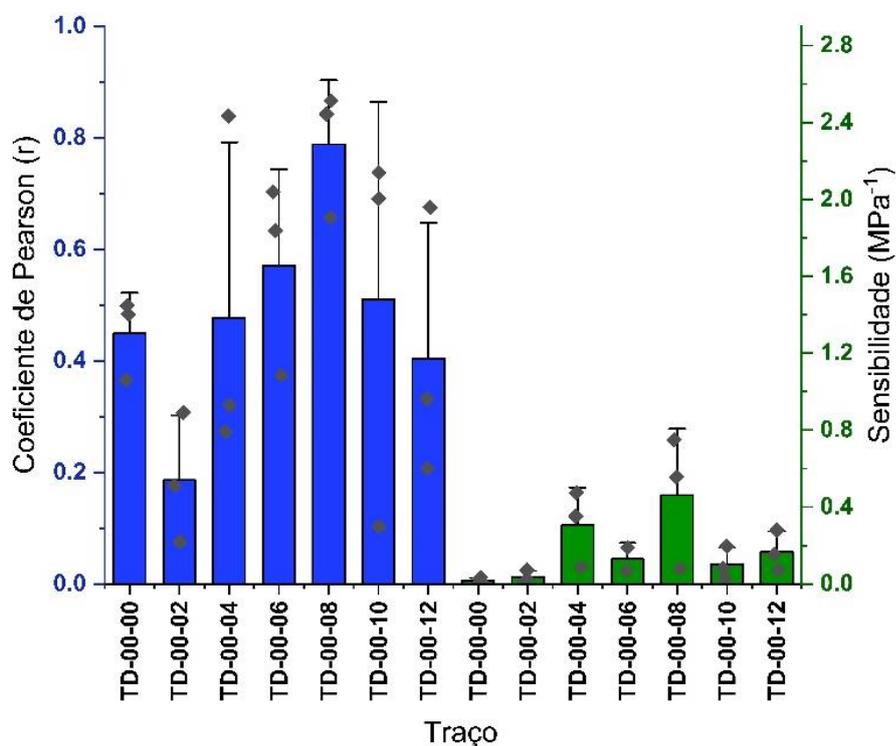
A não melhora da resposta piezorresistiva com o aumento gradual da incorporação da fibra também ficou evidente na análise de correlação e de sensibilidade, conforme se observa na Figura 159. Os melhores resultados médios de correlação e de sensibilidade da série “D” foram do traço TD-00-08. Tal observação pode estar associada a possibilidade de o referido traço ter atingido um ponto adequado de condutividade elétrica na zona do limiar de percolação, enquanto que os traços TD-00-10 e TD-00-12 podem ter obtido condutividade além da necessária para ocorrência do efeito piezorresistivo.

Figura 158 – Análise piezorresistiva dos corpos de prova da série “D”



Fonte: Próprio autor.

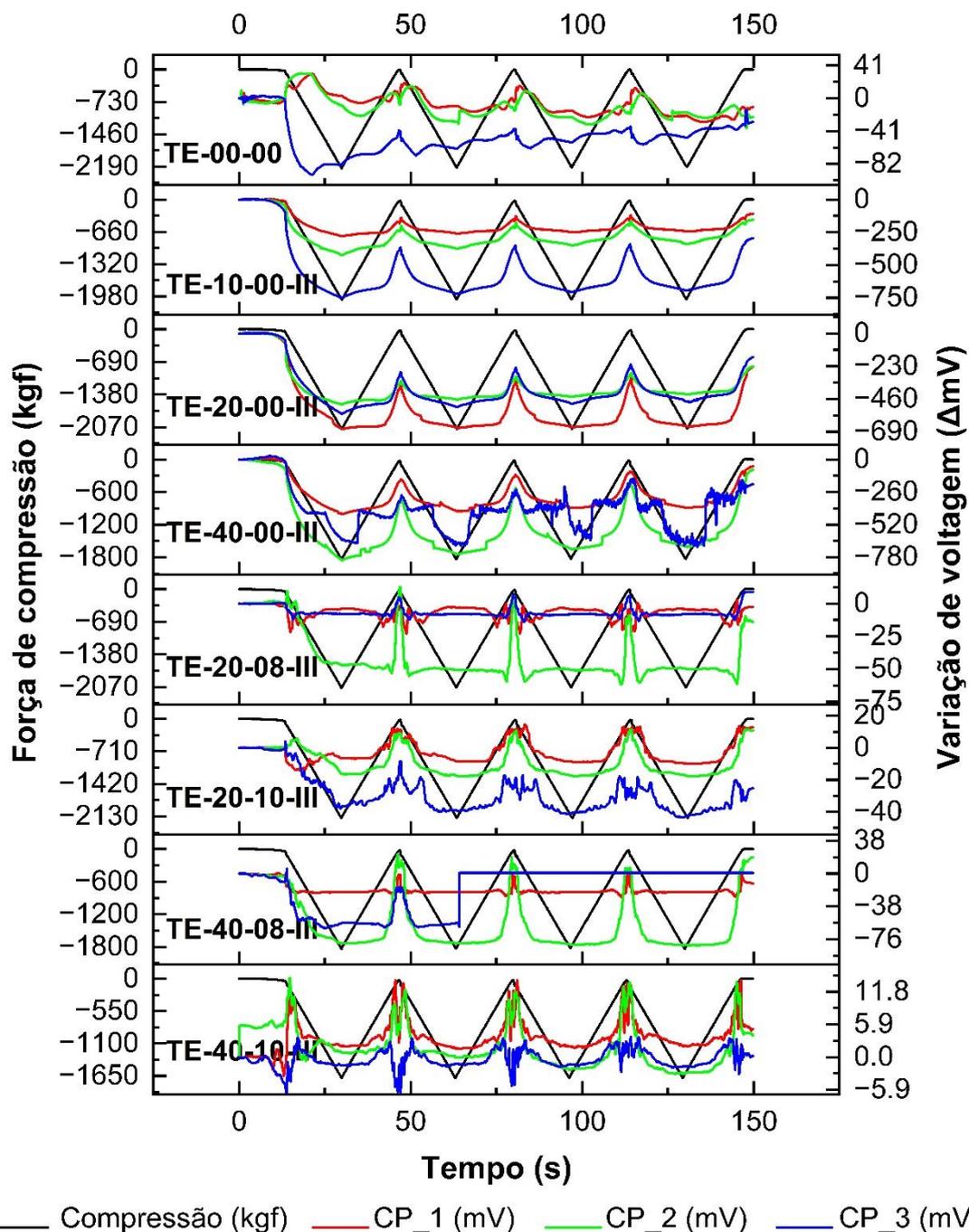
Figura 159 – Valores de coeficiente de Pearson e sensibilidade da análise piezorresistiva da série “D”



Fonte: Próprio autor.

Por fim, na análise piezorresistiva da série “E” (Figura 160), especialmente no que se refere aos traços em que houve a combinação do resíduo de lona de freio com a fibra de carbono, não foi observada melhora significativa da resposta piezorresistiva, quando comparado aos traços que continham somente fibra (série “D”), fato também constatado no gráfico da Figura 161.

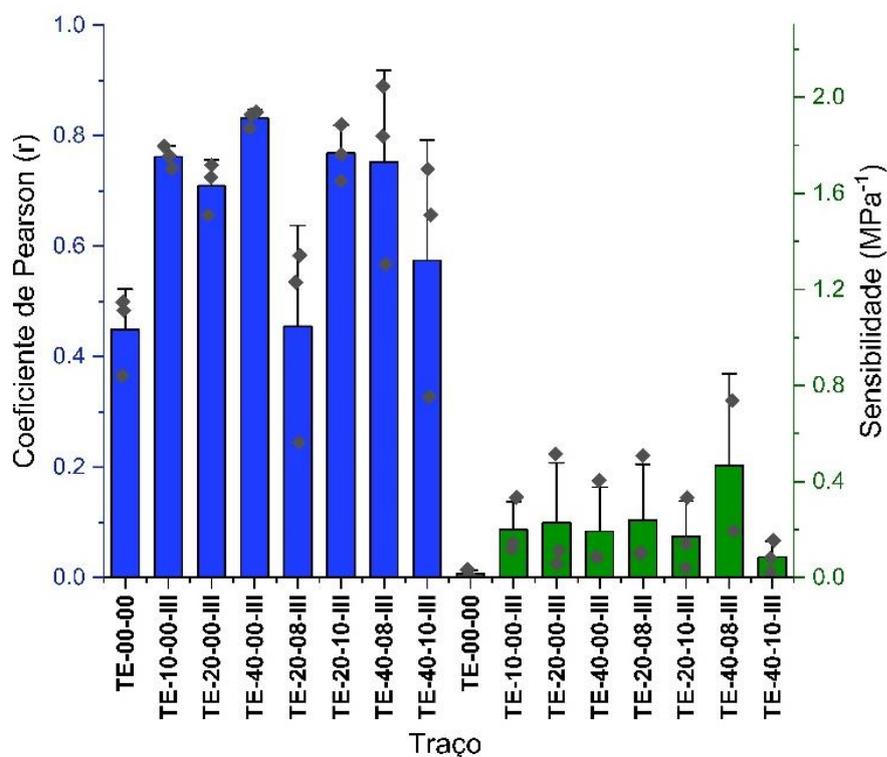
Figura 160 – Análise piezorresistiva dos corpos de prova da série “E”



Obs.: As leituras de TE-00-00 são as leituras de TD-00-00, por se tratar do mesmo traço; um corpo de prova do traço TD-00-08 rompeu durante o segundo ciclo de carregamento.

Fonte: Próprio autor.

Figura 161 – Valores de coeficiente de Pearson e sensibilidade da análise piezorresistiva da série “E”

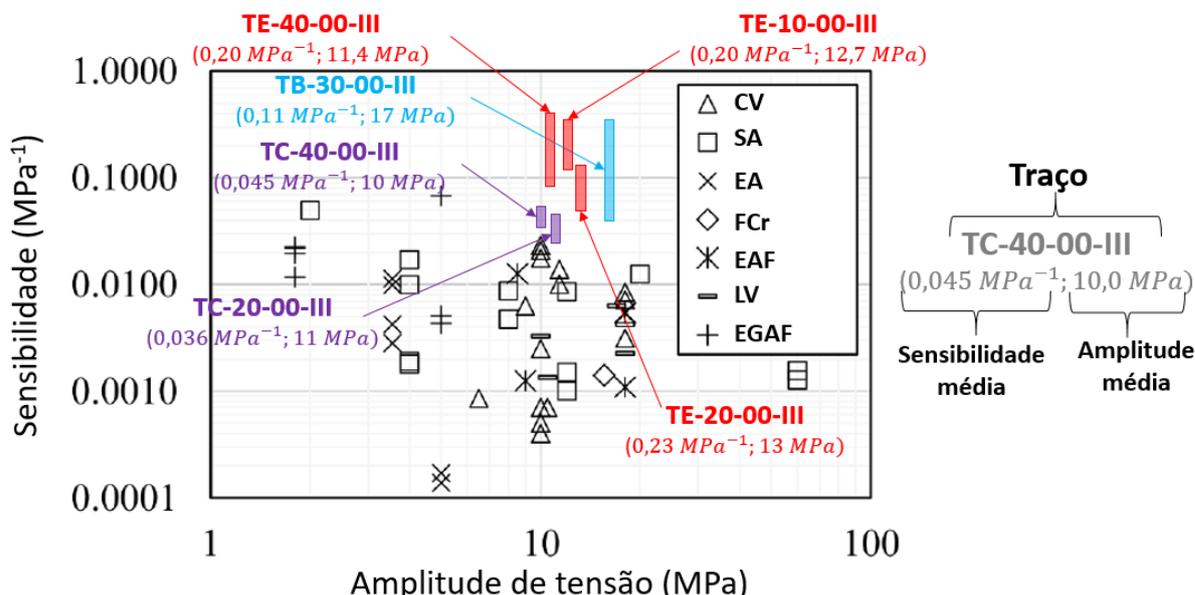


Fonte: Próprio autor.

A partir de um levantamento realizado por Nalon *et al.* (2022), quanto à análise de propriedades piezorresistivas de compósitos cimentícios com resíduos e/ou materiais reciclados, ou ainda subprodutos, foi possível comparar os resultados desta pesquisa com a de outros autores, conforme gráficos das Figuras 162 a 164. Para a referida comparação, foram selecionados somente os traços desta pesquisa que não sofreram perdas significativas de propriedades mecânicas.

Na comparação de sensibilidade piezorresistiva entre compósitos com apenas um resíduo ou um material reciclado (Figura 162), foi possível observar alta sensibilidade dos traços da presente pesquisa quando comparado aos demais. Contudo, materiais como escória granulada de alto forno (EGAF) e sílica ativa (SA), apresentam boa sensibilidade em baixas amplitudes de tensão, como mostra o estudo de Nalon *et al.* (2022).

Figura 162 – Análise da sensibilidade piezorresistiva em relação à amplitude de tensão entre diversos autores com o uso de resíduos ou materiais reciclados

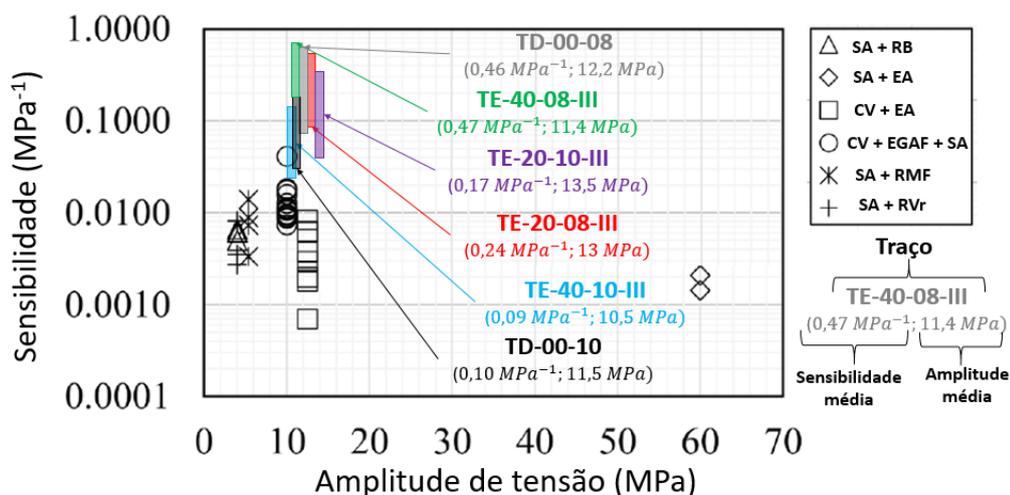


(CV - cinza volante, SA - sílica ativa, EA - escória de aciaria, EGAF - escória granulada de alto forno, FCr - fibra de carbono reciclada, EAF - escória de alto forno, LV - lama vermelha)

Fonte: Adaptado de Nalon *et al.* (2022)

No caso da combinação de dois ou mais resíduos ou materiais reciclados, foram comparados quanto à sua sensibilidade (Figura 163) em relação aos traços da presente pesquisa que continham a combinação do resíduo de lona de freio com a fibra de carbono, demonstrando uma melhor resposta quanto à sensibilidade.

Figura 163 – Análise da sensibilidade piezorresistiva em relação à amplitude de tensão entre diversos autores com o uso de dois ou mais resíduos e materiais reciclados

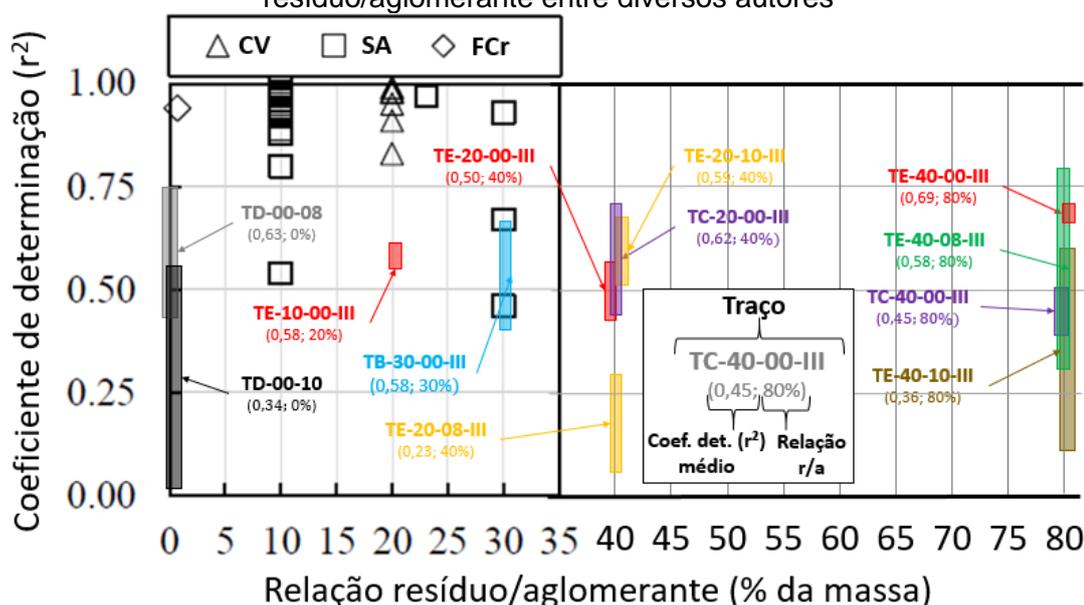


(CV - cinza volante, SA - sílica ativa, EA - escória de aciaria, EGAF - escória granulada de alto forno, FCr - fibra de carbono reciclada, EAF - escória de alto forno, LV - lama vermelha; RMF - rejeito de minério de ferro, RVr - resíduo de vidro reciclado)

Fonte: Adaptado de Nalon *et al.* (2022)

Na comparação de resultados quanto à correlação entre o esforço mecânico e a resposta elétrica, as diferentes pesquisas foram comparadas quanto ao coeficiente de determinação (r^2) conforme Figura 164. Na comparação foi possível observar que os traços selecionados nesta pesquisa apresentaram correlação inferior quando comparada a de outros autores. A exemplo do traço TC-100-00-III que apresentou r^2 médio de 0,85, alguns traços desta pesquisa com melhores resultados de r^2 , não foram incluídos na Figura 164, dada a baixa resistência mecânica dos mesmos.

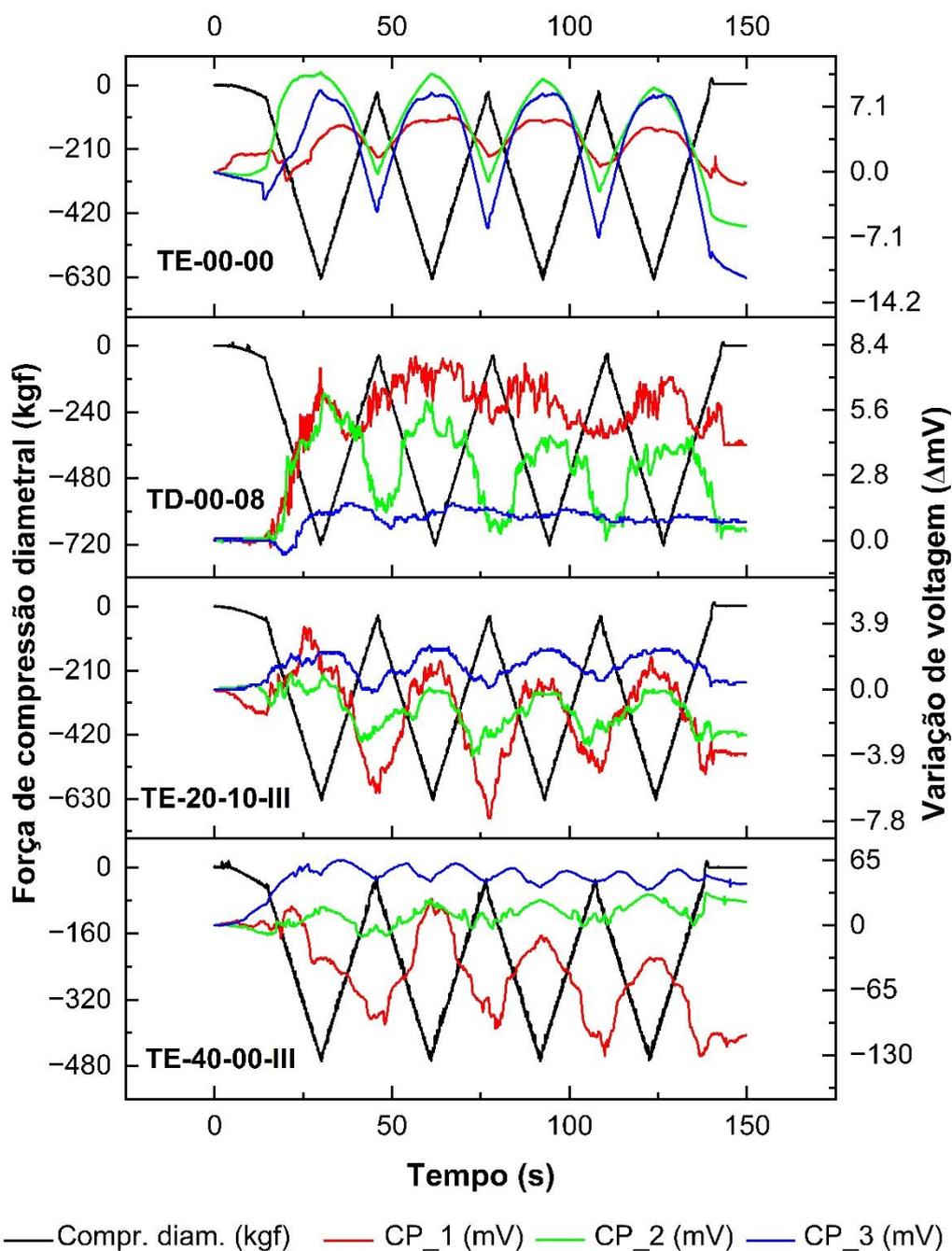
Figura 164 – Análise da correlação (r^2) da resposta piezorresistiva em função da relação resíduo/aglomerante entre diversos autores



(CV - cinza volante, SA - sílica ativa, FCr - fibra de carbono reciclada)
 Fonte: Adaptado de Nalon *et al.* (2022)

No caso da análise piezorresistiva dos corpos de prova submetidos à tração por compressão diametral, não foi possível por meio da análise gráfica da Figura 165, observar quais traços tiveram melhor resposta. Há de se ressaltar que a resposta piezorresistiva do traço de referência (TE-00-00) pode estar associada até determinado nível ao afastamento dos eletrodos da superfície da argamassa à medida que ocorre a tração.

Figura 165 – Análise piezorresistiva à tração por compressão diametral da série “D” (parcial) e “E” (parcial)

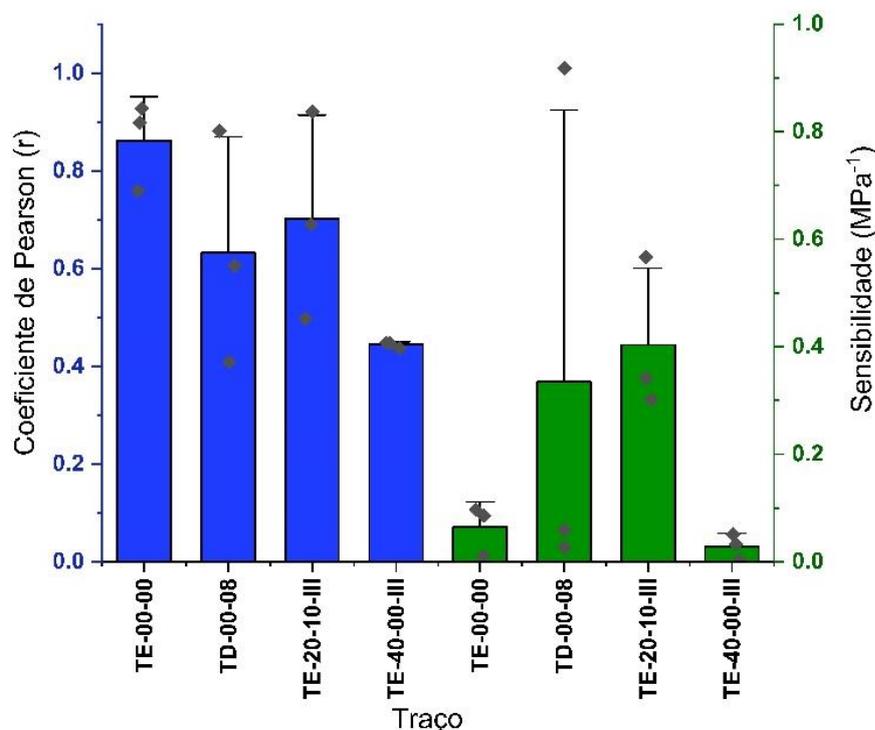


Fonte: Próprio autor.

Quanto à análise de correlação e sensibilidade piezorresistiva dos corpos de prova submetidos à tração por compressão diametral (Figura 166), os traços com fibra de carbono (TD-00-08 e TE-20-10-III) apresentaram uma melhor resposta quanto à sensibilidade em relação aos demais. Isto pode estar associado ao fato das fibras

terem sido capazes de se alongar e continuar a conduzir corrente elétrica mesmo com a eventual ocorrência de microfissuras na argamassa.

Figura 166 – Valores de coeficiente de Pearson e sensibilidade da análise piezorresistiva à tração por compressão diametral da série “D” (parcial) e “E” (parcial)

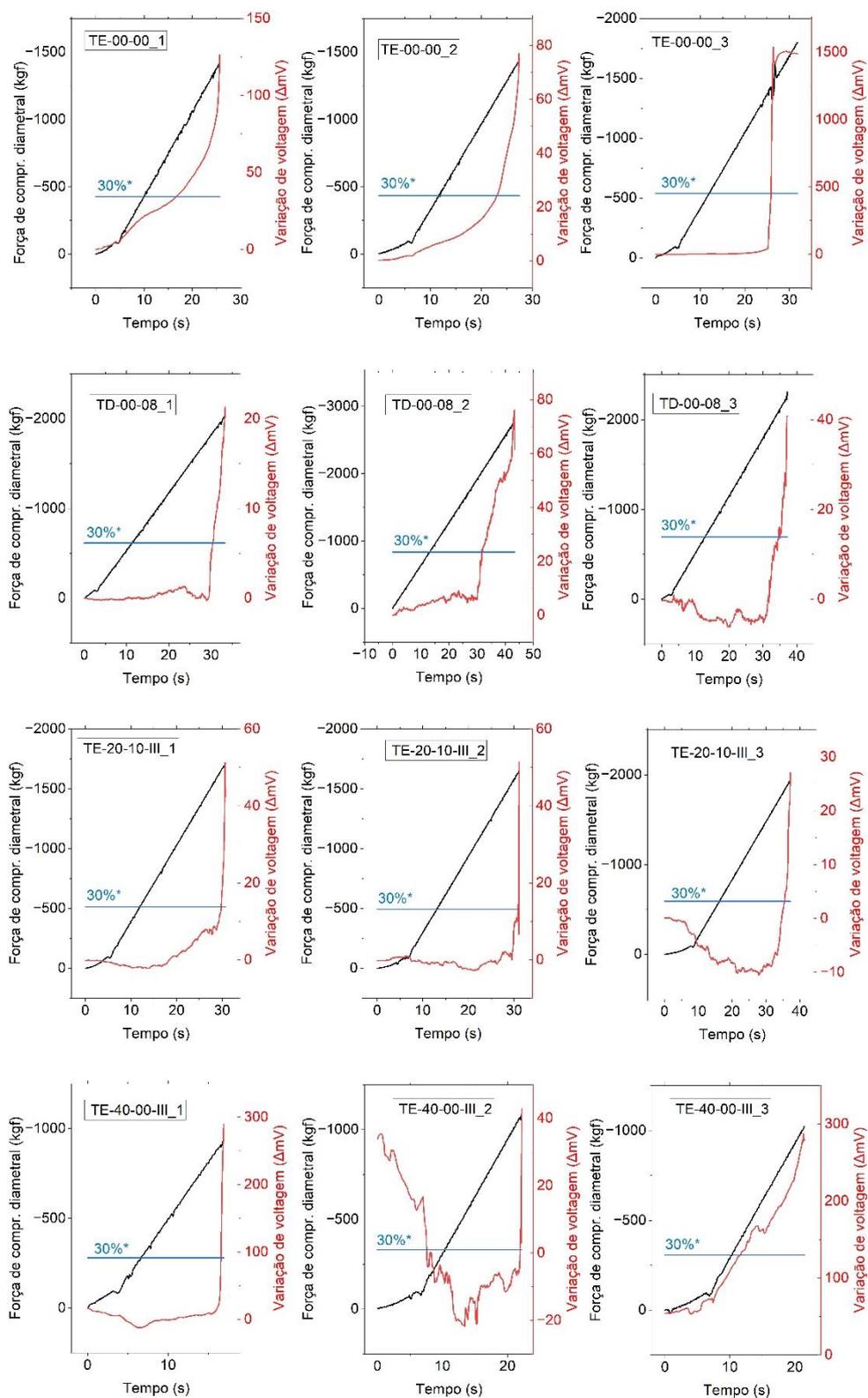


Fonte: Próprio autor.

Os corpos de prova cilíndricos submetidos à tração por compressão diametral foram submetidos a ruptura para análise piezorresistiva conforme Figura 167.

Quanto à correlação entre o esforço externo (força de compressão da tração diametral) e a resposta elétrica dos corpos de prova cilíndricos submetidos até a ruptura, foi possível observar (Figura 168) um comportamento distinto entre os intervalos de 0 a 30% da força de ruptura e >30% até a ruptura, que no segundo caso apresentaram declínio da correlação.

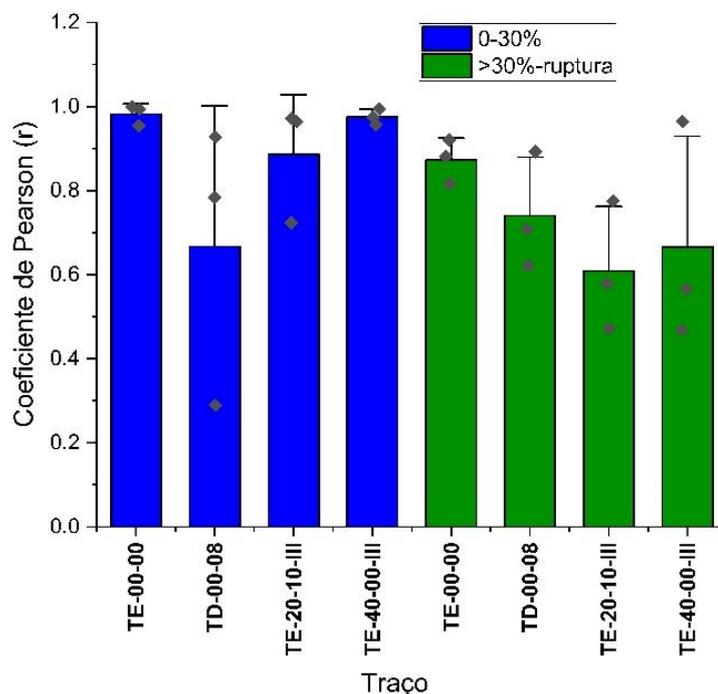
Figura 167 – Análise piezorresistiva à tração por compressão diametral da série “D” (parcial) e “E” (parcial) até a ruptura



*da força máxima (ruptura)

Fonte: Próprio autor.

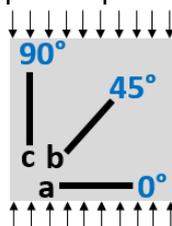
Figura 168 – Valores de coeficiente de Pearson da análise piezorresistiva à tração por compressão diametral até a ruptura da série “D” (parcial) e “E” (parcial)



Fonte: Próprio autor.

A análise piezorresistiva dos corpos de prova do tipo roseta foi iniciada com os mesmos dispostos na configuração indicada na Figura 169, o que resultou nas leituras apresentadas nos gráficos das Figuras 170 a 172.

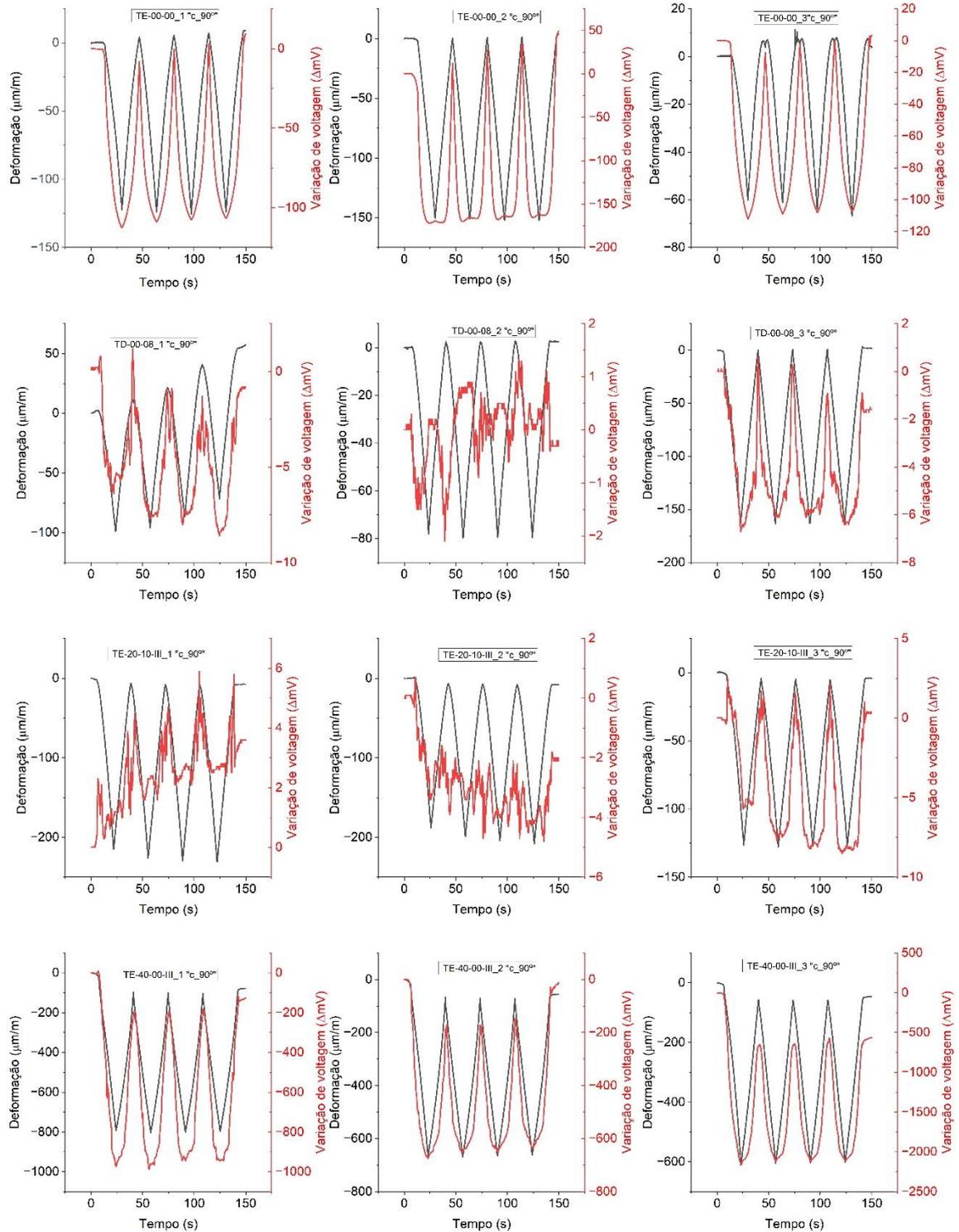
Figura 169 – Disposição inicial dos corpos de prova tipo roseta em ensaio de compressão



Fonte: Próprio autor.

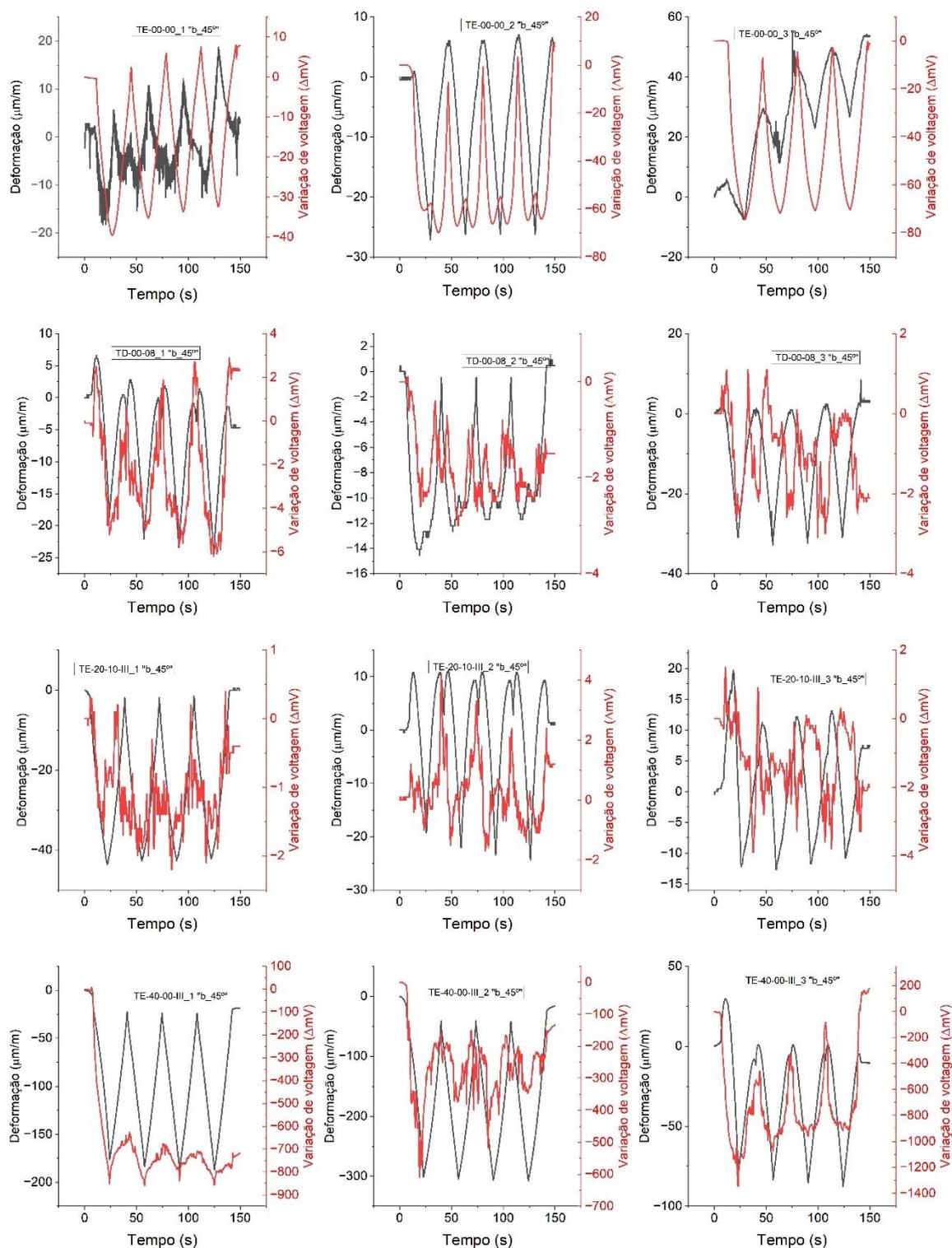
Na Figura 170 observou-se que a resposta a 90°, tanto da deformação quanto da voltagem corresponderam à compressão, como já era esperado. No caso da Figura 171 observou-se que a resposta a 45° também foi de compressão, porém em menor intensidade que a 90°. Por fim, na Figura 172 a 0° observou-se a ocorrência de tração em função do efeito de Poisson.

Figura 170 – Análise piezorresistiva dos corpos de prova tipo roseta da série “D” (parcial) e “E” (parcial) com eletrodos e extensômetros na posição 90°



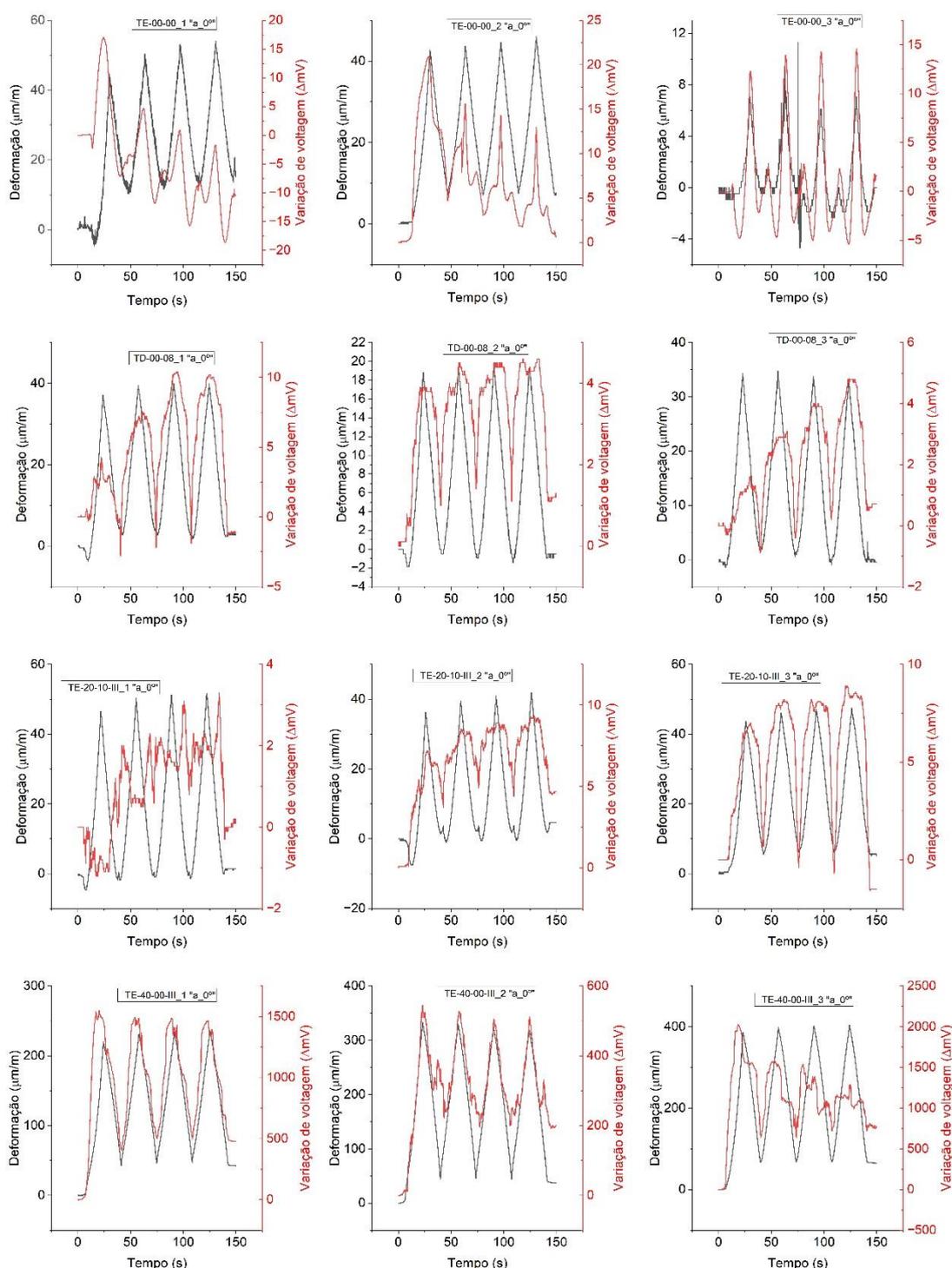
Fonte: Próprio autor.

Figura 171 – Análise piezorresistiva dos corpos de prova tipo roseta da série “D” (parcial) e “E” (parcial) com eletrodos e extensômetros na posição 45°



Fonte: Próprio autor.

Figura 172 – Análise piezorresistiva dos corpos de prova tipo roseta da série “D” (parcial) e “E” (parcial) com eletrodos e extensômetros na posição 0°

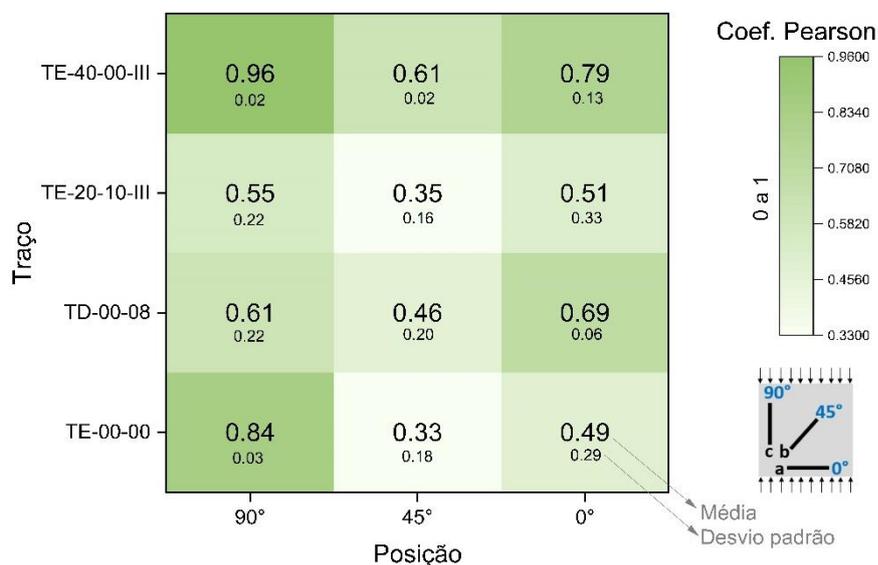


Fonte: Próprio autor.

A partir dos resultados das Figuras 170 a 172 foram determinados os coeficientes de correlação de Pearson de cada caso, sendo apresentado na Figura 173 os valores médios e respectivos desvios padrão. Foi possível observar que o traço com resíduo de lona de freio (TE-40-00-III) apresentou melhor resultado que os demais. Também

foi possível observar que nos casos dos traços com fibras de carbono (TD-00-08 e TE-20-10-III) não houve boa resposta, especialmente à compressão (90° e 45°).

Figura 173 – Valores de coeficiente de Pearson da análise piezorresistiva dos corpos de prova tipo roseta das séries “D” (parcial) e “E” (parcial)



Fonte: Próprio autor.

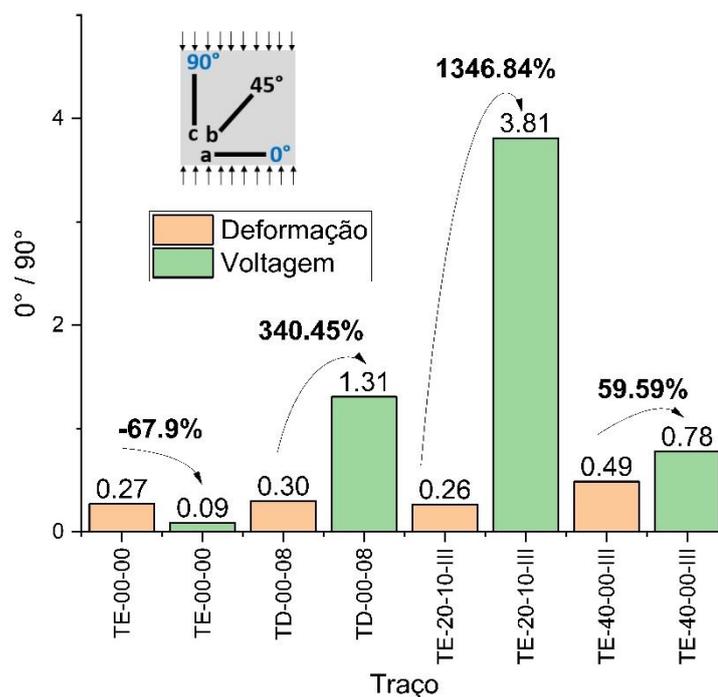
Ainda em relação a Figura 173, o fato do traço TE-00-00 ter apresentado melhor resultado médio de correlação à 90° que os traços TD-00-08 e TE-20-10-III, pode estar relacionado a influência exercida pela geometria do corpo de prova e/ou pela disposição/condição dos eletrodos, associado ao uso das fibras de carbono.

A partir dos valores de pico do 2º e do 3º ciclo de carregamento, foram determinadas as relações calculadas por meio das Equações 42 a 44, tendo seus resultados apresentados nas Figuras 174 a 176. Também são apresentadas as variações percentuais entre as relações de deformação (ϵ) e variação de voltagem (ΔU) para cada traço/caso, sendo que quanto menor for a variação, melhor é a relação em resposta ao efeito piezorresistivo.

Observa-se que o resultado da relação 0°/90° (Figura 174) da deformação (ϵ) no traço de referência (TE-00-00) se assemelha ao coeficiente de Poisson da argamassa da ordem de $\approx 0,20$.

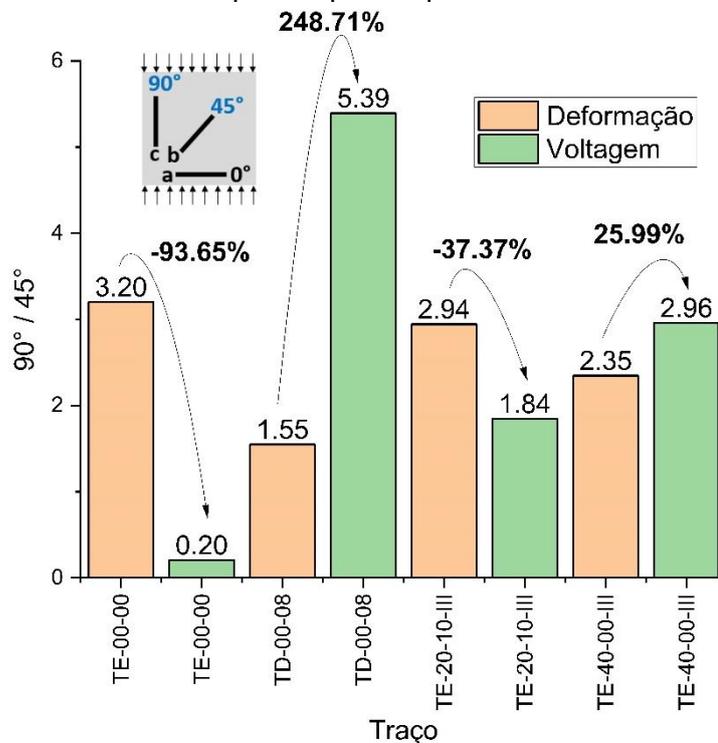
Ainda no caso dos resultados das Figuras 174 a 176, foi possível observar que o traço TE-40-00-III apresentou o melhor desempenho em todos os casos analisados, uma vez que apresentou menor variação das relações.

Figura 174 – Correlações entre as posições 0°/90° e respectivas variações percentuais nos corpos de prova tipo roseta



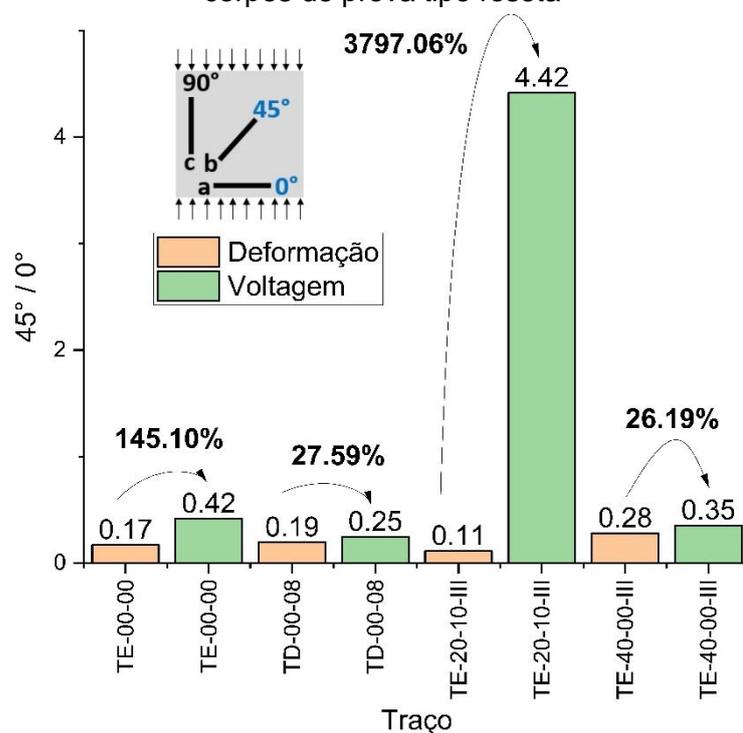
Fonte: Próprio autor.

Figura 175 – Correlações entre as posições 90°/45° e respectivas variações percentuais nos corpos de prova tipo roseta



Fonte: Próprio autor.

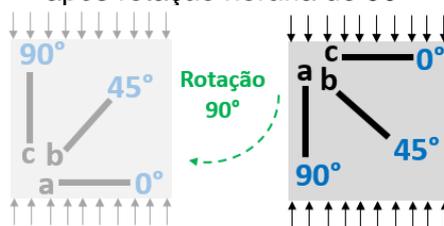
Figura 176 – Correlações entre as posições 45°/0° e respectivas variações percentuais nos corpos de prova tipo roseta



Fonte: Próprio autor.

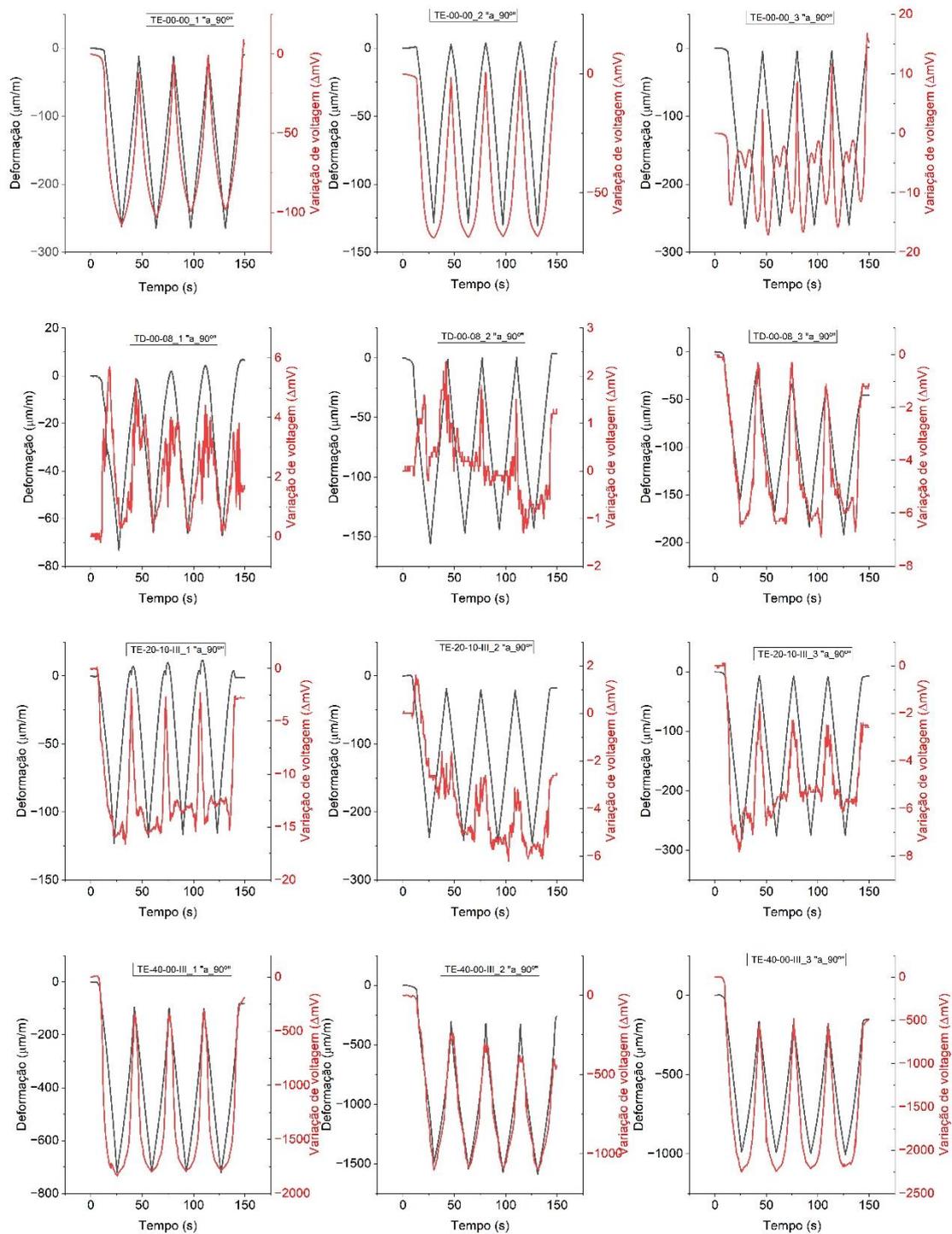
Na sequência são apresentados os resultados da análise piezorresistiva dos corpos de prova do tipo roseta, na configuração indicada na Figura 177, ou seja, após rotação horária de 90°, o que resultou nas leituras apresentadas nos gráficos das Figuras 178 a 180.

Figura 177 – Disposição inicial dos corpos de prova tipo roseta em ensaio de compressão após rotação horária de 90°



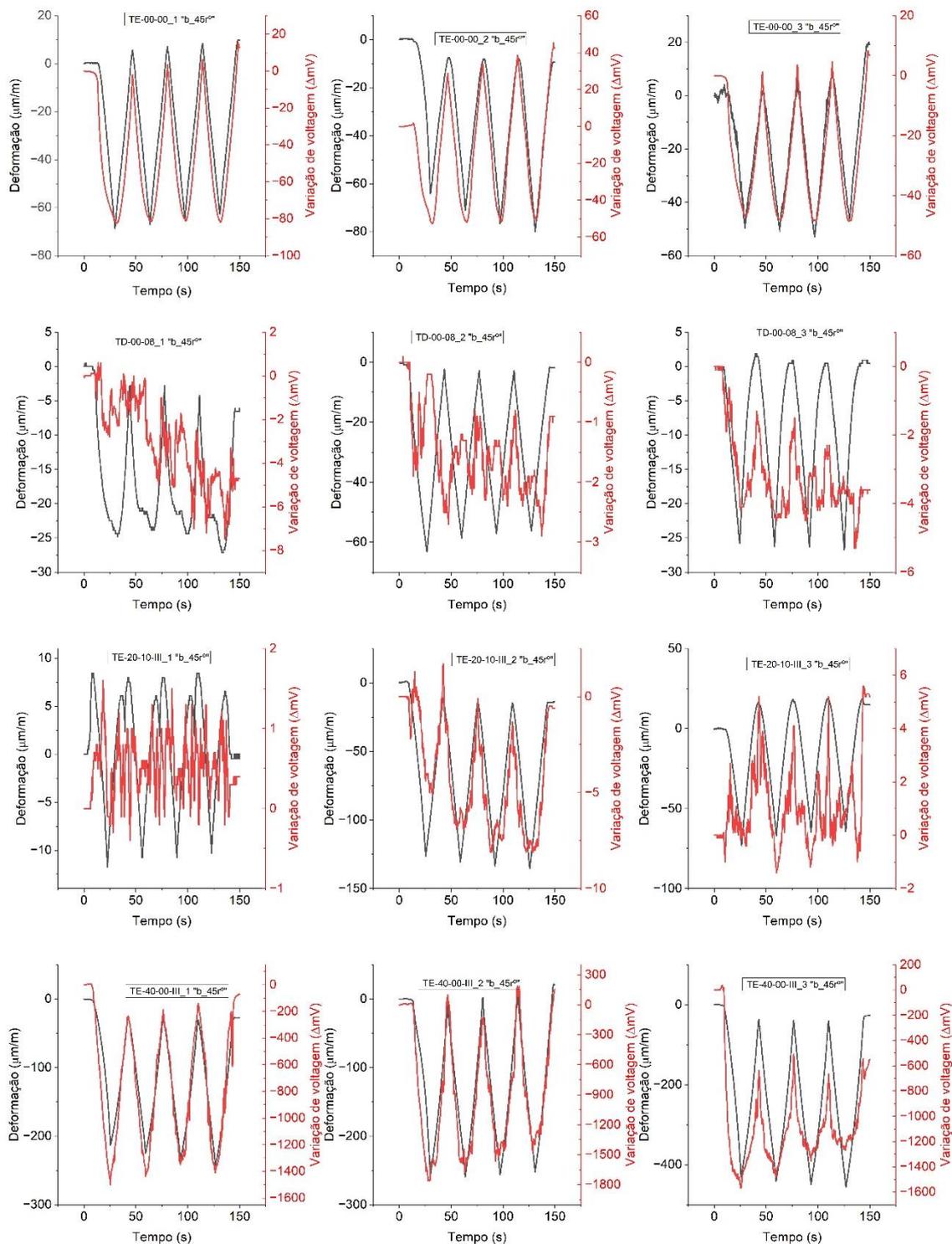
Fonte: Próprio autor.

Figura 178 – Análise piezorresistiva dos corpos de prova tipo roseta da série “D” (parcial) e “E” (parcial) com eletrodos e extensômetros na posição 90° após rotação horária



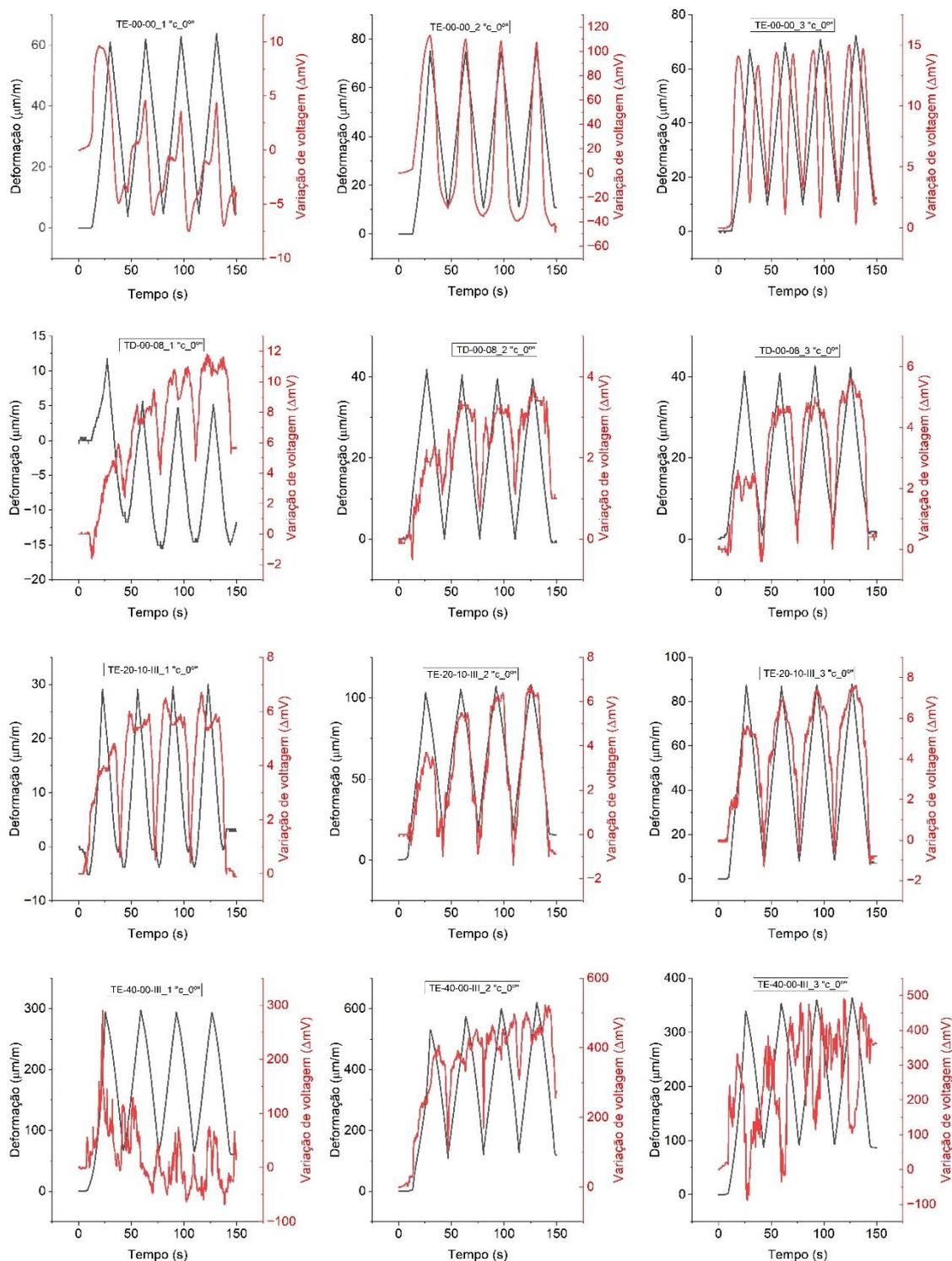
Fonte: Próprio autor.

Figura 179 – Análise piezorresistiva dos corpos de prova tipo roseta da série “D” (parcial) e “E” (parcial) com eletrodos e extensômetros na posição 45° após rotação horária



Fonte: Próprio autor.

Figura 180 – Análise piezorresistiva dos corpos de prova tipo roseta da série “D” (parcial) e “E” (parcial) com eletrodos e extensômetros na posição 0° após rotação horária

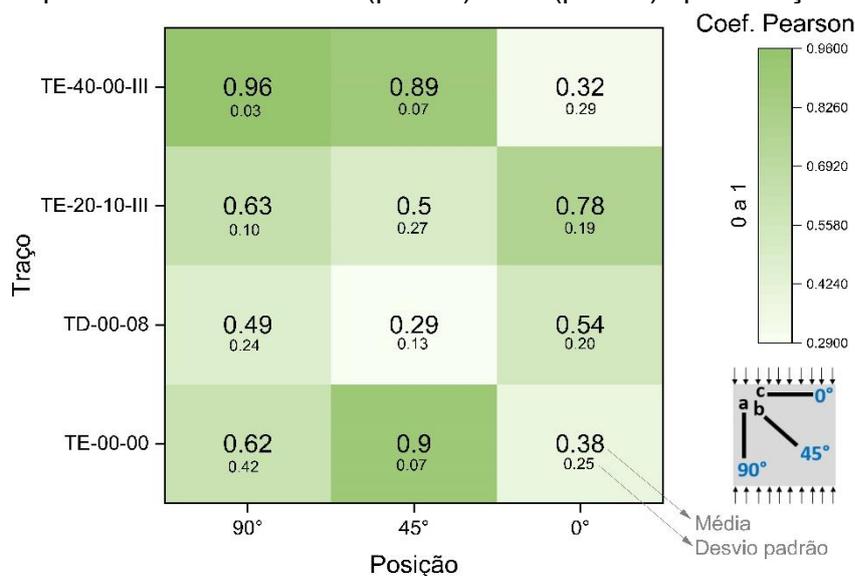


Fonte: Próprio autor.

A partir dos resultados das Figuras 178 a 180 foram determinados os coeficientes de correlação de Pearson de cada caso, sendo apresentado na Figura 181 os valores médios e respectivos desvios padrão. Foi possível observar um declínio significativo

da correlação do traço TE-40-00-III à tração (0°) em relação a análise anterior com a rotação horária de 90° . Ainda que em menor intensidade, tal declínio também foi observado no traço de referência (TE-00-00) para a mesma condição (0°). Essa situação pode estar associada à alteração no contato entre o eletrodo e a argamassa, após sofrer esforço mecânico no ensaio anterior (antes da rotação).

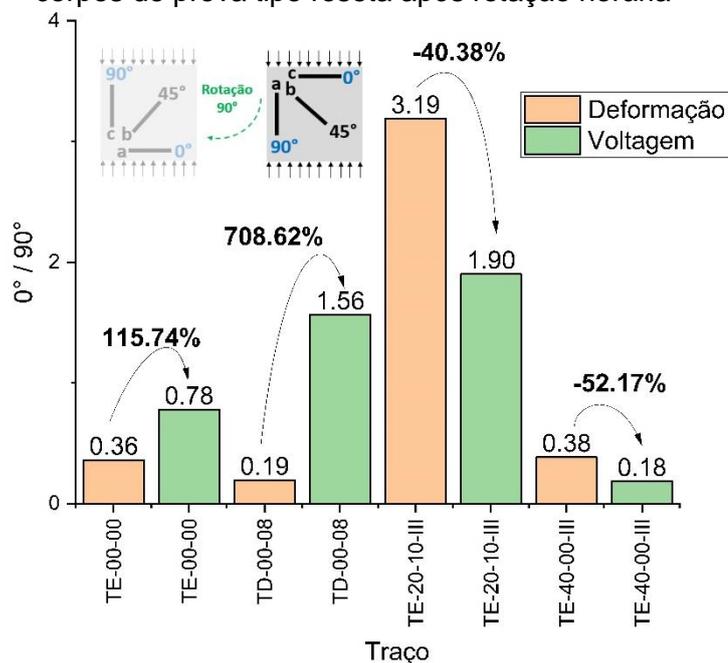
Figura 181 – Valores de coeficiente de Pearson da análise piezorresistiva dos corpos de prova tipo roseta das séries “D” (parcial) e “E” (parcial) após rotação horária



Fonte: Próprio autor.

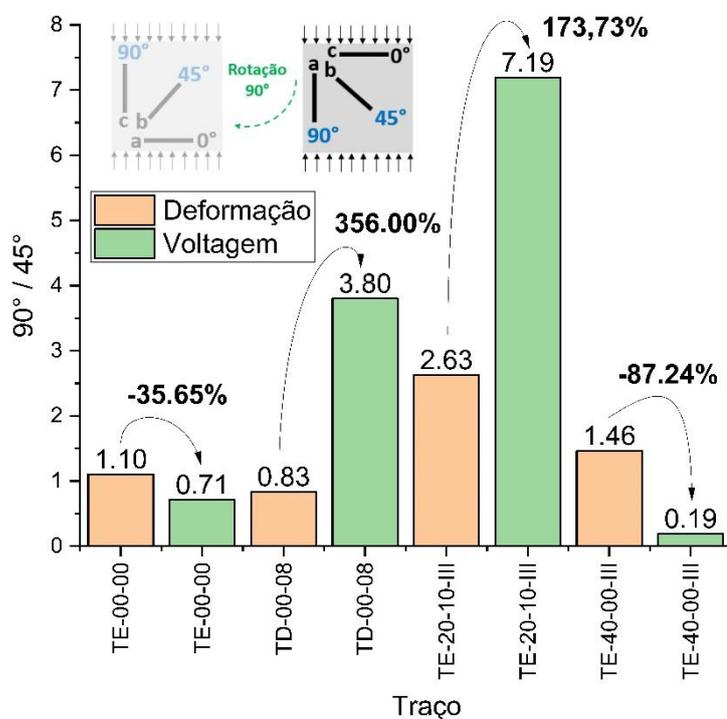
A partir dos valores de pico do 2º e do 3º ciclo de carregamento dos gráficos das Figuras 178 a 180, foram determinadas as relações calculadas por meio das Equações 42 a 44, tendo seus resultados apresentados nas Figuras 182 a 184. Em tais resultados foi possível observar que o traço TE-40-00-III novamente apresentou o melhor desempenho, com exceção da relação $90^\circ/45^\circ$ em que o traço referência (TE-00-00) apresentou menor variação entre as relações.

Figura 182 – Correlações entre as posições 0°/90° e respectivas variações percentuais nos corpos de prova tipo roseta após rotação horária



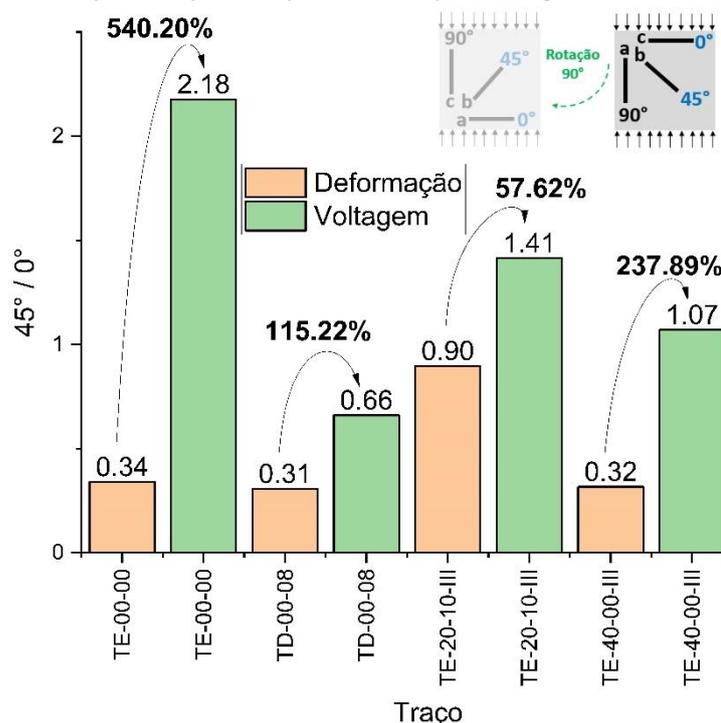
Fonte: Próprio autor.

Figura 183 – Correlações entre as posições 90°/45° e respectivas variações percentuais nos corpos de prova tipo roseta após rotação horária



Fonte: Próprio autor.

Figura 184 – Correlações entre as posições 45°/0° e respectivas variações percentuais nos corpos de prova tipo roseta após rotação horária

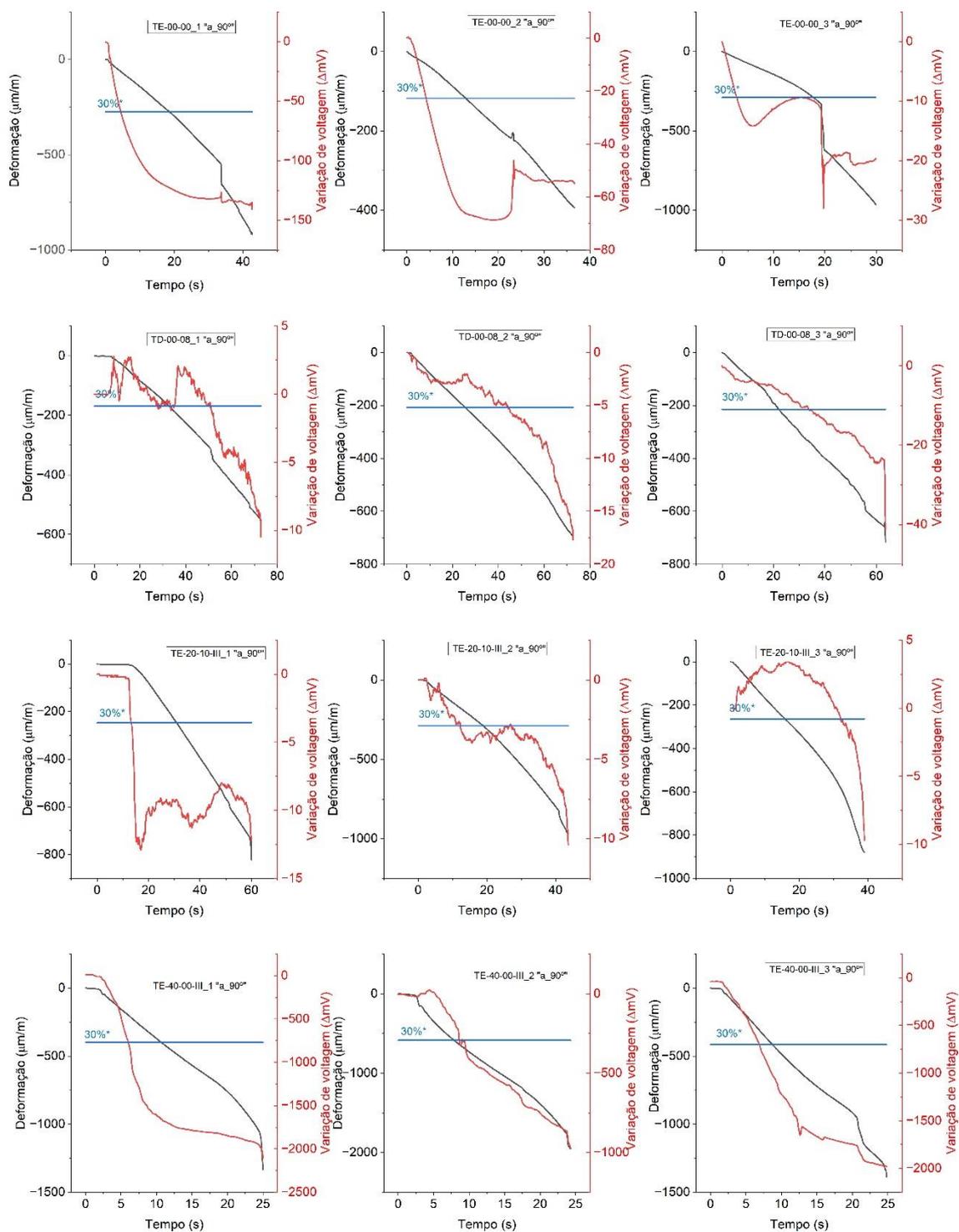


Fonte: Próprio autor.

Por fim, os corpos de prova tipo roseta foram submetidos ao esforço de compressão até sua ruptura, para análise piezorresistiva, conforme Figuras 185 a 187. Tal ensaio se deu na configuração disposta na Figura 177, ou seja, após rotação horária de 90°.

Em alguns casos de análises apresentados nas Figuras 185 e 186, as quais apresentam esforço de compressão, é possível observar um comportamento próximo do apresentado por Kim *et al.* (2021), onde a partir do regime elástico a resposta elétrica muda seu comportamento, conforme exemplificado pelos mesmos na Figura 10.

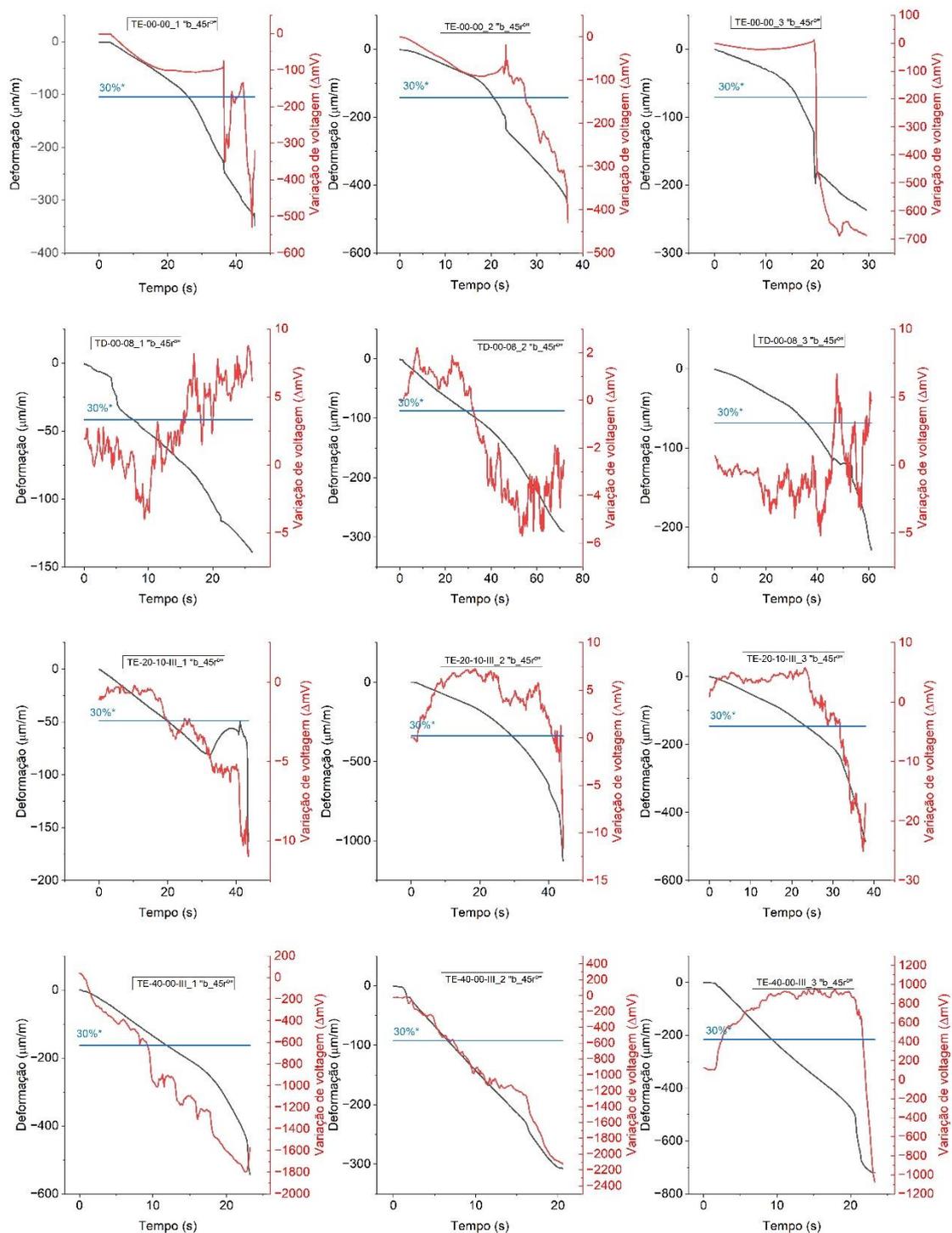
Figura 185 – Análise piezorresistiva dos corpos de prova tipo roseta da série “D” (parcial) e “E” (parcial) até a ruptura com eletrodos e extensômetros na posição 90° após rotação horária



*da deformação máxima

Fonte: Próprio autor.

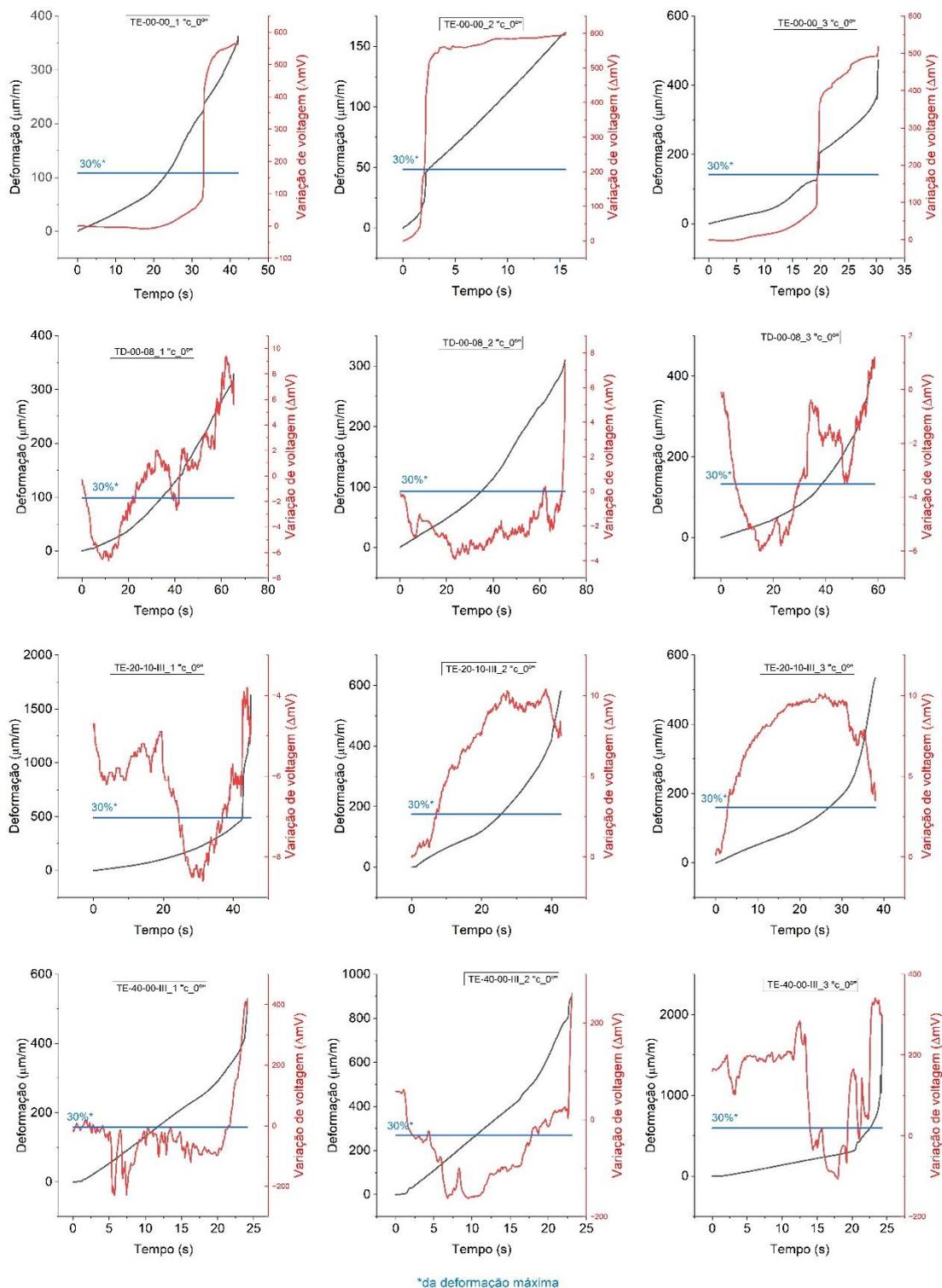
Figura 186 – Análise piezorresistiva dos corpos de prova tipo roseta da série “D” (parcial) e “E” (parcial) até a ruptura com eletrodos e extensômetros na posição 45° após rotação



*da deformação máxima

Fonte: Próprio autor.

Figura 187 – Análise piezorresistiva dos corpos de prova tipo roseta da série “D” (parcial) e “E” (parcial) até a ruptura com eletrodos e extensômetros na posição 0° após rotação

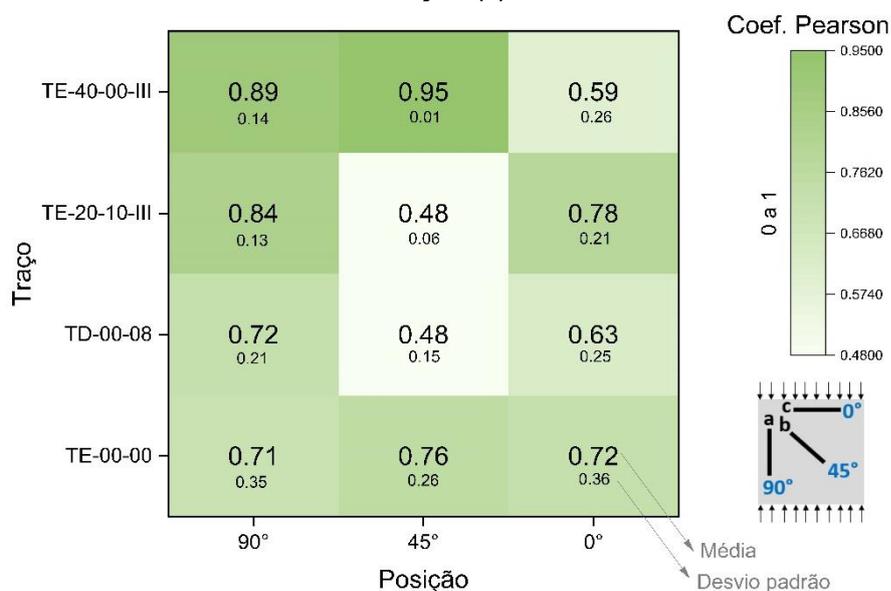


Fonte: Próprio autor.

Quanto à correlação entre a deformação (ϵ) e a variação de voltagem (ΔU) dos corpos de prova tipo roseta submetidos à compressão até a ruptura, foi possível observar (Figuras 188 e 189) que no caso do traço TD-08-00 (somente fibra de carbono) houve

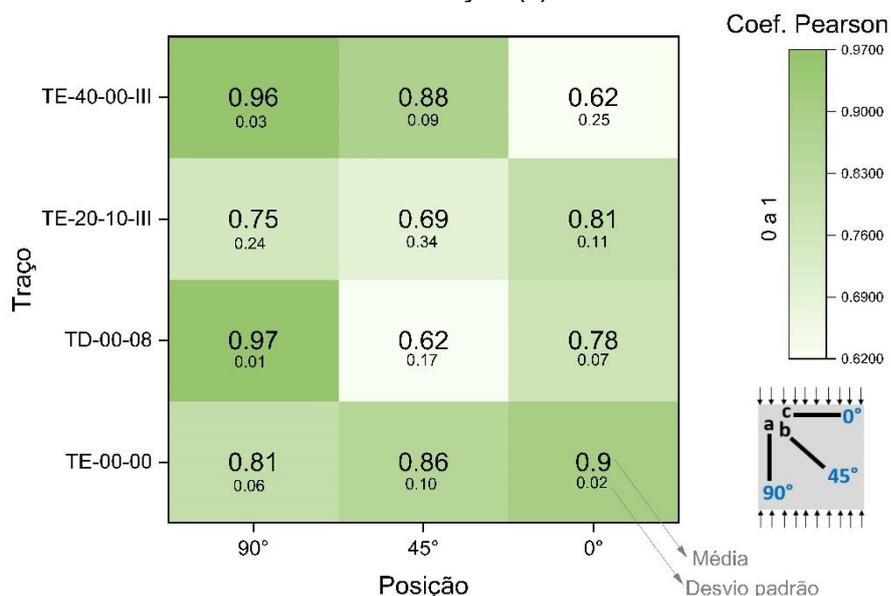
uma variação de um décimo ou mais da correlação em todas as posições (0° , 45° e 90°) entre a análise de correlação de 0 a 30% e de 30% até a deformação máxima. Esse mesmo comportamento foi observado na posição 0° do traço TE-00-00 (referência) e da posição 45° do traço TE-20-10-III. No caso do traço TE-40-00-III as variações foram inferiores a um décimo.

Figura 188 – Valores de coeficiente de Pearson da análise piezorresistiva dos corpos de prova tipo roseta das séries “D” (parcial) e “E” (parcial) após rotação horária, entre 0 e 30% da deformação (ϵ) máxima



Fonte: Próprio autor.

Figura 189 – Valores de coeficiente de Pearson da análise piezorresistiva dos corpos de prova tipo roseta das séries “D” (parcial) e “E” (parcial) após rotação horária, de 30% até 100% da deformação (ϵ) máxima



Fonte: Próprio autor.

Nas análises de correlação por Pearson e de sensibilidade, ambas para avaliação da resposta piezorresistiva, foram observados em alguns casos elevado desvio padrão. Situação semelhante já foi reportada por outros pesquisadores que obtiveram valores significativos de desvio padrão da sensibilidade na análise piezorresistiva de compósitos cimentícios (Adresi *et al.*, 2017; Huang; Li; Qian, 2018; Cosoli *et al.*, 2023).

Variações em propriedades elétricas de compósitos cimentícios com resíduos também foram observadas por Norambuena-Contreras *et al.* (2018), os quais se depararam com aumento da porosidade do compósito à medida que se aumentava o teor de incorporação de resíduos.

Quanto à porosidade em compósitos cimentícios com resíduo de lona de freio, Wang *et al.* (2016b) e Wang *et al.* (2017) constataram que a variação pode ser influenciada pelo resíduo de lona de freio, o qual pode promover o aumento ou a redução da porosidade, em função da dosagem e das características do resíduo. A constatação desses pesquisadores pode ser um indicativo de uma das variáveis que pode ter colaborado com a ocorrência do desvio padrão de algumas amostras da presente pesquisa.

Outra variável capaz de influenciar de forma significativa os resultados de uma análise de propriedades elétricas compósito cimentício é o contato do mesmo com os eletrodos. É necessário que esse contato seja adequado para se reduzir a resistência elétrica formada nesse ponto (Gowers; Millard (1999) *apud* He *et al.*, 2018; Newlands *et al.*, 2008). Contudo, nem sempre é possível garantir que os eletrodos tenham o contato adequado, inclusive com a variação dos traços em função da incorporação de resíduos, conforme demonstrado nas Figuras B10 a B13 do Apêndice B.

4.1.5 Análise da microestrutura do CCA

Foi realizada a análise da microestrutura do resíduo de lona de freio e do CCA nos traços TB-00-00 (referência), TB-70-00-III (com resíduo), TE-00-00 (referência), TD-00-08 (somente com fibra de carbono) e TE-20-10-III (com resíduo e fibra de carbono), conforme amostras da Figura 190.

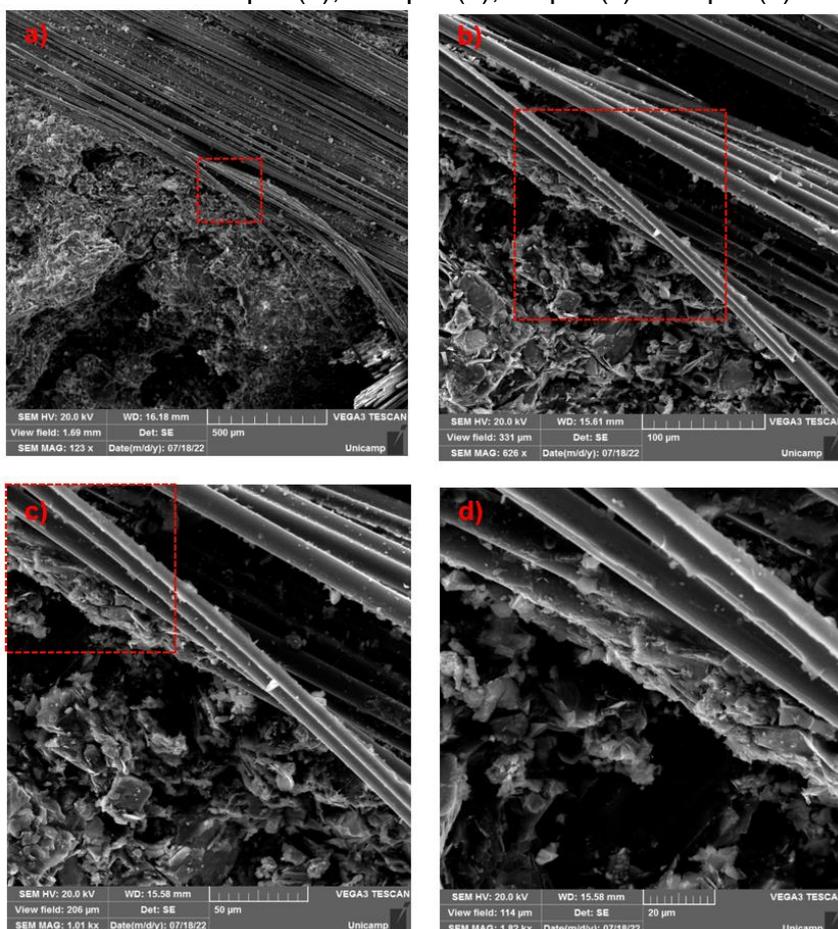
Figura 190 – Amostras de lona de freio e argamassas analisadas por MEV e EDS



Fonte: Próprio autor.

Na análise da microestrutura do resíduo de lona de freio, conforme resultados da Figura 191, foi confirmada a presença de microfibras, aparentemente sintéticas, devido sua morfologia retilínea.

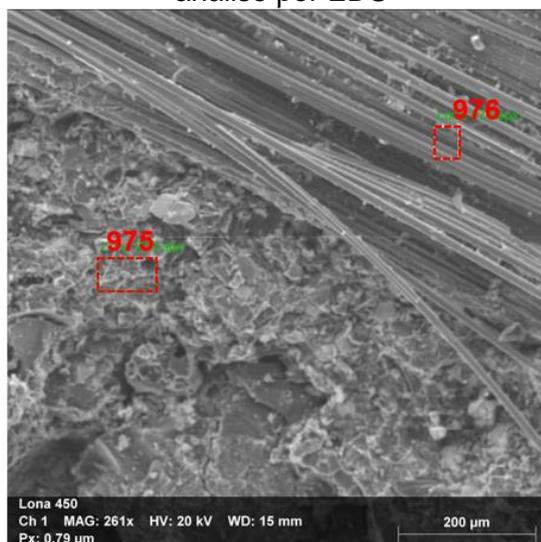
Figura 191 – Imagens de MEV do resíduo de lona de freio, com aproximações nas escalas de 500 μm (a), 100 μm (b), 50 μm (c) e 20 μm (d).



Fonte: Próprio autor.

A análise por EDS do resíduo de lona freio foi realizada em dois pontos da amostra, conforme imagem da Figura 192.

Figura 192 – Imagens de MEV do resíduo de lona de freio com indicação dos pontos de análise por EDS



Fonte: Próprio autor.

Na análise por EDS do ponto 975 (Tabela 38), apresentada na forma de contagem dos elementos (*Netto*), a presença do elemento carbono em abundância no resíduo de lona de freio, pode ser um indicativo da presença de grafite, largamente utilizada em lonas de freio. O elemento silício, também foi encontrado em grandes quantidades por Wang *et al.* (2017) e Wang *et al.* (2016b) em suas amostras do resíduo de materiais de freio.

Dimopoulos Eggenschwiler *et al.* (2022) destacam que as fibras contidas nas pastilhas de freio analisadas por EDS pelos mesmos, caracterizaram-se pela presença dos elementos magnésio, alumínio, silício, cálcio e em menor quantidade ferro. Tal caracterização vai ao encontro do resultado obtido pela análise de EDS para a fibra do ponto 976, conforme resultados também apresentados na Tabela 38.

Tabela 38 – Resultado da análise por EDS de pontos do resíduo de lona de freio

Elemento	Ponto 975		Ponto 976	
	<i>Netto</i>	Composição	<i>Netto</i>	Composição
Silício (Si)	21836	SiO ₂	50160	SiO ₂
Alumínio (Al)	15486	Al ₂ O ₃	12888	Al ₂ O ₃
Enxofre (S)	4926	SO ₃		
Cálcio (Ca)	6221	CaO	43441	CaO
Potássio (K)	4466	K ₂ O	1029	K ₂ O
Ferro (Fe)	1441	FeO	1021	FeO

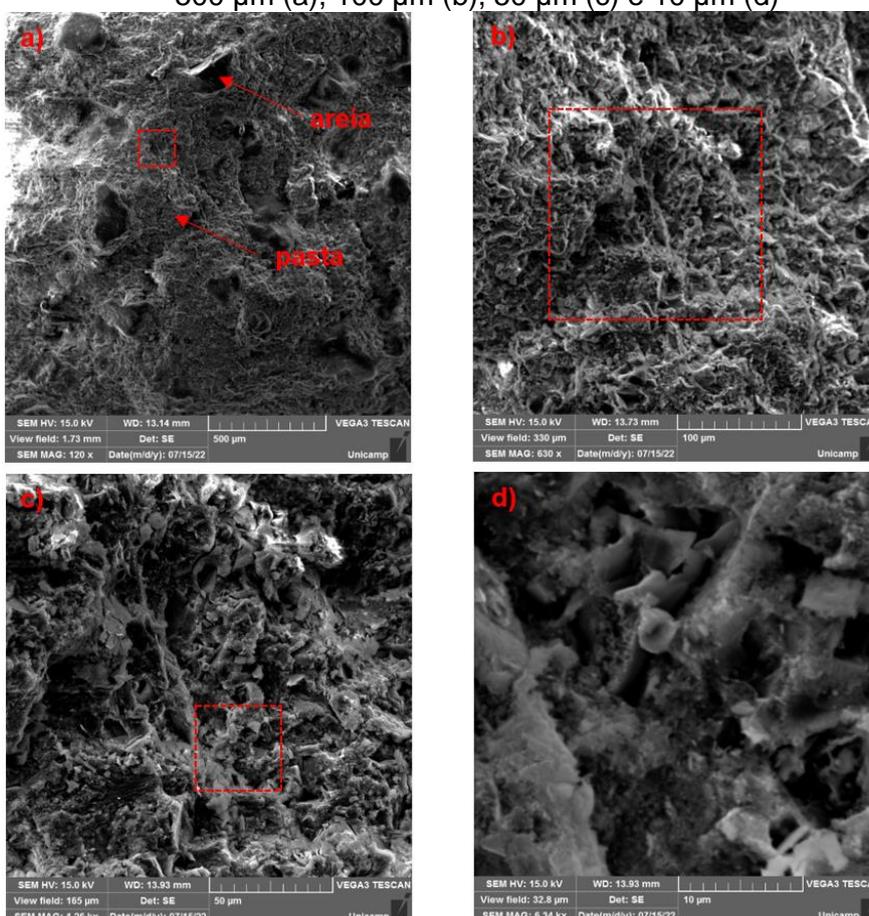
Elemento	Ponto 975		Ponto 976	
	Netto	Composição	Netto	Composição
Magnésio (Mg)	2044	MgO	1037	MgO
Zinco (Zn)	183	ZnO		
Carbono (C)	64600		20452	
Oxigênio (O)	18688		16389	
Bário (Ba)			880	BaO

Fonte: Próprio autor.

Em relação à presença do elemento bário (Ba), cabe destacar que, tanto na análise de solubilização quanto na de lixiviação, apresentadas na Tabela 26, o elemento ficou em quantidades inferiores aos limites máximos estabelecidos para classificação como resíduos não perigosos, atendendo assim aos padrões instituídos pela ABNT NBR 10004 (2004).

Dos CCAs produzidos nesta pesquisa, a primeira amostra a ser analisada por MEV foi o traço de referência da série “B” (TB-00-00), conforme imagens apresentadas na Figura 193.

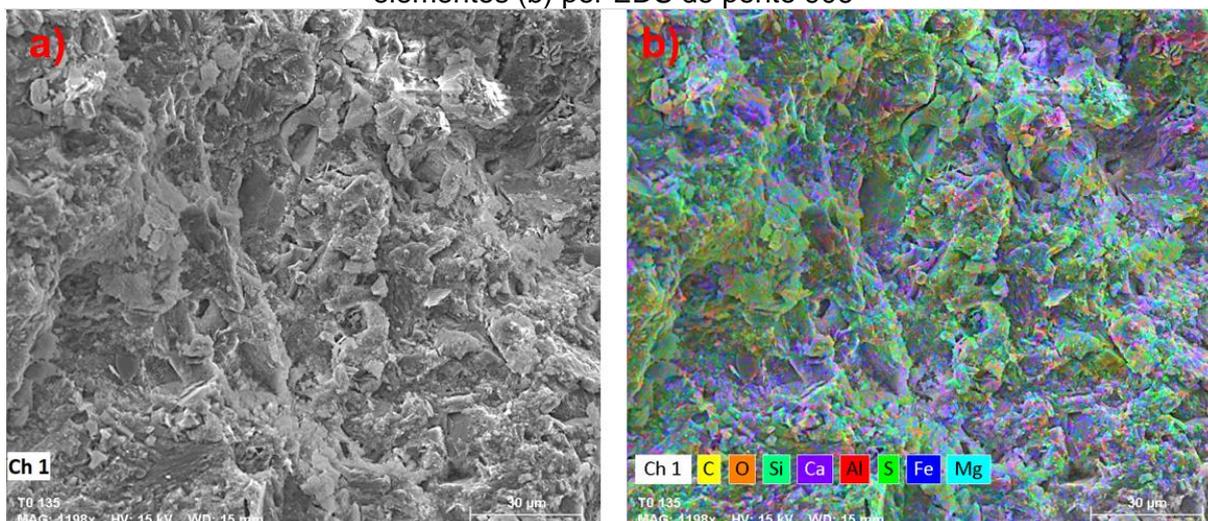
Figura 193 – Imagens de MEV do traço TB-00-00, com aproximações nas escalas de 500 µm (a), 100 µm (b), 50 µm (c) e 10 µm (d)



Fonte: Próprio autor.

Na análise por EDS da amostra TB-00-00, o campo de abrangência se deu na área indicada na Figura 194. Os resultados da composição apresentados na Tabela 39 mostram a predominância de óxido de cálcio (CaO), o que pode corresponder ao cimento Portland.

Figura 194 – Imagens de MEV (a) da argamassa do traço TB-00-00 com mapeamento dos elementos (b) por EDS do ponto 906



Fonte: Próprio autor.

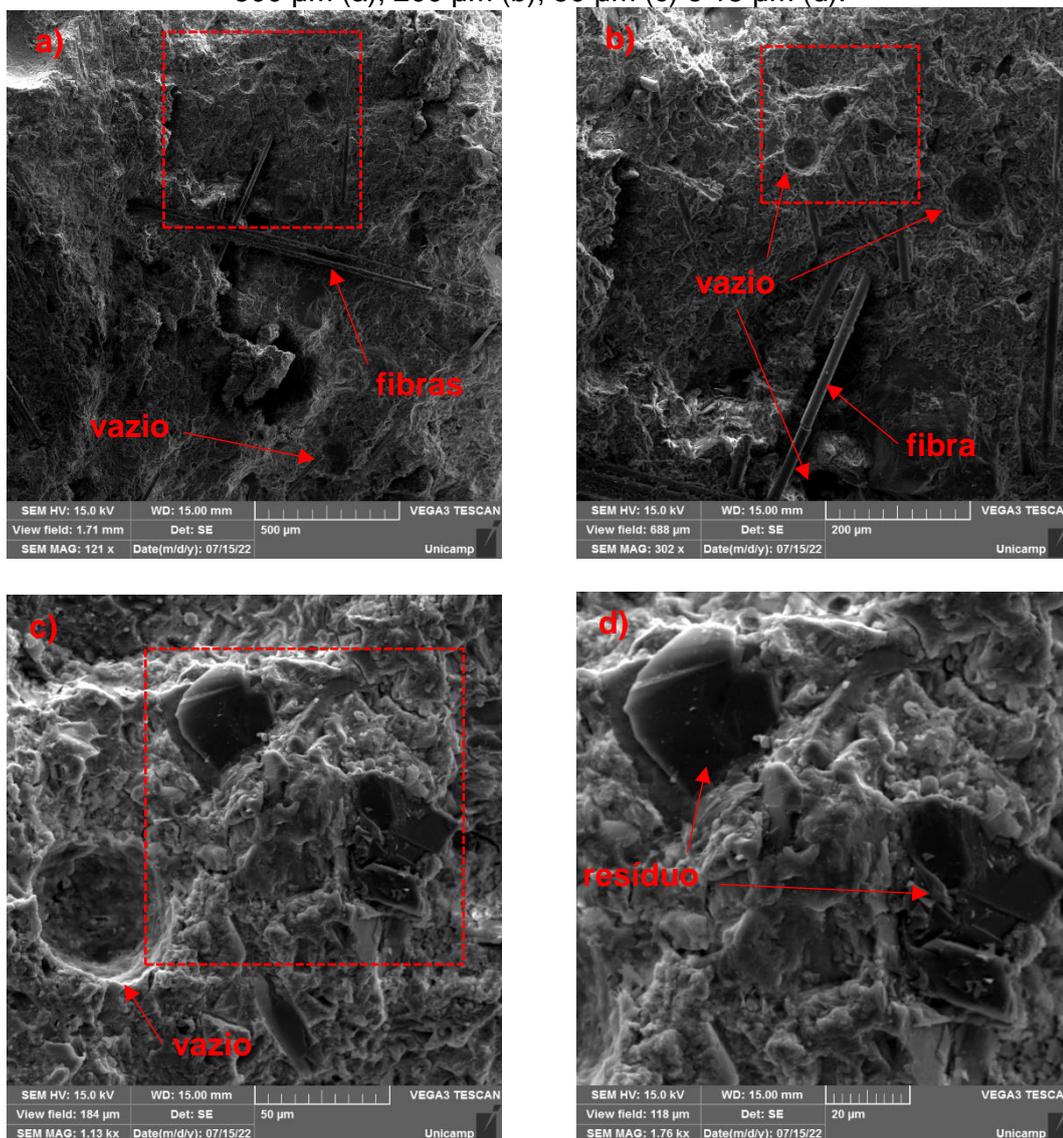
Tabela 39 – Resultado da análise por EDS de ponto da argamassa do traço TB-00-00

Elemento	Ponto 906	
	Netto	Composição
Cálcio (Ca)	85677	CaO
Silício (Si)	22703	SiO ₂
Alumínio (Al)	5692	Al ₂ O ₃
Ferro (Fe)	1479	FeO
Magnésio (Mg)	507	MgO
Oxigênio (O)	19315	
Carbono (C)	1604	

Fonte: Próprio autor.

Na análise dos CCAs com incorporação de resíduo de lona de freio, a amostra analisada por MEV foi a do traço TB-70-00-III, conforme imagens apresentadas na Figura 195, com destaque para a presença de fibras, relativamente dispersas. Tais fibras podem justificar os ganhos de resistência à tração da flexão constatados em alguns traços das séries “B”, “C” e “E” (Figuras 119, 120 e 122).

Figura 195 – Imagens de MEV do traço TB-70-00-III, com aproximações nas escalas de 500 μm (a), 200 μm (b), 50 μm (c) e 15 μm (d).

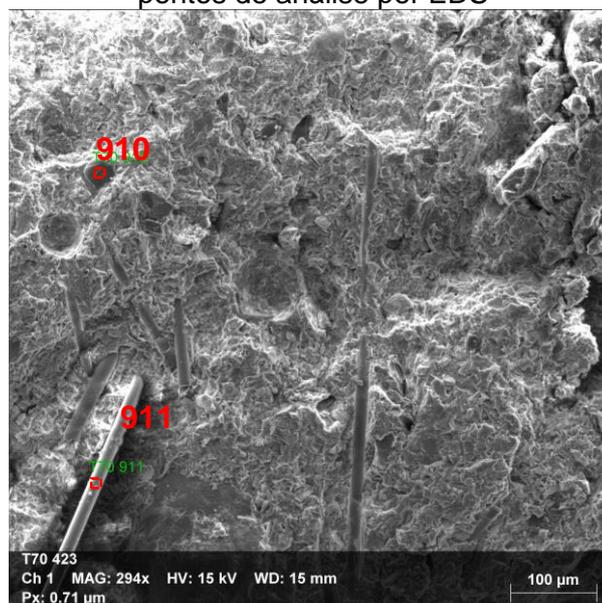


Fonte: Próprio autor.

Os vazios observados na Figura 195 podem ser indicativos para parte dos motivos que acarretarem o aumento da porosidade, observados nos resultados do Índice de vazios (Figura 132), o que conseqüentemente pode gerar uma redução na resistência à compressão.

Podem ser observados na Figura 196 os pontos de análise por EDS do traço TB-70-00-III, com a presença de partículas e fibras. O ponto 910 por sua morfologia poderia ser tanto um grão de areia como uma partícula do resíduo. Contudo, a pouca presença de dióxido de silício (SiO_2) associada à grande presença de carbono, afasta a possibilidade de se tratar de um grão de areia, o que indica se tratar possivelmente de uma partícula do resíduo de lona de freio, conforme composição da Tabela 40.

Figura 196 – Imagens de MEV da argamassa do traço TB-70-00-III com indicação dos pontos de análise por EDS



Fonte: Próprio autor.

Tabela 40 – Resultado da análise por EDS de pontos da argamassa do traço TB-70-00-III

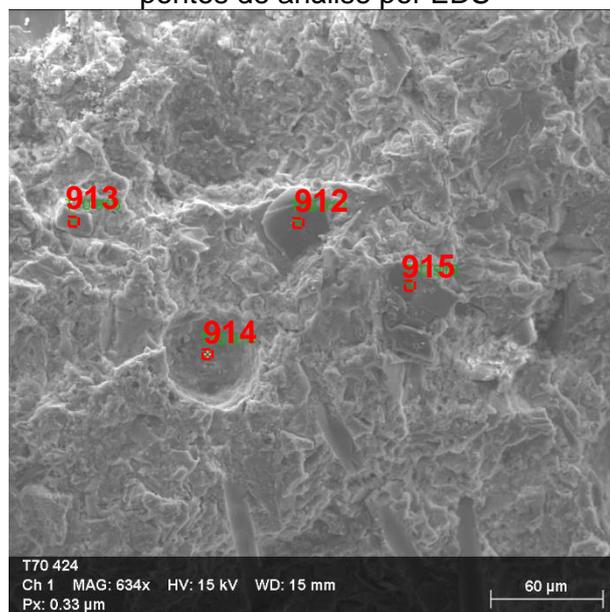
Elemento	Ponto 910		Ponto 911	
	Netto	Composição	Netto	Composição
Cálcio (Ca)	18838	CaO	30173	CaO
Silício (Si)	8381	SiO ₂	84036	SiO ₂
Alumínio (Al)	1370	Al ₂ O ₃	20016	Al ₂ O ₃
Oxigênio (O)	383		21728	
Carbono (C)	126118		1162	
Magnésio (Mg)			4758	MgO

Fonte: Próprio autor.

Ainda em análises da composição do traço TB-70-00-III (Tabelas 41 e 42), em outros pontos (Figura 197), por semelhança morfológica e de composição ao ponto 910, o ponto 912 pode também corresponder a uma partícula do resíduo conforme composição apresentada na Tabela 41.

Quanto ao ponto 914, esse aparenta uma depressão e sua composição (Tabela 42) se assemelha a da argamassa do traço TB-00-00. Por fim, o ponto 915, por exclusão, se comparado à composição do cimento e da areia de quartzo, bem como por sua alta concentração de carbono, pode ser interpretado como uma provável partícula de resíduo de lona de freio.

Figura 197 – Imagens de MEV da argamassa do traço TB-70-00-III com indicação dos pontos de análise por EDS



Fonte: Próprio autor.

Tabela 41 – Resultado da análise por EDS de pontos 912 e 913 da argamassa do traço TB-70-00-III

Elemento	Ponto 912		Ponto 913	
	Netto	Composição	Netto	Composição
Cálcio (Ca)	17139	CaO	88582	CaO
Silício (Si)	8682	SiO ₂	35322	SiO ₂
Alumínio (Al)	2379	Al ₂ O ₃		
Ferro (Fe)	281	FeO		
Carbono (C)	125463		1720	
Oxigênio (O)	653		18366	
Magnésio (Mg)			898	MgO

Fonte: Próprio autor.

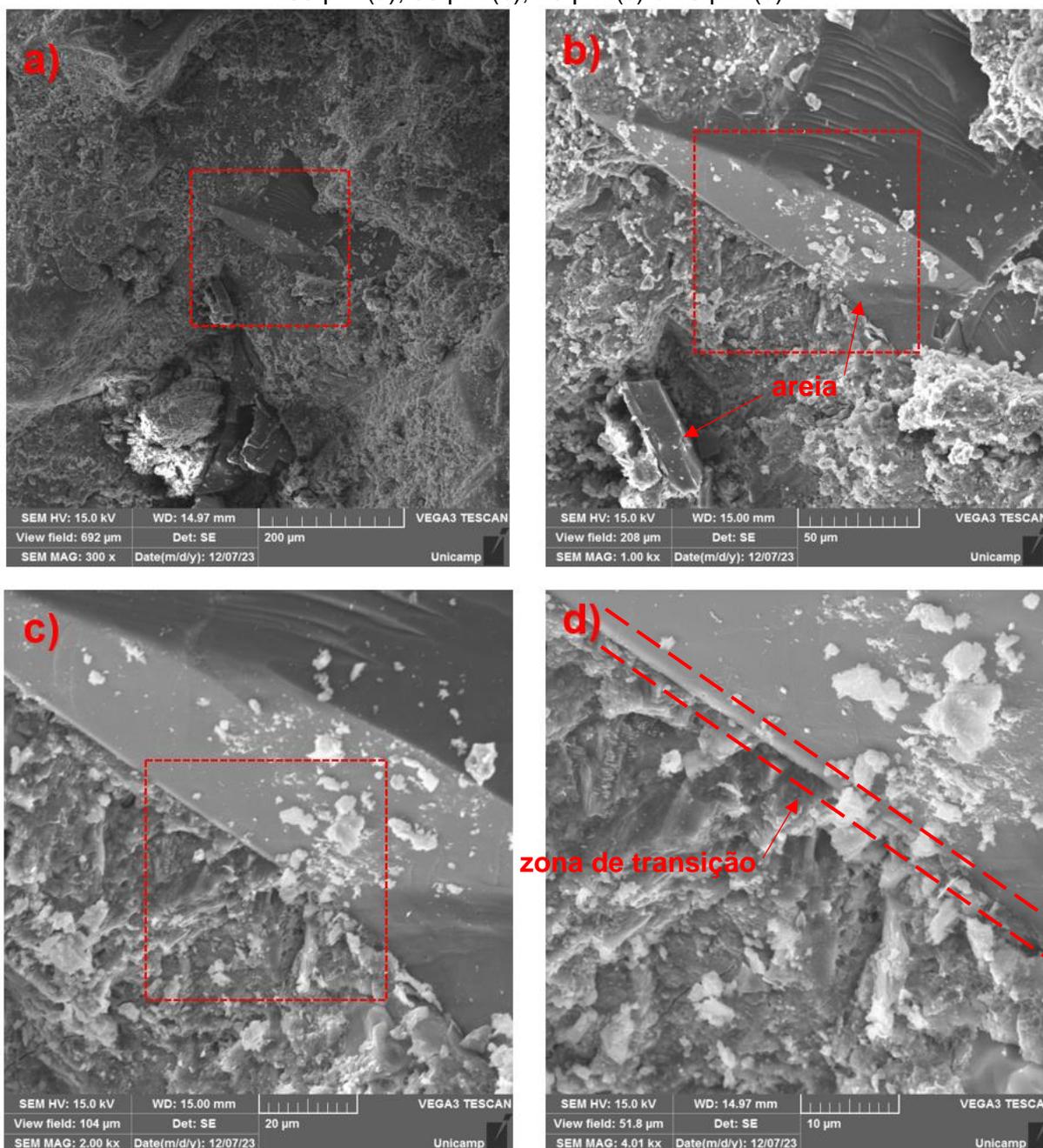
Tabela 42 – Resultado da análise por EDS de pontos 914 e 915 da argamassa do traço TB-70-00-III

Elemento	Ponto 914		Ponto 915	
	Netto	Composição	Netto	Composição
Cálcio (Ca)	124656	CaO	2200	CaO
Silício (Si)	7208	SiO ₂		
Alumínio (Al)	1498	Al ₂ O ₃		
Ferro (Fe)	3480	FeO		
Carbono (C)	480		146363	
Oxigênio (O)	1658		1618	
Enxofre (S)	3778	SO ₃		

Fonte: Próprio autor.

As imagens obtidas por MEV do traço de referência da série “E” (TE-00-00) são apresentadas na Figura 198, na qual pode ser observada a pasta cimentícia e a areia.

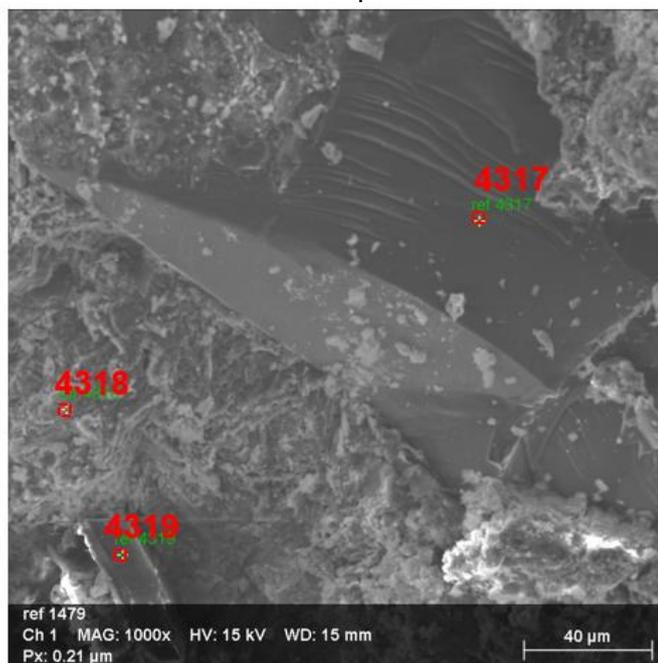
Figura 198 – Imagens de MEV do traço TE-00-00, com aproximações nas escalas de 200 μm (a), 50 μm (b), 20 μm (c) e 10 μm (d)



Fonte: Próprio autor.

Na análise por EDS (Figura 199 e Tabela 43) da amostra TE-00-00, observou-se que os pontos 4317 e 4319 são compostos por elemento compatível com o da areia, ou seja, dióxido de silício (SiO_2). Quanto ao ponto 4318, este apresenta elementos compatíveis com o cimento Portland, especialmente o óxido de cálcio (CaO).

Figura 199 – Imagens de MEV da argamassa do traço TE-00-00 com indicação dos pontos de análise por EDS



Fonte: Próprio autor.

Tabela 43 – Resultado da análise por EDS de pontos da argamassa do traço TE-00-00

Elemento	Ponto 4317		Ponto 4318		Ponto 4319	
	Netto	Comp.*	Netto	Comp.*	Netto	Comp.*
Silício (Si)	132684	SiO ₂	41090	SiO ₂	129426	SiO ₂
Oxigênio (O)	61401		38999		63281	
Cálcio (Ca)			73051	CaO		
Alumínio (Al)			2760	Al ₂ O ₃		

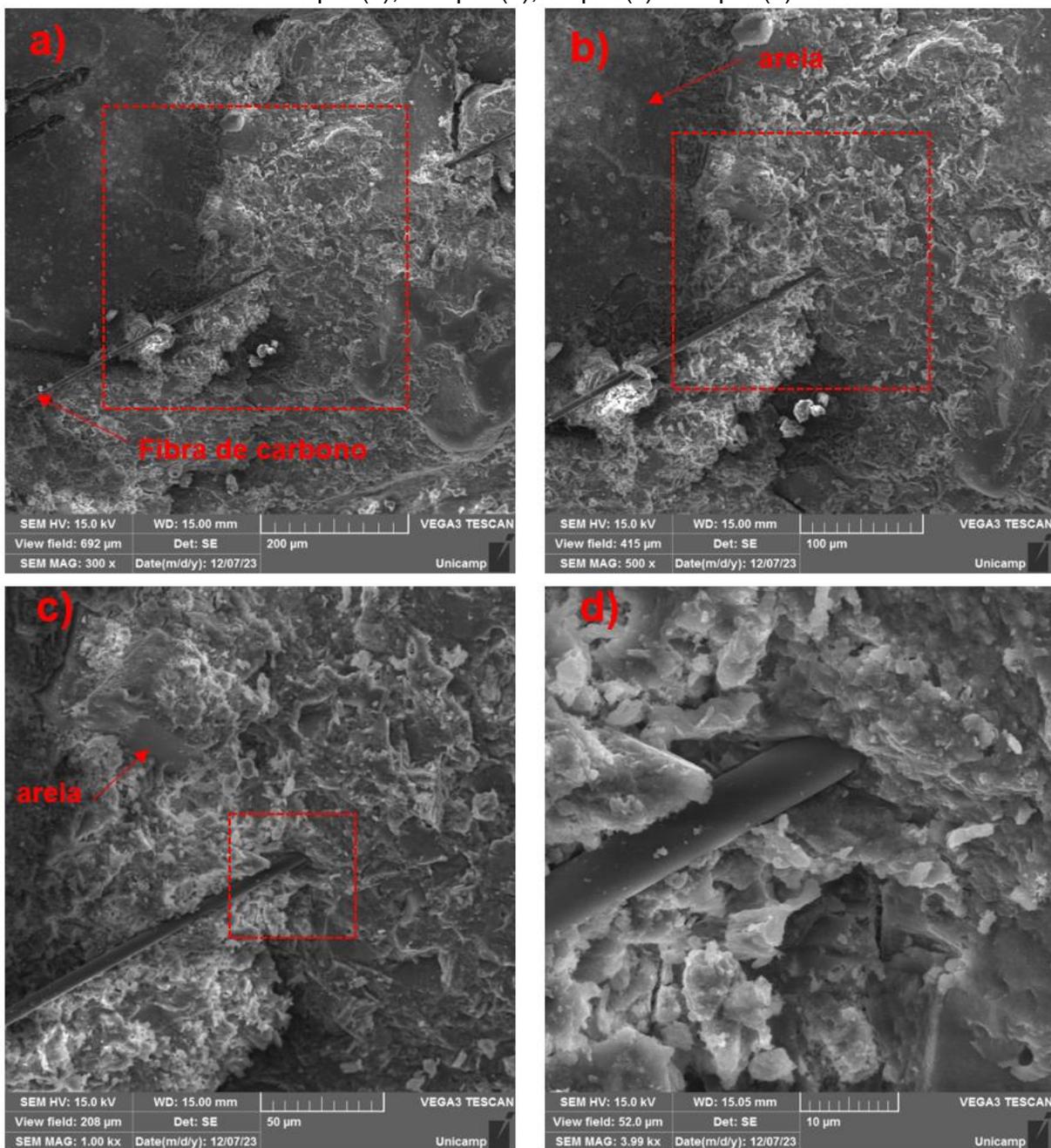
*Composição

Fonte: Próprio autor.

Nas imagens (Figura 200) do traço com fibra de carbono da série “D” (TD-00-08) é possível observar além da pasta cimentícia a fibra de carbono e grão de areia.

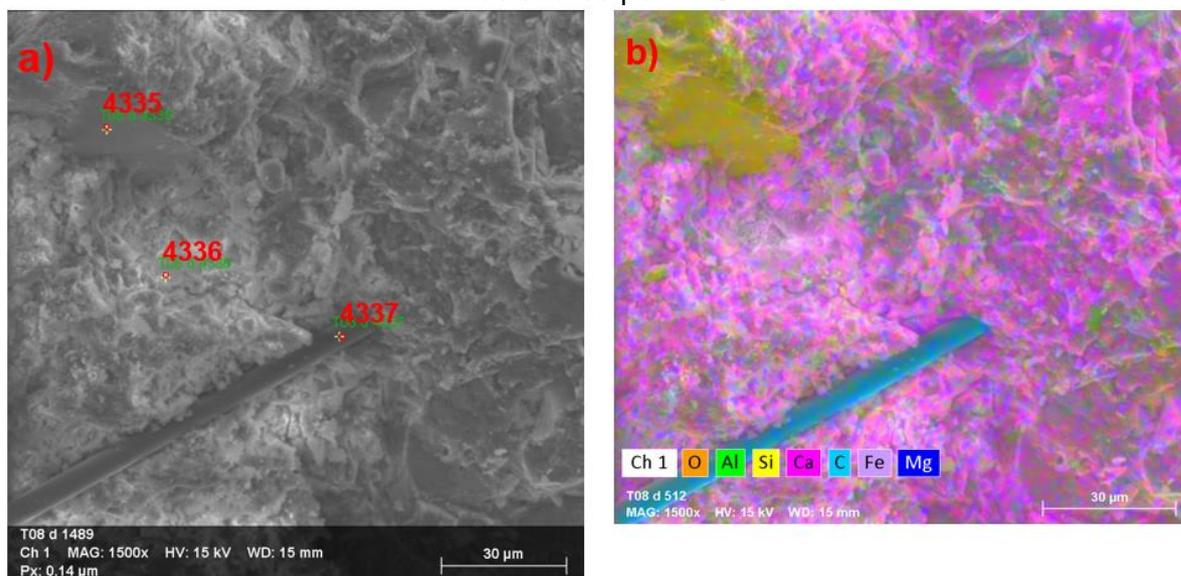
A análise por EDS (Figura 201 e Tabela 44) da amostra TD-00-08 confirma a alta quantidade de carbono (C) na fibra (ponto 4337), cálcio (Ca) na pasta cimentícia e silício (Si) na areia (4335).

Figura 200 – Imagens de MEV do traço TD-00-08, com aproximações nas escalas de 200 μm (a), 100 μm (b), 50 μm (c) e 10 μm (d)



Fonte: Próprio autor.

Figura 201 – Imagens de MEV da argamassa do traço TD-00-08 com indicação dos pontos de análise por EDS



Fonte: Próprio autor.

Tabela 44 – Resultado da análise por EDS dos pontos 4335 a 4337 da argamassa do traço TD-00-08

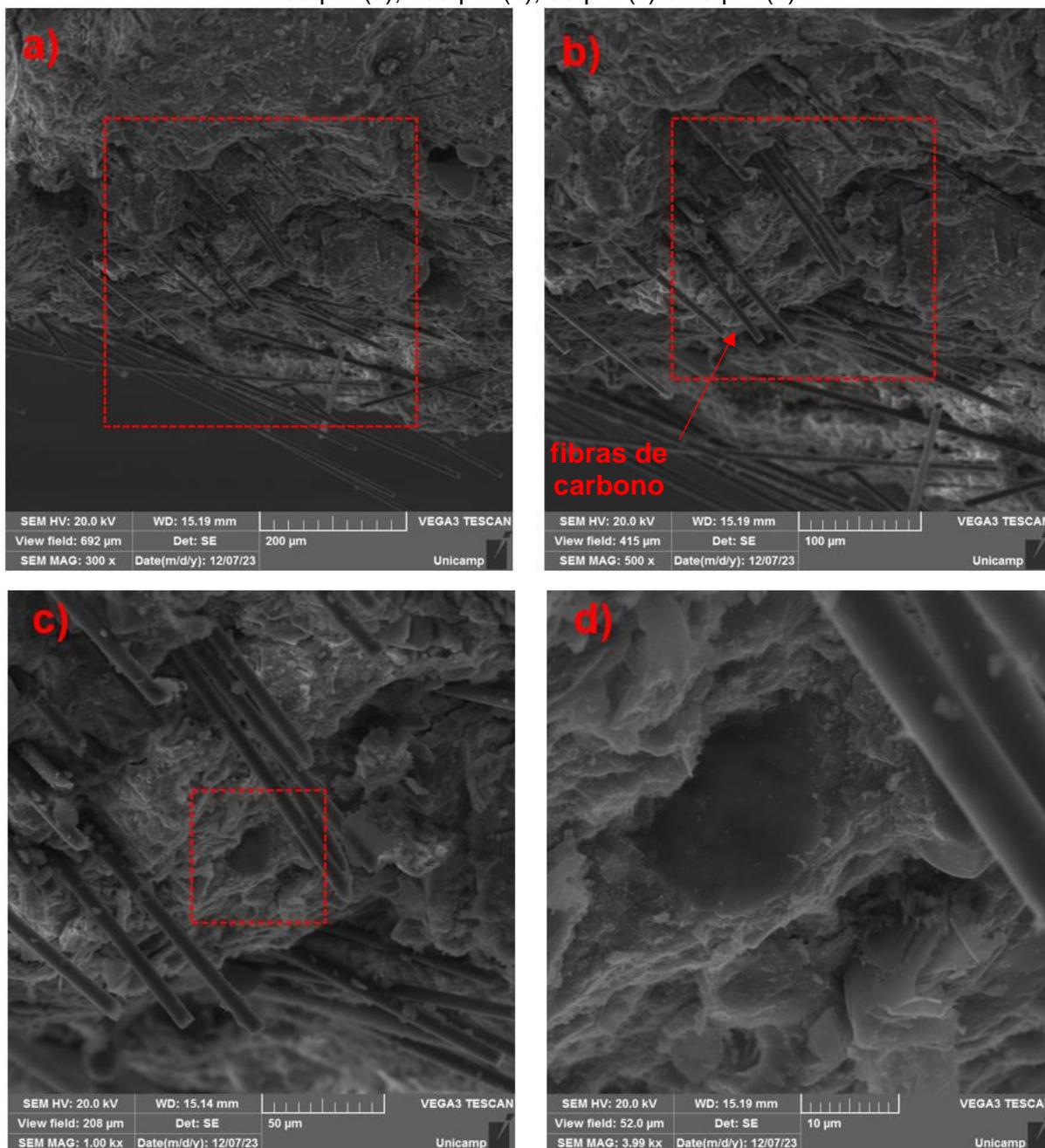
Elemento	Ponto 4335		Ponto 4336		Ponto 4337	
	Netto	Comp.*	Netto	Comp.*	Netto	Comp.*
Silício (Si)	113515	SiO ₂	24223	SiO ₂		
Oxigênio (O)	72027		23740		2427	
Cálcio (Ca)	4463	CaO	99549	CaO	1741	CaO
Alumínio (Al)			3706	Al ₂ O ₃		
Carbono (C)	2272		4206		181989	

*Composição

Fonte: Próprio autor.

Quanto as imagens (Figura 202) do traço com resíduo de lona de freio e com fibra de carbono (TE-20-10-III) é possível observar a dispersão das referidas fibras.

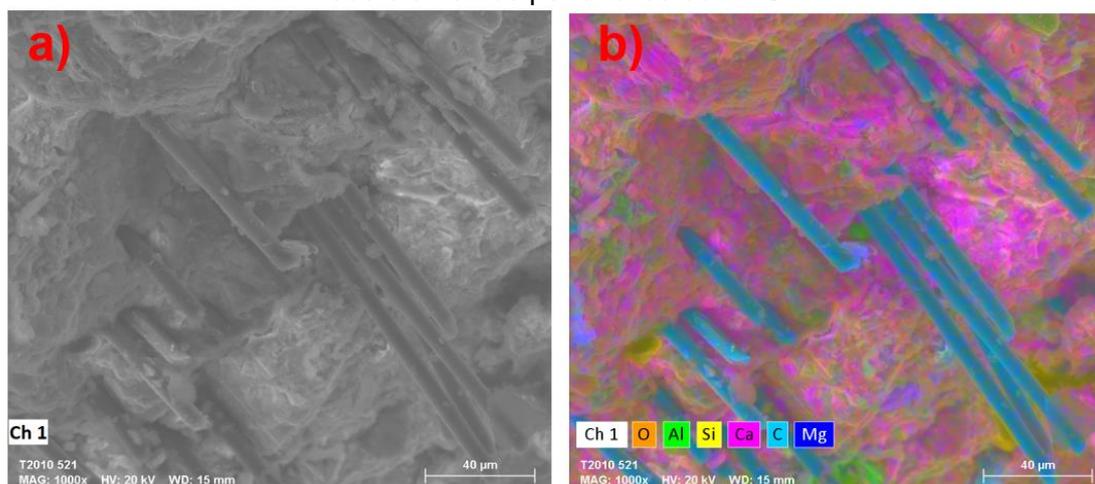
Figura 202 – Imagens de MEV do traço TE-20-10-III, com aproximações nas escalas de 200 μm (a), 100 μm (b), 50 μm (c) e 10 μm (d)



Fonte: Próprio autor.

No mapeamento por EDS (Figura 203) do traço TE-20-10-III é possível constatar que devido à alta concentração de carbono (C) as fibras correspondem a fibra de carbono adicionada e não à fibra que pode existir no resíduo de lona de freio, como foi o caso da análise da microestrutura do traço TB-70-00-III (ponto 911 da Figura 196).

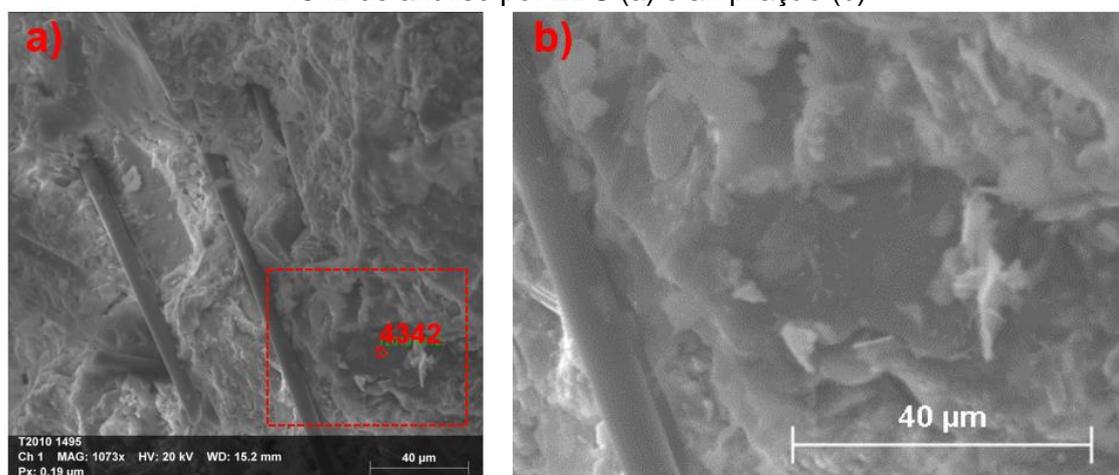
Figura 203 – Imagens (a) de MEV da argamassa do traço TE-20-10-III com mapeamento dos elementos por análise de EDS



Fonte: Próprio autor.

Quanto à análise por EDS (Figura 204 e Tabela 45) do ponto 4342 do traço TE-20-10-III, é possível que a partícula seja referente ao resíduo de lona de freio, dada sua alta concentração de carbono (C), bem como sua morfologia.

Figura 204 – Imagens de MEV da argamassa do traço TE-20-10-III com indicação do ponto 4342 de análise por EDS (a) e ampliação (b)



Fonte: Próprio autor.

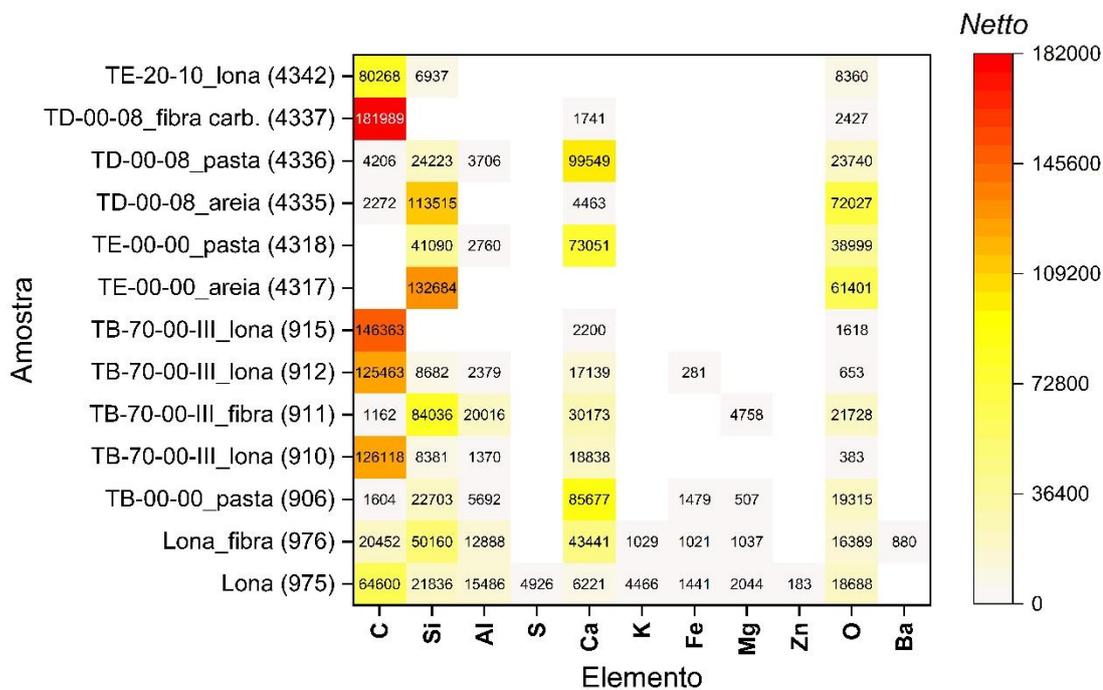
Tabela 45 – Resultado da análise por EDS do ponto 4342 da argamassa do traço TE-20-10-III

Elemento	Ponto 4342	
	Netto	Composição
Silício (Si)	6937	-
Carbono (C)	80268	-
Oxigênio (O)	8360	-

Fonte: Próprio autor.

Para uma melhor comparação entre os pontos analisados por EDS, os resultados são apresentados em forma gráfica na Figura 205, por meio de um mapa de calor.

Figura 205 – Mapa de calor da contagem *Netto* de cada elemento químico e o tipo da amostra



Fonte: Próprio autor.

A partir da Figura 205, verifica-se que o cálcio (na forma óxido de cálcio) e o silício (na forma de dióxido de silício) se fazem presentes em grandes quantidades não só no cimento e na areia, mas como nas partículas e fibra do resíduo de lona de freio.

Quanto ao carbono e ao oxigênio detectados nas amostras, cabe a ressaltar que nas análises por EDS, suas concentrações não devem ser levadas como parâmetro para análises quantitativas, devido as características inerentes a técnica de EDS (Buck, 2017), servindo assim seus resultados somente para uma análise qualitativa. Situação esta que não necessariamente se aplica a fibra de carbono, dado que tal elemento já era esperado em grande quantidade neste material.

5 CONCLUSÕES

A presente pesquisa colaborou com o aperfeiçoamento dos CCAs com propriedades elétricas e piezorresistivas, aplicados ao Monitoramento de Integridade Estrutural. Isto se deu por meio do desenvolvimento de uma argamassa estrutural com resíduo de lona de freio e com baixo teor de adição de fibras de carbono, questões estas de natureza original. A produção deste tipo de CCA com resíduo de lona de freio, pode ser uma forma de se colaborar com o alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU.

Neste sentido, com base nos resultados obtidos é possível concluir que:

1. A substituição da areia por até 40% (no traço 1:2:0,45 da série “C”) de resíduo de lona de freio, não provocou alterações estatisticamente significativas nas resistências mecânicas analisadas, bem como atendeu o limite de resistência mínima à compressão (25 MPa) da norma ABNT NBR 11173 (1990);
2. O traço com fibra de carbono TD-00-10 teve uma redução de resistência à compressão de $\approx 19,90\%$ em relação ao traço de referência, enquanto que o traço com mesmo teor de fibra, porém com 20% de resíduo (TE-20-10-III) teve uma redução de apenas $\approx 5,78\%$. Essa atenuação na perda de resistência à compressão com a incorporação do resíduo, pode ser um indicativo de que as propriedades do resíduo e/ou sua relação com a matriz cimentícia tenham prevalecido sobre as propriedades da fibra com a referida matriz;
3. O aumento da porosidade do CCA com a incorporação do resíduo de lona de freio, bem como a menor massa específica do resíduo, pode ter colaborado para a redução do módulo de elasticidade dinâmico dos CCAs analisados;
4. As lonas de freio selecionadas para uso na presente pesquisa foram caracterizadas como materiais semicondutores (Figura 109). Essa situação se dá pela provável presença de grafite e de outros metais eletricamente condutores na composição das lonas de freio;
5. O CCA com resíduo de lona de freio (e sem fibra de carbono) apresentou aumento estatisticamente significativo da condutividade elétrica em diversas proporções de substituição da areia (especialmente a partir de 40%) pelo

resíduo. Em geral, esses aumentos foram graduais à medida que se acrescentava o resíduo;

6. Em altas frequências (>100 kHz) foi observada menor reatância elétrica no CCA com incorporação de resíduo de lona de freio (e sem adição de fibra de carbono), o que pode ser em razão da tendência de comportamento ôhmico das lonas de freio usadas nesta pesquisa, uma vez que as mesmas podem conter partículas de metais e grafite;
7. O CCA com resíduo de lona de freio apresentou melhor resposta piezorresistiva à compressão do que os traços de referência, especialmente nas substituições a partir de 40% da areia pelo resíduo, o que pode ser explicado pela proximidade com o limiar de percolação da resistividade elétrica;
8. O uso combinado do resíduo de lona de freio com a fibra de carbono não trouxe melhora na condutividade elétrica ou no efeito piezorresistivo nos traços de CCA desenvolvidos nesta pesquisa, o que não exclui a possibilidade de melhores resultados com outros traços;
9. Na maioria dos casos em que a piezorresistividade do CCA foi avaliada quanto ao esforço de tração, em geral os traços com adição de fibra de carbono tiveram melhor resposta, o que pode estar associado ao fato de as mesmas serem capazes de manter caminhos condutivos na matriz cimentícia quando da ocorrência de microfissuração;
10. Em geral, o corpo de prova tipo roseta com o traço TE-40-00-III apresentou melhores resultados piezorresistivos do que traço de referência (TE-00-00);
11. A alta presença de carbono nos resíduos de lona de freio, bem como as fibras do referido resíduo, ambos constatados por meio da microscopia eletrônica de varredura e da espectroscopia de raios X por energia dispersiva, justificam, respectivamente, o aumento de condutividade elétrica e o ganho de resistência à tração na flexão no CCA;
12. Os traços com substituições de 30 e 40% da areia pelo resíduo de lona de freio (e.g.: TA-30-00-II, TB-30-00-III e TC-40-00-III), apresentaram-se como teores adequados para melhores resultados obtidos na combinação das propriedades elétricas e mecânicas, dentre os traços estudados na presente pesquisa;

13. Os diferentes métodos e técnicas de avaliação de propriedades elétricas e piezorresistivas de CCA, bem como a falta de padronização dos mesmos, dificulta a comparação quantitativa dos resultados entre as diversas pesquisas sobre o tema.

A partir das conclusões desta pesquisa é possível afirmar que a utilização do resíduo de lona de freio tem potencial para produção experimental de CCAs com propriedades elétricas e piezorresistivas em escala laboratorial, visando inclusive a redução do consumo de agregados naturais, o que pode representar uma redução de custos e uma solução ambientalmente amigável.

Ademais, o uso do resíduo de lona de freio em compósitos cimentícios em geral necessita de mais pesquisas e análises para que seja verificada de forma integral a sua viabilidade e segurança para uso, especialmente para com o meio ambiente e as pessoas.

Por fim, pesquisas futuras com resíduos de lona de freio em compósitos cimentícios podem ser realizadas de forma mais abrangente junto a outras propriedades físico-mecânicas, reológicas, ambientais e de durabilidade, inclusive mediante a combinação com outros resíduos ou nanomateriais.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABEBE, T. N.; WOO, B-H., KIM, H. G.; RYOU J-S. **Real-time monitoring of self-sensing cementitious composite incorporating hybrid silicon carbide and graphite for enhanced structural health monitoring**. *Cement and Concrete Composites*, v. 146, 105404, 2024. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2023.105404.
- ABEDI, M.; FANGUEIRO, R.; CORREIA, A. G. **Effects of Electrodes Layout and Filler Scale on Percolation Threshold and Piezoresistivity Performances of a Cementitious-Based Geocomposite**. *Nanomaterials*, v. 12, 1734, 2022. DOI: 10.3390/nano12101734.
- ADRESI, M.; HASSANI, A.; TULLIANI, J-M.; LACIDOGNA, G.; ANTONACI, P. **A study of the main factors affecting the performance of self-sensing concrete**. *Advances in Cement Research*, v. 29, p. 216-226, 2017. DOI: 10.1680/jadcr.15.00147.
- AGUEDO, J.; LORENCOVA, L.; BARATH, M.; FARKAS, P.; TKAC, J. **Electrochemical Impedance Spectroscopy on 2D Nanomaterial MXene Modified Interfaces: Application as a Characterization and Transducing Tool**. *Chemosensors*, v. 8, n. 4, 127, 2020. DOI: 10.3390/chemosensors8040127.
- AHMAD, W.; AHMAD, A.; OSTROWSKI, K. A.; ASLAM, F.; JOYKLAD, P. **A scientometric review of waste material utilization in concrete for sustainable construction**. *Case Studies in Construction Materials*, v. 15, e00683, 2021. DOI: 10.1016/j.cscm.2021.e00683.
- 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.
- ALLAM, H.; DUPLAN, F.; CLERC, J-P.; AMZIANE, S.; BURTSCHHELL, Y. **About electrical resistivity variation during drying and improvement of the sensing behavior of carbon fiber-reinforced smart concrete**. *Construction and Building Materials*, v. 264, 120699, 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120699.
- AL-MUFADI, F.; SHERIF, H. A. **Effect of Multiwalled Carbon Nanotubes on Sensing Crack Initiation and Ultimate Strength of Cement Nanocomposites**. *Arab J Sci Eng*, v. 44, p. 1403-1413, 2019. DOI: 10.1007/s13369-018-3546-y.
- AMETA, R.; SOLANKI, M. S.; BENJAMIN, S.; AMETA, S. C. **Photocatalysis**. In: AMETA, S. C.; AMETA, R. *Advanced Oxidation Processes for Waste Water Treatment*. [S.l.]: Academic Press, 2018. p. 135–175. DOI: 10.1016/B978-0-12-810499-6.00006-1.
- ANDOLFATO, R. P.; CAMACHO, J. S.; BRITO, G. A. D. **Extensometria Básica**. Ilha Solteira: UNESP- Núcleo de Ensino e Pesquisa da Alvenaria Estrutural, 2004. 45 p. Disponível em: <https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariacivil/nepae/extensometria-basica.pdf>. Acesso em: 5 jun, 2022.
- 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. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126659.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8522-2: **Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação. Parte 2: Módulo de elasticidade dinâmico pelo método das frequências naturais de vibração**. Rio de Janeiro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 10.004: **Resíduos Sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 11173: **Projeto e execução de argamassa armada - Procedimento**. Rio de Janeiro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 11768-1: **Aditivos químicos para concreto de cimento Portland Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 11768-3: **Aditivos químicos para concreto de cimento Portland Parte 3: Ensaio de caracterização**. Rio de Janeiro, 2019.

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, 2016.

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.

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 14.958-2: **Veículos rodoviários automotores - Material de atrito. Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio para lonas de freio a tambor destinadas ao uso em freios de veículos das categorias M1, M2 e N1**. Rio de Janeiro, 2012.

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.

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.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16697: **Cimento Portland - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16868-2: **Alvenaria estrutural. Parte 2: Execução e controle de obras**. Rio de Janeiro, 2020.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7222: **Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8522-1: **Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação. Parte 1: Módulos estáticos à compressão**. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9204: **Concreto endurecido - Determinação da resistividade elétrico-volumétrica — Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9778: **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9939: **Agregado graúdo - Determinação do teor de umidade total – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2011.

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

ATCP DO BRASIL. **Installation and operation manual**: Sonelastic® Software 6.0. Ribeirão Preto: ATCP Physical Engineering, 2022. 84 p. Disponível em: <https://www.sonelastic.com/images/Manual-Software-Sonelastic-6.0-EN.pdf>. Acesso em: 31 jan. 2024.

AZHARI, Faezeh. **Cement-Based Sensors for Structural Health Monitoring**. 2008. Dissertação (Mestrado) – Faculty of Graduate Studies, The University of British Columbia, Vancouver, 2008. DOI: 10.14288/1.0063120.

BAEZA, F. J.; GALAO, O.; VEGAS, I. J.; CANO, M.; GARCÉS, P. **Influence of recycled slag aggregates on the conductivity and strain sensing capacity of carbon fiber reinforced cement mortars**. *Construction and Building Materials*, n. 184, p. 311-319, 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.218.

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.

BAI, T.; SONG, Z.; WANG, H.; WU, Y.; HUANG, W. **Performance evaluation of metakaolin geopolymer modified by different solid wastes**. *Journal of Cleaner Production*, v. 226, p. 114-121, 2019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.04.093.

BALAM, A.; PECH-PISTÉ, R.; VALDEZ-NAVA, Z.; GAMBOA, F.; CASTILLO-ATOCHÉ, A.; AVILÉS, F. A. **Comparative Study of the Electrical and Electromechanical Responses of Carbon Nanotube/Polypropylene Composites in Alternating and Direct Current**. *Sensors*, v. 22, n. 2, 484, 2022. DOI: 10.3390/s22020484.

BASTO, C.; PELÀ, L.; CHACÓN, R. **Open-source digital technologies for low-cost monitoring of historical constructions**. *Journal of Cultural Heritage*, v. 25, p. 31-40, 2017. DOI: 10.1016/j.culher.2016.12.003.

BAVAFA-TOOSI, Y. **Nyquist plot**. In: BAVAFA-TOOSI, Y. *Introduction to Linear Control Systems*. [S.l.]: Academic Press, 2019. p. 533–640. DOI: 10.1016/b978-0-12-812748-3.00006-9.

BEKZHANOVA, Z.; MEMON, S. A.; KIM, J. R. **Self-Sensing Cementitious Composites: Review and Perspective**. *Nanomaterials*, v. 11, n. 9, 2355, 2021. DOI: 10.3390/nano11092355.

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.

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.

BIRGIN, H. B.; D'ALESSANDRO, A.; LAFLAMME, S.; UBERTINI, F. **Hybrid Carbon Microfibers-Graphite Fillers for Piezoresistive Cementitious Composites**. *Sensors*, v. 21, 518, 2021. DOI: 10.3390/s21020518.

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.

BOHORQUEZ, Jose Luis Ramirez. **Sistema de sensoriamento de estresse mecânico em circuitos integrados de silício e dispositivo microeletrônicos empacotados**. 2019. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2019. DOI: 10.47749/T/UNICAMP.2019.1127083.

BORGES, J. F. M.; GABRIEL, M. C.; SALEM R. E. P. **Resistores não ôhmicos à base de água**. *Cad. Brás. Ens. Fís.*, v. 23, n. 2, p. 267-276, 2006. <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/6280>

BRASIL. **Instrução Normativa IBAMA n. 13, de 18 de dezembro de 2012. Lista Brasileira de Resíduos Sólidos**. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 245, p. 200-207, 20 dez. 2012. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/IBAMA/IN0013-181212.PDF>. Acesso em: 19 jan. 2022.

BRASIL. **Lei Federal n. 12.305, de 2 de Agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília, DF: Presidência da República. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm Acesso em: 19 jan. 2022.

BRASIL. **Portaria Inmetro n. 17, de 10 de janeiro de 2014. Regulamento Técnico da Qualidade para Materiais de Atrito Destinados ao Uso em Freios de Veículos Rodoviários Automotores**. [S.l.]: Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, 2014. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002068.pdf>. Acesso em: 19 jan. 2022.

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.

BUCK, E. C. **Electron Microscopy Characterization of Suspended Solids from Hanford Tank 241-AP-105 Direct Feed Waste**. Richland: Pacific Northwest National Laboratory, p. 31, 2017. DOI: 10.2172/1598866.

CAN-ORTIZ, A.; ABOT, J.L.; AVILÉS F. **Electrical characterization of carbon-based fibers and their application for sensing relaxation-induced piezoresistivity in polymer composites**. *Carbon*, v. 145, p. 119-130, 2019. DOI: 10.1016/j.carbon.2018.12.108.

CARASEK, H. **Argamassas**. In: ISAIA, G. C. (ed.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2010, v. 2, p. 892-944.

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.

CARÍSIO, P. de A.; CARVALHO, C. P. C.; COCCHIARALE, M. de O.; FERREIRA, L. H. T.; MENDOZA REALES, O. A.; FAIRBAIRN, E. de M. R.; TOLEDO FILHO, R. D. **Influence of Humidity, Moisture and Temperature on the Electric Properties of Self-Sensing Cement Pastes for Post-Abandonment Well Monitoring**. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, 2019, Rio de Janeiro. OTC-29894-MS. DOI: 10.4043/29894-MS.

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.

CAULK, W. B. **The Sword Walker**. New York: Scientific American, v. LXXVI, n. 7, 1897. p. 107. Disponível em: <https://archive.org/details/scientific-american-1897-02-13>. Acesso em: 22 jun. 2022.

ÇELİK, 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.

CECCHI, A.; SAB, K. **A comparison between a 3D discrete model and two homogenised plate models for periodic elastic brickwork**. International Journal of Solids and Structures, v. 41, p. 2259-2276, 2024. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2003.12.020.

CHEN, P-W.; CHUNG, D. D. L. **Carbon fiber reinforced concrete for smart structures capable of non-destructive flaw detection**. Smart Materials and Structures, v. 2, n. 1, p. 22-30, 1993. DOI: 10.1088/0964-1726/2/1/004.

CHINAGLIA, D. L.; GOZZI, G.; ALFARO, R. A. M.; HESSEL, R. **Espectroscopia de impedância no laboratório de ensino**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 30, n. 4, 4504, 2008. DOI: 10.1590/s1806-11172008000400013.

CHOLKER, A. K.; TANTRAY, M. A. **Micro carbon fiber based concrete as a strain-damage sensing material**. Materials Today: Proceedings, v. 19, p. 152-157, 2019. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.06.629.

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.; 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.

CHUNG, D.D.L. **A critical review of piezoresistivity and its application in electrical-resistance-based strain sensing**. J Mater Sci, v. 55, p. 15367-15396, 2020. DOI: 10.1007/s10853-020-05099-z.

CHUNG, D.D.L. **Electrical conduction behavior of cement-matrix composites**. J. of Materi Eng and Perform, v. 11, p. 194-204, 2002. DOI: 10.1361/105994902770344268.

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.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Qualidade das águas interiores no estado de São Paulo (2020). Apendice C – Significado ambiental e sanitário das variáveis de qualidade das águas e dos sedimentos metodologias analíticas e de amostragem**. São Paulo: CETESB, 2021. 68 p. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/publicacoes-e-relatorios/> Acesso em: 13 de jul. de 2022.

COSOLI, G.; MOBILI, A.; BLASI, E.; TITTARELLI, F.; MARTARELLI, M.; REVEL, G. M.; **Development and metrological characterization of cement-based elements with self-sensing capabilities for structural health monitoring purposes**. Acta IMEKO, v. 12, p. 1-12, 2023. DOI: 10.21014/actaimeko.v12i2.1420.

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.

CROVADOR, A. **Eletricidade e eletrônica básica**. Curitiba: Contentus, 2020. p. 42 -46

CRUZ, A. M.; JAVIER, P. **Self-Compacted Concrete with Self-Protection and Self-Sensing Functionality for Energy Infrastructures**. *Materials*, v. 13, 1106, 2020. DOI: 10.3390/ma13051106.

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.

DANTE, R. C. **Types of friction material formulas**. *In: DANTE, R. C. Handbook of Friction Materials and their Applications*. [S.l.]: Woodhead Publishing, 2016, p. 29-54. DOI: 10.1016/B978-0-08-100619-1.00003-1.

DAS, A. K.; MISHRA, D.K.; YU, J.; LEUNG, C. K. Y. **Smart Self-Healing and Self-Sensing Cementitious Composites**. *Recent Developments, Challenges, and Prospects Advances in Civil Engineering Materials*, v. 8, n. 3, p. 554-578, 2019. DOI: 10.1520/ACEM20190023.

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.

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.

DEHGHANPOUR, H.; YILMAZ, K. **Investigation of specimen size, geometry and temperature effects on resistivity of electrically conductive concretes**. *Construction and Building Materials*, v. 250, 118864, 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118864.

DEL MORAL, B.; BAEZA, F. J.; NAVARRO, R.; GALAO, O.; ZORNOZA, E.; VERA, J.; FARCAS, C.; GARCÉS, P. **Temperature and humidity influence on the strain sensing performance of hybrid carbon nanotubes and graphite cement composites**. *Construction and Building Materials*, v. 284, 122786, 2021. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122786.

DEMIRCILIOĞLU, E.; TEOMETE, E.; OZBULUT, O. E. **Characterization of smart brass fiber reinforced concrete under various loading conditions**. *Construction and Building Materials*, v. 265, 120411, 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120411.

DEMIRCILIOĞLU, E.; TEOMETE, E.; OZBULUT, O. E.; KAHRAMAN, S. **Cross tension and compression loading and large-scale testing of strain and damage sensing smart concrete**. *Construction and Building Materials*, v. 316, 125784, 2022. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125784.

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.

DIMOPOULOS EGGENSCHWILER, P.; SCHREIBER, D.; PAPETTI, V.; GRAMSTAT, S.; LUGOVYY, D. **Electron Microscopic Characterization of the Brake Assembly Components (Disc and Pads) from Passenger Vehicles**. *Atmosphere*, v. 13, 523, 2022. DOI: 10.3390/atmos13040523.

DIMOU, A. E.; ASIMAKOPOULOS, G.; KARATASIOS, I.; GOURNIS, D.; METAXA, Z. S.; KOURKOULIS, S. K.; ALEXOPOULOS, N. D. **Self-diagnostic lime-pozzolan-cement restoration nanocomposites: Effect of graphene modification and cyclic loading level**

under compression. *Developments in the Built Environment*, v. 10, 100068, 2022. DOI: 10.1016/j.dibe.2022.100068.

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, W.; LI, W.; WANG, K.; VESSALAS, K.; ZHANG, S. **Mechanical strength and self-sensing capacity of smart cementitious composite containing conductive rubber crumbs.** *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v. 31, n. 10, p. 1325-1340, 2020a. DOI: 10.1177/1045389X20916788.

DONG, W.; LI, W.; ZHU, X.; SHENG, D.; SHAH, S. P. **Multifunctional cementitious composites with integrated self-sensing and hydrophobic capacities toward smart structural health monitoring.** *Cement and Concrete Composites*, v. 118, 103962, 2021a. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.103962.

DONG, S.; LI, L.; ASHOUR, A.; DONG, X.; HAN, B. **Self-assembled 0D/2D nano carbon materials engineered smart and multifunctional cement-based composites.** *Construction and Building Materials*, v. 272, 121632, 2021b. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121632.

DONG, W.; GUO, Y.; SUN, Z.; TAO, Z.; LI, W. **Development of piezoresistive cement-based sensor using recycled waste glass cullets coated with carbon nanotubes.** *Journal of Cleaner Production*, v. 314, 127968, 2021c. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127968.

DONG, W.; LI, W.; GUO, Y.; QU, F.; WANG, K.; SHENG, D. **Piezoresistive performance of hydrophobic cement-based sensors under moisture and chloride-rich environments.** *Cement and Concrete Composites*, v. 126, 104379, 2022. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104379.

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.

DONG, W.; LI, W.; WANG, K.; SHAH, S. P. **Physicochemical and Piezoresistive properties of smart cementitious composites with graphene nanoplates and graphite plates.** *Construction and Building Materials*, v. 286, 122943, 2021d. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122943.

DONG, W.; LI, W.; WANG, K.; LUO, Z.; SHENG, D. **Self-sensing capabilities of cement-based sensor with layer-distributed conductive rubber fibres.** *Sensors and Actuators A: Physical*, v. 301, 111763, 2020b. DOI: 10.1016/j.sna.2019.111763.

DONG, W.; XIE, L.; PAN, P. **A comparative study on early-stage strength development and mechanical properties of cement emulsified asphalt mixture using brake pad waste.** *Construction and Building Materials*, v. 184, p. 515-523, 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.07.013.

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.

DOWNEY, A.; D'ALESSANDRO, A.; BAQUERA, M.; GARCÍA-MACÍAS, E.; ROLFES, D.; UBERTINI, F.; LAFLAMME, S.; CASTRO-TRIGUERO, R. **Damage detection, localization and quantification in conductive smart concrete structures using a resistor mesh**

model. Engineering Structures, v. 148, p. 924-935, 2017a. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.07.022.

DOWNEY, A.; D'ALESSANDRO, A.; UBERTINI, F.; LAFLAMME, S.; GEIGER, R. **Biphasic DC measurement approach for enhanced measurement stability and multi-channel sampling of self-sensing multi-functional structural materials doped with carbon-based additives.** Smart Materials and Structures, v. 26, n. 6, 065008, 2017b. DOI: 10.1088/1361-665x/aa6b66.

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.

DUROLINE IND. COM. **Tabelas de Formulações.** [S.l.]: Duroline Ind. e Com. De Materiais de Fricção Ltda., [20--?]. Disponível em: <http://www.duroline.com.br/Downloads/Br/J14664%20-%20Duroline%20-%20Formulacoes%20Portugues.pdf>. Acesso em: 04 jul. 2022.

DURU, A.; ILERI, K. **Implementation of a Mobile Application for Teaching and Analyzing RLC Circuits.** In: INTERNATIONAL CONGRESS ON HUMAN-COMPUTER INTERACTION, OPTIMIZATION AND ROBOTIC APPLICATIONS, 3., Ankara, 2021. p. 1-4. DOI: 10.1109/hora52670.2021.9461384.

ERDEM, S.; HANBAY, S.; BLANKSON, M. A. **Self-sensing damage assessment and image-based surface crack quantification of carbon nanofibre reinforced concrete.** Construction and Building Materials, v. 134, p. 520-529, 2017. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.197.

FANECA, G.; SEGURA, I.; TORRENTS, J. M.; AGUADO, A. **Development of conductive cementitious materials using recycled carbon fibres.** Cement and Concrete Composites, v. 92, p. 135-144, 2018. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2018.06.009.

FERDIANSYAH, T.; TURATSINZE, A.; BALAYSSAC, J-P. **Design and characterization of self-sensing steel fiber reinforced concrete.** MATEC Web Conf., v. 199, 11008, 2018. DOI: 10.1051/mateconf/201819911008.

FERDIANSYAH, T.; BALAYSSAC, J.P.; TURATSINZE, A. **An Experimental Approach for Characterisation of Concrete Damage Using the Wheatstone Bridge Circuit.** Int J Civ Eng, v. 20, p. 75-89, 2022. DOI: 10.1007/s40999-021-00659-z.

FİLAZİ, A.; YILMAZEL, R.; PUL, M. **Investigation of Electrical Conductivity in Cement Mortars with Waste Iron Chips.** International Journal of Engineering Research and Development, v. 15, n. 3, p. 82-91, 2023. DOI: 10.29137/umagd.1252097.

FRAÇ, M.; PICHÓR, W. **Piezoresistive properties of cement composites with expanded graphite.** Composites Communications, v. 19, p. 99-102, 2020. DOI: 10.1016/j.coco.2020.03.005.

FRAÇ, M.; SZUDEK, W.; SZOŁDRA, P.; PICHÓR, W. **The applicability of shungite as an electrically conductive additive in cement composites.** Journal of Building Engineering, v. 45, 103469, 2022. DOI: 10.1016/j.job.2021.103469.

FRANCESCHINI, Joel. **Avaliação do fenômeno de Stick-Slip em materiais de fricção com utilização de um tribômetro.** 2014. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014. URL: <http://hdl.handle.net/10183/96294>.

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.

- CONFIENGO, G. G. di; FAGA, M. G. **Ecological Transition in the Field of Brake Pad Manufacturing: An Overview of the Potential Green Constituents**. Sustainability v. 14, 2508, 2022. DOI: 10.3390/su14052508.
- GAWEL, K.; SZEWCZYK, D.; CERASI, P. R. **Self-Sensing Well Cement**. Materials v. 14, 1235, 2021. DOI: 10.3390/ma14051235.
- GERASIMENKO, T.; NIKULIN S.; ZAKHAROVA, G.; POLOZNIKOV, A.; PETROV, V.; BARANOVA, A.; TONEVITSKY, A. **Impedance Spectroscopy as a Tool for Monitoring Performance in 3D Models of Epithelial Tissues**. Front Bioeng Biotechnol, v. 7, 474, 2020. DOI: 10.3389/fbioe.2019.00474.
- GIECHASKIEL, B.; GRIGORATOS, T.; DILARA, P.; KARAGEORGIU, T.; NTZIACHRISTOS, L.; SAMARAS, Z. **Light-Duty Vehicle Brake Emission Factors**. Atmosphere, v. 15, n. 1, 97, 2024. DOI: 10.3390/atmos15010097.
- GILARDI, R.; SAROCCHI, D.; BOUNOUS, L. **Copper-Free NAO Brake Pad Formulation with Improved Electrostatic Paintability Based on Conductive Carbon Powders**. SAE Technical Paper 2016-01-1916, 2016. DOI: 10.4271/2016-01-1916.
- GUEYE, M. N.; CARELLA, A.; FAURE-VINCENT, J.; DEMADRILLE, R.; SIMONATO, J-P. **Progress in understanding structure and transport properties of PEDOT-based materials: A critical review**. Progress in Materials Science, v. 108, 100616, 2020. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2019.100616.
- GUO, L.; WU, J.; WANG, H. **Mechanical and perceptual characterization of ultra-high-performance cement-based composites with silane-treated graphene nano-platelets**. Construction and Building Materials, v. 240, 117926, 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117926.
- HABIB, A.; YILDIRIM, U.; EREN, O. **Mechanical and dynamic properties of high strength concrete with well graded coarse and fine tire rubber**. Construction and Building Materials, v. 246, 118502, 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118502.
- 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.; DING, S.; YU, X. **Intrinsic self-sensing concrete and structures: A review**. Measurement, v. 59, p. 110-128, 2015. DOI: 10.1016/j.measurement.2014.09.048.
- HAN, B.; YU, X.; OU, J. **Compositions of Self-Sensing Concrete**. In: HAN, B.; YU, X.; OU, J. Self-Sensing Concrete in Smart Structures. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2014. p. 13–43. DOI: 10.1016/B978-0-12-800517-0.00002-2.
- 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.
- HEERING, P.; KECK, J.; ROHLFS, G. A. **Laboratory Notes, Laboratory Experiences, and Conceptual Analysis: Understanding the Making of Ohm's First Law in Electricity**. Berichte zur Wissenschaftsgeschichte, v. 43, n. 1, p. 7-27, 2020. DOI: 10.1002/bewi.201900019.
- HE, R.; MA, H.; HAFIZ, R. B.; FU, C.; JIN X.; HE, J. **Determining porosity and pore network connectivity of cement-based materials by a modified non-contact electrical resistivity measurement: Experiment and theory**. Materials & Design, v. 156, p. 82-92, 2018. DOI: 10.1016/j.matdes.2018.06.045.
- HONG, W.; LV, K.; JIANG, Y.; YANG, C.; WU, Z.; HU, X.; QU, Q. **Self-sensing and quantitative assessment of prestressed concrete structures based on distributed long-**

gauge fiber Bragg grating sensors. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v. 29, n. 9, p. 1974-1985, 2018. DOI: 10.1177/1045389X18754355.

HOU, T-C.; LYNCH, J. P. **Conductivity-based strain monitoring and damage characterization of fiber reinforced cementitious structural components.** *In: SMART STRUCTURES AND MATERIALS 2005: SENSORS AND SMART STRUCTURES TECHNOLOGIES FOR CIVIL, MECHANICAL, AND AEROSPACE SYSTEMS*, 2005, San Diego, Proceedings [...], v. 5765. p. 419-429. DOI: 10.1117/12.599955.

HUANG, Y.; LI, H.; QIAN, S. **Self-sensing properties of Engineered Cementitious Composites.** *Construction and Building Materials*, v. 174, p. 253-262, 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.129.

HUO, L.; CHENG, H.; KONG, Q.; CHEN, X. **Bond-Slip Monitoring of Concrete Structures Using Smart Sensors—A Review.** *Sensors*, v. 19, n. 5, 1231, 2019. DOI: 10.3390/s19051231.

HU, X.; WANG, N.; PAN, P.; BAI, T. **Performance evaluation of asphalt mixture using brake pad waste as mineral filler.** *Construction and Building Materials*, v. 138, p. 410-417, 2017. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.02.031.

HU, X.; ZHANG, H.; BAI, T.; PAN, P.; XU, P.; WALUBITA, L. F. **Effects of using brake pad waste powder as a filler material on the rheological and mechanical properties of a sulfur modified asphalt mixture.** *Construction and Building Materials*, v. 198, p. 742-750, 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.007.

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.

JADHAV, S. P.; SAWANT, S. H. **A review paper: Development of novel friction material for vehicle brake pad application to minimize environmental and health issues.** *Materials Today: Proceedings*, v. 19, p. 209-212, 2019. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.06.703.

JAEGER, R. C.; RAMANI, R.; SUHLING, J. C.; KANG, Y. **CMOS stress sensor circuits using piezoresistive field-effect transistors (PIFETs).** *In: SYMPOSIUM ON VLSI CIRCUITS*, 1955, Kyoto. Digest of Technical Papers. p. 43-44. DOI: 10.1109/VLSIC.1995.520680.

JANG A-Y.; LIM S-H.; KIM D-H.; YUN H-D.; LEE G-C.; SEO S-Y.; **Strain-Detecting properties of hybrid PE and steel fibers reinforced cement composite (Hy-FRCC) with Multi-Walled carbon nanotube (MWCNT) under repeated compression.** *Results in Physics*, v. 18, 103199, 2020. DOI: 10.1016/j.rinp.2020.103199.

JUNG, M.; PARK, J.; HONG, S-G.; MOON, J. **Electrically cured ultra-high performance concrete (UHPC) embedded with carbon nanotubes for field casting and crack sensing.** *Materials & Design*, v. 196, 109127, 2020. DOI: 10.1016/j.matdes.2020.109127.

KADHIM, A.; AL-DAHAWI, A. M.; BANYHUSSAN, Q. S. **Mechanical and Piezoresistive Properties of Fibre Reinforced Concrete Pavement.** *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 1067, n. 1, 012031, 2021. DOI: 10.1088/1757-899x/1067/1/012031.

KANG, M.; KANG, M-C.; YONIS, A.; VASHISTHA, P.; PYO, S. **Effect of steel slag on the mechanical properties and self-sensing capability of ultra-high performance concrete (UHPC).** *Developments in the Built Environment*, v. 17, 100342, 2024. DOI: 10.1016/j.dibe.2024.100342.

KEIL, S. **Technology and Practical Use of Strain Gages With Particular Consideration of Stress Analysis Using Strain Gages.** [S.I.]: Wilhelm Ernst & Sohn. Berlin, 2017. DOI: 10.1002/9783433606667.

- KEKEZ, S.; KUBICA, J. **Connecting concrete technology and machine learning: proposal for application of ANNs and CNT/concrete composites in structural health monitoring.** RSC Adv., v. 10, p. 23038–23048, 2020. DOI: 10.1039/D0RA03450A.
- KIM, J.; SURYANTO, B.; MCCARTER, W. J. **Conduction, relaxation and complex impedance studies on Portland cement mortars during freezing and thawing.** Cold Regions Science and Technology, v. 166, 102819, 2019. DOI: 10.1016/j.coldregions.2019.102819.
- KIM, M. K.; PARK, J.; KIM, D. J. **Characterizing the electro-mechanical response of self-sensing steel-fiber-reinforced cementitious composites.** Construction and Building Materials, v. 240, 117954, 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117954.
- KIM, T. U.; LE, H. V.; PARK, J. W.; EOCK, S. K.; JANG, Y.; KIM, D. J. **Development of a smart concrete block with an eccentric load sensing capacity.** Construction and Building Materials, v. 306, 124881, 2021. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124881.
- KONKANOV, M.; SALEM, T.; JIAO, P.; NIYAZBEKOVA, R.; LAJNEF, N. **Environment-Friendly, Self-Sensing Concrete Blended with Byproduct Wastes.** Sensors, v. 20, n. 7, 1925, 2020. DOI: 10.3390/s20071925.
- KOO, G. M.; TALLMAN, T. N. **Frequency-dependent alternating current piezoresistive switching behavior in self-sensing carbon nanofiber composites.** Carbon, v. 173, p. 384–394, 2021. DOI: 10.1016/j.carbon.2020.11.018.
- 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.
- LAVAGNA, L.; MUSSO, S.; FERRO, G.; PAVESE, M. **Cement-based composites containing functionalized carbon fibers.** Cement and Concrete Composites, v. 88, p. 165–171, 2018. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2018.02.007.
- LE, H. V.; KIM, D. J. **Detecting crack and damage location in self-sensing fiber reinforced cementitious composites.** Construction and Building Materials, v. 240, 117973, 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117973.
- LE, T.-H.; KIM, Y.; YOON, H. **Electrical and Electrochemical Properties of Conducting Polymers.** Polymers, v. 9, n. 4, 150, 2017. DOI: 10.3390/polym9040150.
- LEE, S. H.; KIM, S.; YOO, D.-Y. **Hybrid effects of steel fiber and carbon nanotube on self-sensing capability of ultra-high-performance concrete.** Construction and Building Materials, v. 185, p. 530–544, 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.07.071.
- LEE, S. Y.; LE, H. V.; KIM, D. J. **Self-stress sensing smart concrete containing fine steel slag aggregates and steel fibers under high compressive stress.** Construction and Building Materials, v. 220, p. 149–160, 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.05.197.
- LIAN, J.; WANG, Y.; FU, T.; EASA, S. M.; ZHOU, Y.; LI, H. **Mechanical, Electrical, and Tensile Self-Sensing Properties of Ultra-High-Performance Concrete Enhanced with Sugarcane Bagasse Ash.** Materials, v. 17, n. 1, 82, 2024. DOI: 10.3390/ma17010082.
- LI, Y.; HU, X.; ZHAO, Y.; ZHU, G.; WANG, N.; PAN, P.; PENG, C.; SUN, Y. **Performance evaluation of asphalt mixture using brake pad waste as aggregate.** Case Studies in Construction Materials, v. 17, e01639, 2022. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e01639.
- LINDECK, St. **On the Conductivity of Cement and Concrete.** The Electrician, v. XXXVI, p. 788–790, 1896.
- LIU, H.; LIU, K.; LAN, Z.; ZHANG, D. **Mechanical and Electrical Characteristics of Graphite Tailing Concrete.** Advances in Materials Science and Engineering, v. 2018, 9297628, 2018. DOI: 10.1155/2018/9297628.

- LIU, L.; XU, J.; YIN, T.; WANG, Y.; CHU, H. **Improved conductivity and piezoresistive properties of Ni-CNTs cement-based composites under magnetic field**. *Cement and Concrete Composites*, v. 121, 104089, 2021. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104089.
- LIU, L.; XU, J.; YIN, T.; WANG, Y.; CHU, H. **Improving electrical and piezoresistive properties of cement-based composites by combined addition of nano carbon black and nickel nanofiber**. *Journal of Building Engineering*, v. 51, 104312, 2022. DOI: 10.1016/j.jobe.2022.104312.
- LIU, X.; NIE, Z.; WU, S.; WANG, C. **Self-monitoring application of conductive asphalt concrete under indirect tensile deformation**. *Case Studies in Construction Materials*, v. 3, p. 70-77, 2015. DOI: 10.1016/j.cscm.2015.07.002.
- LUO, T.; WANG, Q. **Effects of Graphite on Electrically Conductive Cementitious Composite Properties: A Review**. *Materials*, v. 14, 4798, 2021. DOI: 10.3390/ma14174798
- LUO, T.; WANG, Q.; FANG, Z. **Effect of graphite on the self-sensing properties of cement and alkali-activated fly ash/slag based composite cementitious materials**. *Journal of Building Engineering*, v. 77, 107493, 2023. DOI: 10.1016/j.jobe.2023.107493.
- LYU, Y.; MA, J.; ÅSTRÖM, A. H.; WAHLSTRÖM, J.; OLOFSSON, U. **Recycling of worn out brake pads – impact on tribology and environment**. *Sci Rep*, v. 10, 8369, 2020. DOI: 10.1038/s41598-020-65265-w.
- MADBOULY, A. I.; MOKHTAR, M. M.; MORSY, M. S. **Evaluating the performance of rGO/cement composites for SHM applications**. *Construction and Building Materials*, v. 250, 118841, 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118841.
- MAIER, M. **The effect of moisture and reinforcement on the Self-sensing properties of hybrid-fiber-reinforced concrete**. *Engineering Research Express*, v. 2, n. 2, 025026, 2020. DOI: 10.1088/2631-8695/ab90c7.
- MAKUL, N. **Advanced smart concrete - A review of current progress, benefits and challenges**. *Journal of Cleaner Production*, v. 274, 122899, 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122899
- MALUF, O.; ANGELONI, M.; GUALBERTO, A. R.; SPINELLI, D.; BOSE FILHO, W. W. **Discos de freio automotivos: Aspectos históricos e tecnológicos**. *Anuário da Produção Acadêmica Docente*, v. 1, n. 1, p. 143-153, 2007. <https://repositorio.pgsskroton.com//handle/123456789/1301>.
- MC-BAUCHEMIE BRASIL. **Ficha Técnica aditivo MC-TechniFlow 520**. Edição 08/2022. 2022. 2 p. Disponível em https://www.mc-bauchemie.com.br/assets/downloads/products/pt-BR/fichas_tecnicas/MC-TechniFlow%20520.pdf. Acesso em: 13 de jul. de 2022.
- MEENA, R. V.; JAIN, J. K.; CHOUHAN, H. S.; BENIWAL, A. S. **Use of waste ceramics to produce sustainable concrete: A review**. *Cleaner Materials*, v. 4, 100085, 2022. DOI: 10.1016/j.clema.2022.100085.
- MEONI, A.; D'ALESSANDRO, A.; CAVALAGLI, N.; GIOFFRÉ, M.; UBERTINI, F. **Shaking table tests on a masonry building monitored using smart bricks: Damage detection and localization**. *Earthquake Engng Struct Dyn*, v. 48, p. 910-928, 2019. DOI: 10.1002/eqe.3166.
- MITCHELL, B. S. **Appendix 8: Electrical Conductivity of Selected Materials**. *In: MITCHELL, B. S. An Introduction to Materials Engineering and Science: For Chemical and Materials Engineers*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2003, p. 893–899. DOI: 10.1002/0471473359.app8.
- 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.

MOBILI, A.; COSOLI, G.; BELLEZZE, T.; REVEL, G. M.; TITTARELLI, F. **Use of gasification char and recycled carbon fibres for sustainable and durable low-resistivity cement-based composites.** *Journal of Building Engineering*, v. 50, 104237, 2022. DOI: 10.1016/j.jobe.2022.104237.

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.

MONTEIRO, A. O.; LOREDO, A.; COSTA, P. M. F. J.; OESER, M.; CACHIM, P. B. **A pressure-sensitive carbon black cement composite for traffic monitoring.** *Construction and Building Materials*, v. 154, p. 1079-1086, 2017. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.053.

MULANI, S. M.; KUMAR, A.; SHAIKH, H. N. E. A.; SAURABH, A.; SINGH, P. K.; VERMA, P. C. **A review on recent development and challenges in automotive brake pad-disc system.** *Materials Today: Proceedings*, v. 56, p. 447-454, 2022. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.01.410.

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.

MUTO, N.; YANAGIDA, H.; NAKATSUJI, T.; SUGITA, M.; OHTSUKA, Y.; ARAI, Y. **Design of intelligent materials with self-diagnosing function for preventing fatal fracture.** *Smart Materials and Structures*, v. 1, n. 4, p. 324-329, 1992. DOI: 10.1088/0964-1726/1/4/007.

NALON, G. H.; RIBEIRO, J. C. L.; PEDROTI, L. G.; ARAUJO, E. N. D. DE; FERREIRA, A. A.; OLIVEIRA, J. A.; ALVARENGA, R. DE C. S. S.; FERREIRA, F. A. **Efeito da incorporação de nanopartículas de carbon black (negro de fumo) na resistividade elétrica de argamassas.** *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS*, 23., 2018, Foz do Iguaçu. p. 3471-3482.

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.

NALON, G. H.; RIBEIRO, J. C. L.; DE ARAÚJO, E. N. D.; PEDROTI, L. G.; DE CARVALHO, J. M. F.; SANTOS, R. F.; APARECIDO-FERREIRA, A. **Effects of different kinds of carbon black nanoparticles on the piezoresistive and mechanical properties of cement-based composites.** *Journal of Building Engineering*, v. 32, 101724, 2020. DOI: 10.1016/j.jobe.2020.101724.

NALON, G. H.; SANTOS, R. F.; DE LIMA, G. E. S.; ANDRADE, I. K. R.; PEDROTI, L. G.; RIBEIRO, J. C. L.; FRANCO DE CARVALHO, J. M. **Recycling waste materials to produce self-sensing concretes for smart and sustainable structures: A review.** *Construction and Building Materials*, v. 325, 126658, 2022. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126658.

NASIER, S. **Utilization of recycled form of concrete, E-wastes, glass, quarry rock dust and waste marble powder as reliable construction materials.** *Materials Today: Proceedings*, v. 45, p. 3231-3234, 2021. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.12.381.

NEWLANDS, M. D.; JONES, M. R.; KANDASAMI, S.; HARRISON, T. A. **Sensitivity of electrode contact solutions and contact pressure in assessing electrical resistivity of concrete.** *Mater Struct*, v. 41, p. 621-632, 2007. DOI: 10.1617/s11527-007-9257-6.

NNAMCHI P. S.; OBAYI, C. S. **Electrochemical Characterization of Nanomaterials. Characterization of Nanomaterials.** *In: BHAGYARAJ, S. M.; OLUWAFEMI, O. S.; KALARIKKAL, N.; THOMAS, S. Micro and Nano Technologies, Characterization of*

Nanomaterials. [S.l.]: Woodhead Publishing, 2018. p. 103-127. DOI: 10.1016/B978-0-08-101973-3.00004-3.

NORAMBUENA-CONTRERAS, J.; QUILODRAN, J.; GONZALEZ-TORRE, I.; CHAVEZ, M.; BORINAGA-TREVIÑO, R. **Electrical and thermal characterisation of cement-based mortars containing recycled metallic waste**. *Journal of Cleaner Production*, v. 190, p. 737-751, 2018. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.04.176.

Organização das Nações Unidas (ONU). **Sobre o nosso trabalho para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil**. [2020]. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 09 fev. 2024.

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.

PAPANIKOLAOU, I.; LITINA, C.; ZOMORODIAN, A.; AL-TABBAA, A. **Effect of Natural Graphite Fineness on the Performance and Electrical Conductivity of Cement Paste Mixes for Self-Sensing Structures**. *Materials*, v. 13, 5833, 2020. DOI: 10.3390/ma13245833.

PARK, W-T. **Piezoresistivity**. In: BHUSHAN, B. *Encyclopedia of Nanotechnology*. 2. ed. Dordrecht: Springer, 2016. p. 3246–3252. DOI: 10.1007/978-94-017-9780-1_222.

PARVANEH, V.; KHIABANI, S. H. **Mechanical and piezoresistive properties of self-sensing smart concretes reinforced by carbon nanotubes**. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, v. 26, p. 993-1000, 2018. DOI: 10.1080/15376494.2018.1432789.

PEI, Y.; LI S.; AGOSTINI, F.; SKOCZYLAS, F. **Effects of severe heating and rehydration on poro-mechanical properties of a mortar**. *Cement and Concrete Research*, v. 115, p. 460-471, 2019. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.09.020.

PEREIRA, Emanuel Duarte. **Betão Multifuncional para Gestão de Infraestruturas**. 2018. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, [S.l.], 2018. URI: <https://ria.ua.pt/handle/10773/25378>.

PERSSON, B. N. T. **History of Tribology**. In: MANG T. *Encyclopedia of Lubricants and Lubrication*. Heidelberg: Springer, 2014. p. 791–797. DOI: 10.1007/978-3-642-22647-2_80.

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.

QI, F.; PENG, J.; LIANG, Z.; GUO, J.; YIN, J.; SONG, A.; LI, Z.; LIU, J.; FANG, T.; ZHANG, J.; WU, L.; ZHANG, Q.; WANG, T.; DU, Z.; MAO, H. **Transforming waste brake pads from automobiles into Nano-Catalyst: Synergistic Fe-C-Cu triple sites for efficient fenton-like oxidation of organic pollutants**. *Waste Management*, v. 175, p. 225-234, 2024. DOI: 10.1016/j.wasman.2023.12.039.

QIU, L.; DONG, S.; YU, X.; HAN, B. **Self-sensing ultra-high performance concrete for in-situ monitoring**. *Sensors and Actuators A: Physical*, v. 331, 113049, 2021. DOI: 10.1016/j.sna.2021.113049.

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.

RAMIREZ, J. L.; FRUETT F. **PWM Output CMOS Stress Sensor based in PiezoFET Current Mirrors**. *Journal of Integrated Circuits and Systems*, v. 14, n. 2, 2019. DOI: 10.29292/jics.v14i2.75.

- RAO, R. K.; SASMAL, S. **Smart nano-engineered cementitious composite sensors for vibration-based health monitoring of large structures**. *Sensors and Actuators A: Physical*, v. 311, 112088, 2020. DOI: 10.1016/j.sna.2020.112088.
- REDDY, P. N.; KAVYATEJA, B. V.; JINDAL, B. B. **Structural health monitoring methods, dispersion of fibers, micro and macro structural properties, sensing, and mechanical properties of self-sensing concrete - A review**. *Structural Concrete*, v. 22, p. 793-805, 2021. DOI: 10.1002/suco.202000337.
- ROVNANÍK, P.; KUSÁK, I.; BAYER, P.; SCHMID, P.; FIALA, L. **Electrical and Self-Sensing Properties of Alkali-Activated Slag Composite with Graphite Filler**. *Materials*, v. 12, 1616, 2019. DOI: 10.3390/ma12101616.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- SHAHZAD, S.; TOUMI, A.; BALAYSSAC, J.-P.; TURATSINZE, A. **Design of smart cementitious composites based on multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) using probe ultrasonicator for dispersion**. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCRETE REPAIR, REHABILITATION AND RETROFITTING*, 6., 2022, Cape Town. v. 364, 05012. DOI: 10.1051/mateconf/202236405012.
- SHANG, X.; YU, K.; ZUO, X.; YANG, H. **Low wear braking material with high friction coefficient**. *Tribology International*, v. 173, 107608, 2022. DOI: 10.1016/j.triboint.2022.107608.
- SHINDE, D.; MISTRY, K. N.; JHAVAR, S.; PATHAK, S. **A Review on Non-Asbestos Friction Materials: Material Composition and Manufacturing**. *Advanced Materials Research*, v. 1150, p. 22-42, 2018. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.1150.22.
- SILVA, J. B. L. P. E.; LINTZ, R. C. C.; GACHET, L. A. **The Utilization of Pearson's Method to Analyze Piezoresistive Effect in Self-Sensing Cement Composite with Graphite**. *Materials Research*, v. 25, n. 2, e20220051, 2022. DOI: 10.1590/1980-5373-MR-2022-0051.
- SILVA, J. B. L. P. E.; LINTZ, R. C. C.; GACHET, L. A. **Use of the Arduino Platform for the Piezoresistivity Analysis in Self-Sensing Cement Composites**. *Materials Research*, v. 26, n. 1, e20220520, 2023. DOI: 10.1590/1980-5373-mr-2022-0520.
- SOFI, A.; REGITA, J. J.; RANE, B.; LAU, H. H. **Structural health monitoring using wireless smart sensor network – An overview**. *Mech Syst Signal Process*, v. 163, 108113, 2022. DOI: 10.1016/j.ymsp.2021.108113.
- SOLAZZO, M.; O'BRIEN, F. J.; NICOLOSI, V.; MONAGHAN, M. G. **The rationale and emergence of electroconductive biomaterial scaffolds in cardiac tissue engineering**. *APL Bioengineering*, v. 3, n. 4, 041501, 2019. DOI: 10.1063/1.5116579.
- SONG, F.; CHEN, Q.; JIANG, Z.; ZHU, X.; LI, B.; HE, B.; ZHU, H. **Piezoresistive properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete incorporating few-layer graphene**.

Construction and Building Materials, v. 305, 124362, 2021. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124362.

SRIDHAR, R.; PRASAD, R. **Vibration Based Damaged Detection of Steel Fiber Reinforced concrete**. Materials Today: Proceedings, v. 18, p. 3321-3329, 2019. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.253.

SUCHORZEWSKI, J.; PRIETO, M.; MUELLER, U. **An experimental study of self-sensing concrete enhanced with multi-wall carbon nanotubes in wedge splitting test and DIC**. Construction and Building Materials, v. 262, 120871, 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120871.

SUNDARKRISHNAA, K. L. **Friction Material Composites: Copper-/Metal-Free Material Design Perspective**. 2. ed. [S.l.]: Springer Series in Materials Science, 2015. DOI 10.1007/978-3-319-14069-8.

TANG, S. W.; CAI, X. H.; HE, Z.; ZHOU, W.; SHAO, H. Y.; LI, Z. J.; WU, T.; CHEN, E. **The review of early hydration of cement-based materials by electrical methods**. Construction and Building Materials, v. 146, p. 15-29, 2017. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.073.

TAO, J.; WANG, J.; ZENG, Q. **A comparative study on the influences of CNT and GNP on the piezoresistivity of cement composites**. Materials Letters, v. 259, 126858, 2020. DOI: 10.1016/j.matlet.2019.126858.

TAO, J.; WANG, X.; WANG, Z.; ZENG, Q. **Graphene nanoplatelets as an effective additive to tune the microstructures and piezoresistive properties of cement-based composites**. Construction and Building Materials, v. 209, p. 665-678, 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.173.

TEXIGLASS INDÚSTRIA E COMÉRCIO TÊXTIL (TEXIGLASS). **Fibras de Reforços: fibra de carbono**. [S.l.]: TEXIGLASS, 2015. Disponível em: <https://texiglass.com.br/fibras-de-reforco/>. Acesso em: 15 out. 2022.

THIMMAIAH, S. R.; SIDDARAMAIAH. **Effect of brake pad waste powder incorporation on the performance of styrene-butadiene rubber vulcanizates**. Journal of Polymer Engineering, v. 33, n. 3, p. 247-255, 2013. DOI: 10.1515/polyeng-2012-0133.

TIAN, Y.; LU, D.; ZHOU, J.; YANG, Y.; WANG, Z. **Damping Property of Cement Mortar Incorporating Damping Aggregate**. Materials, v. 13, n. 3, 792, 2020. DOI: 10.3390/ma13030792.

TIAN, Z.; LI, Y.; LI, S.; VUTE, S.; JI, J. **Influence of particle morphology and concentration on the piezoresistivity of cement-based sensors with magneto-aligned nickel fillers**. Measurement, v. 187, 110194, 2022. DOI: 10.1016/j.measurement.2021.110194.

TIAN, Z.; LI, Y.; ZHENG, J.; WANG, S. **A state-of-the-art on self-sensing concrete: Materials, fabrication and properties**. Composites Part B: Engineering, v. 177, 107437, 2019. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107437.

TMD FRICTION DO BRASIL. **Folheto Técnico COBREQ - NABK142**. [20--?]. Disponível em: <http://cobreq.com.br/fotos/arquivos/artes/tecnicos/g/NABK%20142-VERSAO%20DIGITAL.pdf>. Acesso em: 04 jul. 2022.

UBERTINI, F.; D'ALESSANDRO, A.; DOWNEY, A.; GARCÍA-MACÍAS, E.; LAFLAMME, S.; CASTRO-TRIGUERO, R. **Recent Advances on SHM of Reinforced Concrete and Masonry Structures Enabled by Self-Sensing Structural Materials**. Proceedings, v. 2, n. 3, 119, 2018. DOI: 10.3390/ecsa-4-04889.

VENKATESH, S.; MURUGAPOOPATHIRAJA, K. **Scoping Review of Brake Friction Material for Automotive**. Materials Today: Proceedings, v. 16, n. 2, p. 927-933, 2019. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.05.178.

- WANG, C.; HUANG, D.; PENG, X.; FU, X.; GUOWEN, S.; GUO, N. **The Effect of Friction Reclaimed Materials of Train Waste Brake-shoe (FRMWBS) on Carbonization Resistance and Anti-chloride Corrosion of Rubber Concrete.** *In: INTERNATIONAL RILEM CONFERENCE ON MICROSTRUCTURE RELATED DURABILITY OF CEMENTITIOUS COMPOSITES*, 3., 2016b, Nanjing. Proceedings [...]. p. 382-390. https://www.rilem.net/publication/publication/486?id_papier=11212#
- WANG, C.; HUANG, D.; FU, H.; WU, H.; QIN, G.; SUN, G.; GUO, N. **Effect of friction reclaimed materials of waste brake-shoe on basic performance of mortar.** *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, v. 32, n. 3, p. 603-610, 2017. DOI: 10.1007/s11595-017-1641-7.
- WANG, H.; SHI, F.; SHEN, J.; ZHANG, A.; ZHANG, L.; HUANG, H.; LIU, J.; JIN, K.; FENG, L.; TANG, Z. **Research on the self-sensing and mechanical properties of aligned stainless steel fiber-reinforced reactive powder concrete.** *Cement and Concrete Composites*, v. 119, 104001, 2021b. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104001.
- 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, L.; ASLANI, F. **Development of self-sensing cementitious composites incorporating CNF and hybrid CNF/CF.** *Construction and Building Materials*, v. 273, 121659, 2021b. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121659.
- WANG, L.; ASLANI, F. **Piezoresistivity performance of cementitious composites containing activated carbon powder, nano zinc oxide and carbon fibre.** *Construction and Building Materials*, v. 278, 122375, 2021c. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122375.
- WANG, L.; ASLANI, F. **Self-sensing performance of cementitious composites with functional fillers at macro, micro and nano scales.** *Construction and Building Materials*, v. 314, 125679, 2022. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125679.
- WANG L.; ASLANI, F. **Structural performance of reinforced concrete beams with 3D printed cement-based sensor embedded and self-sensing cementitious composites.** *Engineering Structures*, v. 275, 115266, 2023. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.115266.
- WANG, M.; LI, N.; WANG, G.-D.; LU, S. W.; ZHAO, Q. D.; LIU, X. L. **High-sensitive flexural sensors for health monitoring of composite materials using embedded carbon nanotube (CNT) buckypaper.** *Composite Structures*, v. 261, 113280, 2021a. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.113280.
- WANG, M.; LUO, Y.; WANG, T.; WAN, C.; PAN, L.; PAN, S.; HE, K.; NEO, A.; CHEN, X.; **Artificial Skin Perception.** *Adv. Mater.*, v. 33, 2003014, 2020. DOI: 10.1002/adma.202003014.
- WANG, X.; LI, Z.; HAN, B.; HAN, B.; YU, X.; ZENG, S.; OU, J. **Intelligent Concrete with Self-x Capabilities for Smart Cities.** *Journal of Smart Cities*, v. 2, n. 2, p. 1-39, 2016a. DOI: 10.26789/JSC.2016.02.005.
- WANG, X.; CAO, B.; VLACHAKIS, C.; AL-TABBAA, A.; HAIGH, S. K. **Characterization and piezo-resistivity studies on graphite-enabled self-sensing cementitious composites with high stress and strain sensitivity.** *Cement and Concrete Composites*, v. 142, 105187, 2023. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2023.105187.
- WARDANI, D. A. P.; HARIYANTO, B.; KURNIAWATI, N.; HAR, N. P.; DARMAWAN, N.; IRZAMAN. **Synthesis of Silicon Dioxide (SiO₂) from Reeds Biomass (Imperata**

cylindrica) and The Analysis of Electrical Properties (Study Cases: Impedance, Resistance, Capacitive Reactance, Inductive Reactance). In: NATIONAL PHYSICS SEMINAR, 10., 2021, Jakarta. 012064. DOI: 10.1088/1742-6596/2019/1/012064.

WEN, S.; CHUNG, D. D. L. **Electrical-resistance-based damage self-sensing in carbon fiber reinforced cement.** Carbon, v. 45, n. 4, p. 710-716, 2007. DOI: 10.1016/j.carbon.2006.11.029.

WHITTINGTON H. W.; MCCARTER, J.; FORDE, M. C. **The conduction of electricity through concrete.** Magazine of Concrete Research, v. 33, n. 114, p. 48-60, 1981. DOI: 10.1680/mac.1981.33.114.48.

XI, X.; CHUNG, D. D. L. **Deviceless cement-based structures as energy sources that enable structural self-powering.** Applied Energy, v. 280, 115916, 2020. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.115916.

XIN, X.; QIU, Z.; LUAN, X.; DING, X.; LIANG, M.; YAO, Z.; LI, Y. **Novel Conductive Polymer Composites for Asphalt Pavement Structure in Situ Strain Monitoring: Influence of CB/CNT and GNP/CNT Nano/Micro Hybrid Fillers on Strain Sensing Behavior.** IEEE Sensors Journal, v. 22, n. 5, p. 3945-3956, 2022. DOI: 10.1109/JSEN.2022.3140934.

XI, X.; OZTURK, M.; CHUNG, D. D. L. **DC electric polarization of cured cement paste being unexpectedly hindered by free water.** J Am Ceram Soc., v. 105, p. 1074-1082, 2022. DOI: 10.1111/jace.18121.

XU, J.; YIN, T.; WANG, Y.; LIU, L. **Anisotropic electrical and piezoresistive sensing properties of cement-based sensors with aligned carbon fibers.** Cement and Concrete Composites, v. 116, 103873, 2021. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103873.

XU, Z.; LI, H.; YAZDI, M.; OUYANG, K.; PENG, W. **Aging Characteristics and State-of-Health Estimation of Retired Batteries: An Electrochemical Impedance Spectroscopy Perspective.** Electronics, v. 11, 3863, 2022. DOI: 10.3390/electronics11233863.

YENDHE, V.; LANDGE, N.; MANOJ, T. **A Study on Development of Fly Ash Based Automotive Brake Lining.** International Journal of Modern Trends in Engineering and Research, v. 2, n. 6, p. 59-68, 2015.

YOO, D-Y.; KIM, S.; LEE, S. H. **Self-sensing capability of ultra-high-performance concrete containing steel fibers and carbon nanotubes under tension.** Sensors and Actuators A: Physical, v. 276, p. 125-136, 2018. DOI: 10.1016/j.sna.2018.04.009.

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.

YOU, I.; YOO, D-Y.; KIM, S.; KIM, M-J.; ZI, G. **Electrical and Self-Sensing Properties of Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete with Carbon Nanotubes.** Sensors, v. 17, 2481, 2017. DOI: 10.3390/s1711248.

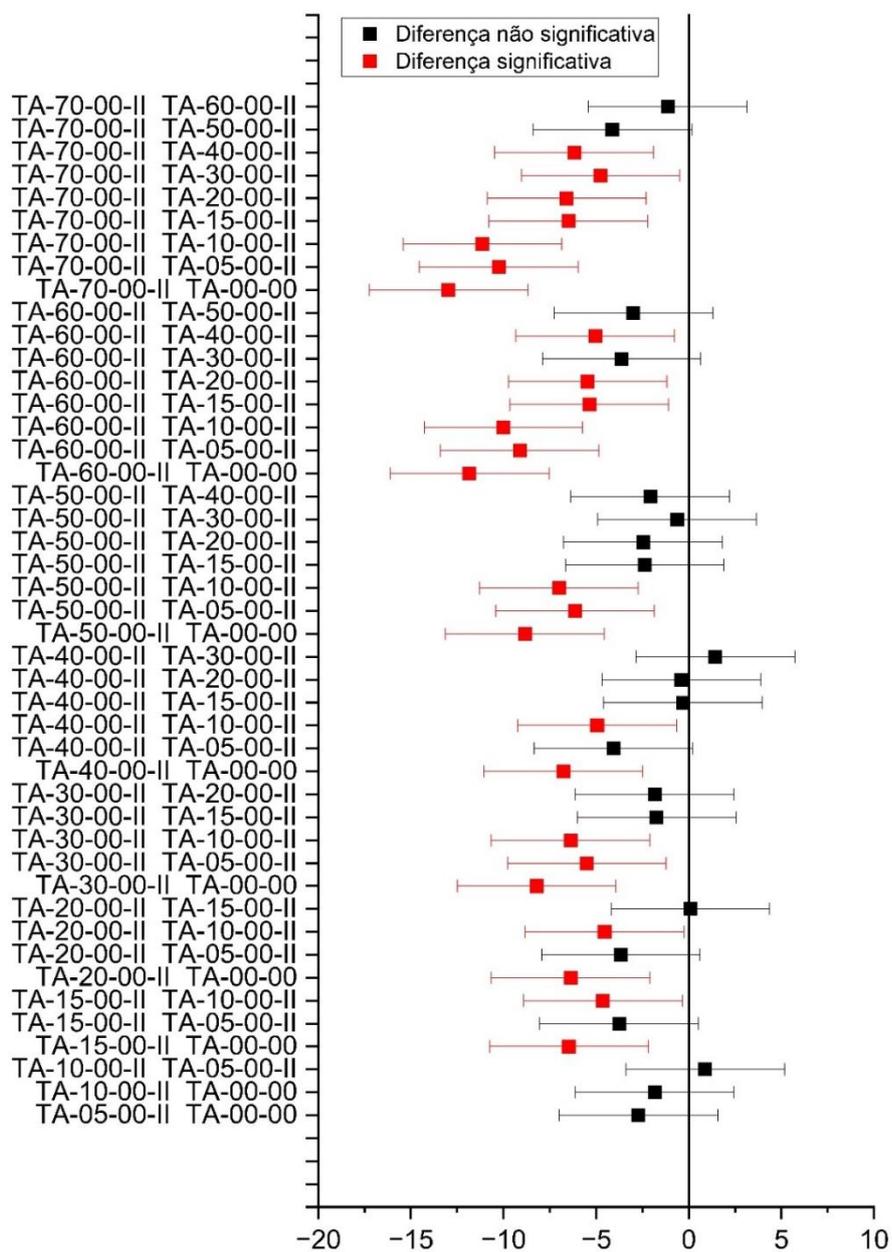
ZHANG, X.; WANG, J.; YANG, S.; FENG, H. **The growth of in-situ CNTs on slag to enhance electromagnetic interference shielding effectiveness of cement-based composite.** Construction and Building Materials, v. 411, 134643, 2024. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134643.

ZHUO, Ying. **Investigation of Nanostructured Lithium-Ion Battery Materials.** 2021. Tese (Doutorado) – Friedrich-Alexander-Universitaet Erlangen-Nuernberg, 2021. 28467682. URI: <https://open.fau.de/handle/openfau/15486>.

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.

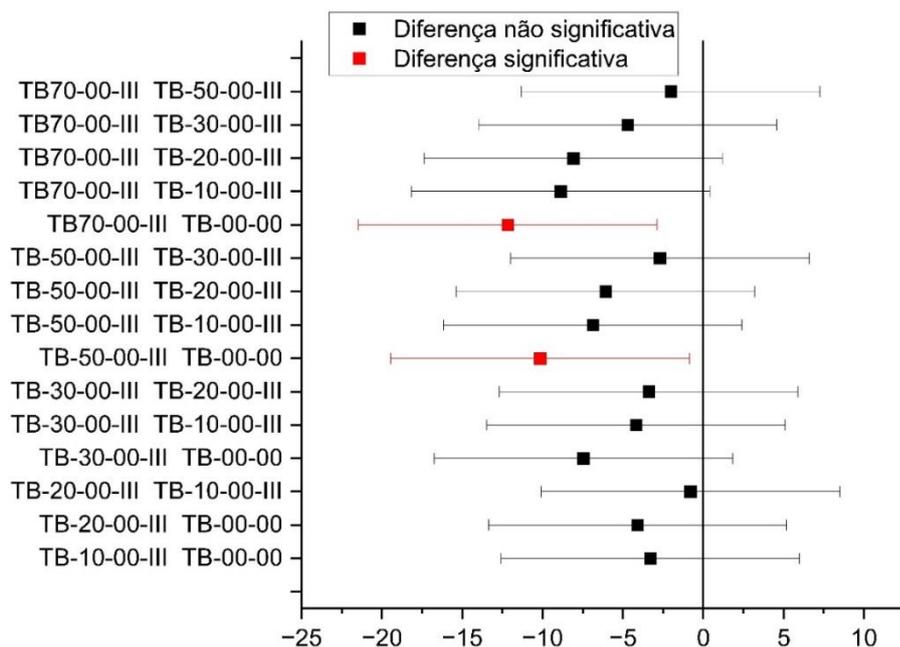
APÊNDICE A

Figura A1 – Teste de comparações múltiplas (*Tukey*) de resistência à compressão da série “A”



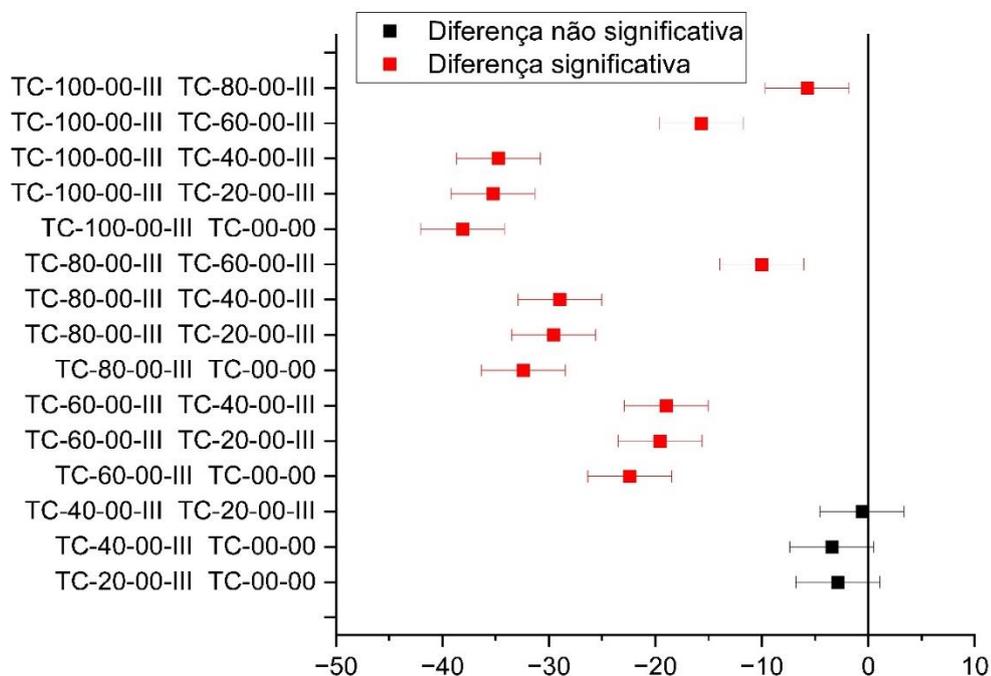
Fonte: Próprio autor.

Figura A2 – Teste de comparações múltiplas (*Tukey*) de resistência à compressão da série “B”



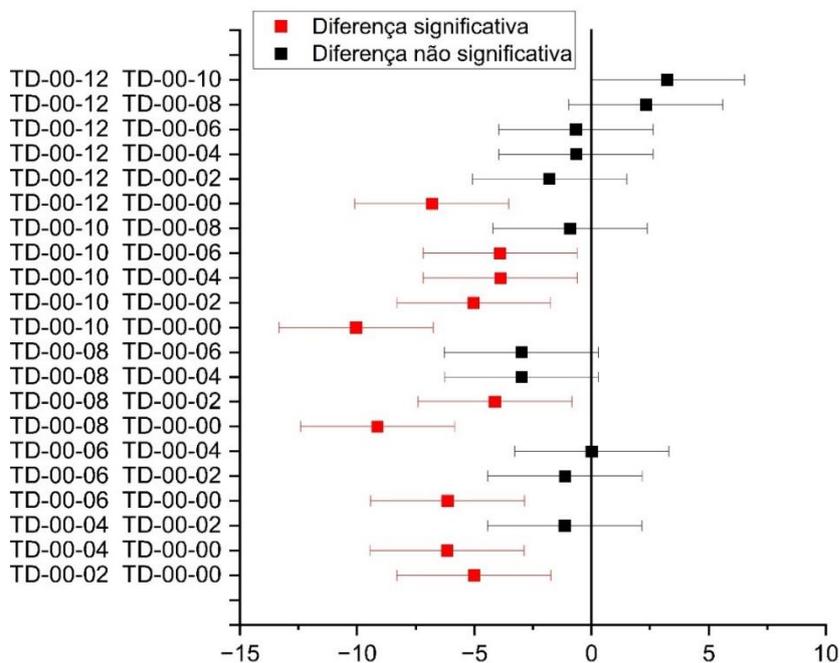
Fonte: Próprio autor.

Figura A3 – Teste de comparações múltiplas (*Tukey*) de resistência à compressão da série “C”



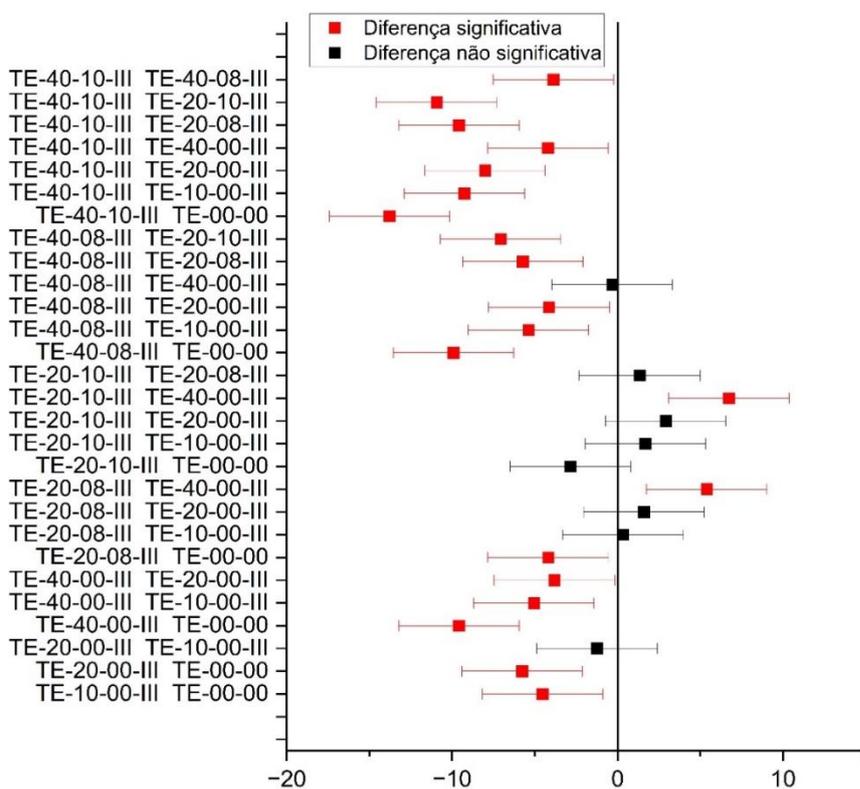
Fonte: Próprio autor.

Figura A4 – Teste de comparações múltiplas (*Tukey*) de resistência à compressão da série “D”



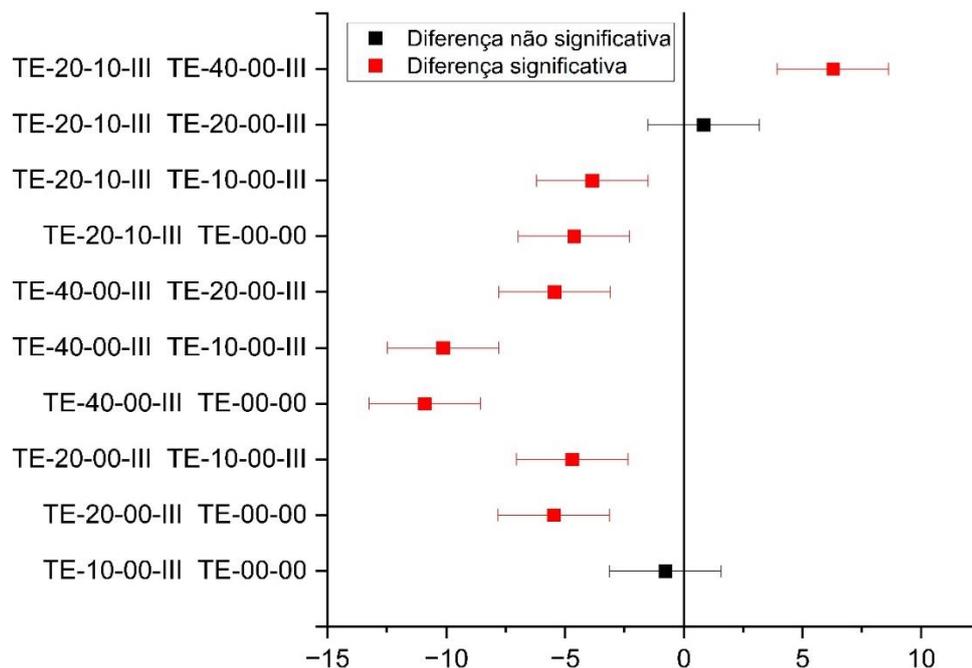
Fonte: Próprio autor.

Figura A5 – Teste de comparações múltiplas (*Tukey*) de resistência à compressão da série “E”



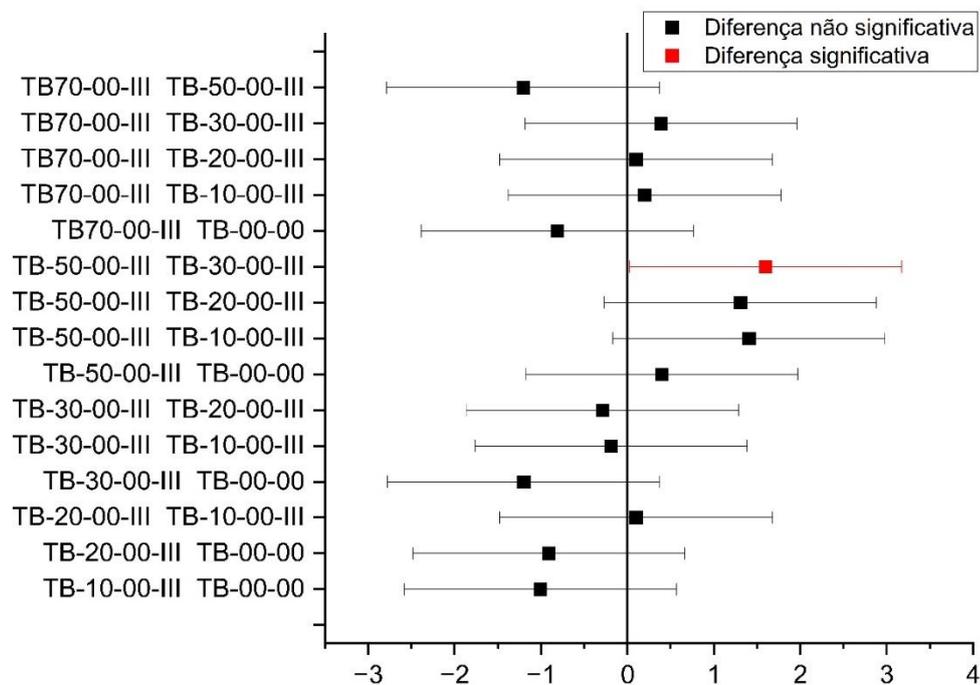
Fonte: Próprio autor.

Figura A6 – Teste de comparações múltiplas (*Tukey*) de resistência à compressão da série “E” aos 7 dias



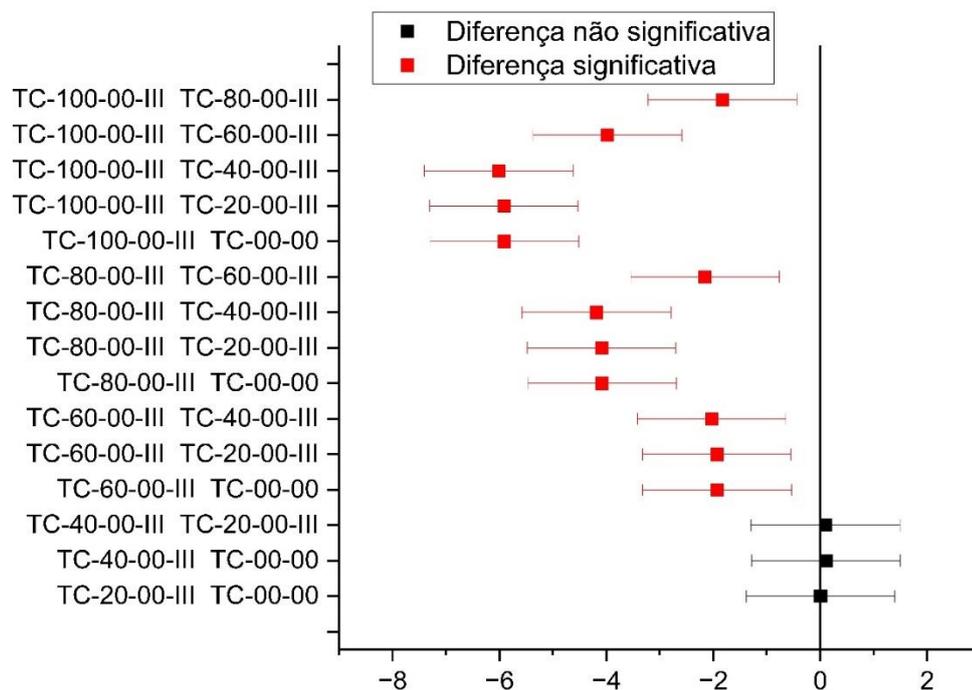
Fonte: Próprio autor.

Figura A7 – Teste de comparações múltiplas (*Tukey*) de resistência à tração na flexão da série “B”



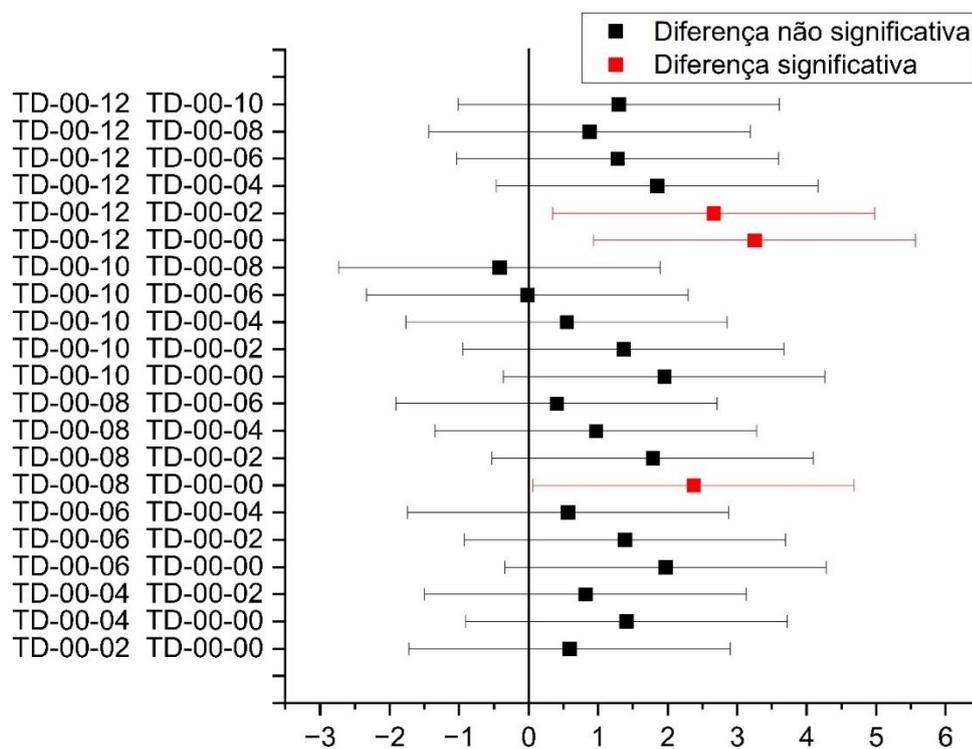
Fonte: Próprio autor.

Figura A8 – Teste de comparações múltiplas (*Tukey*) de resistência à tração na flexão da série “C”



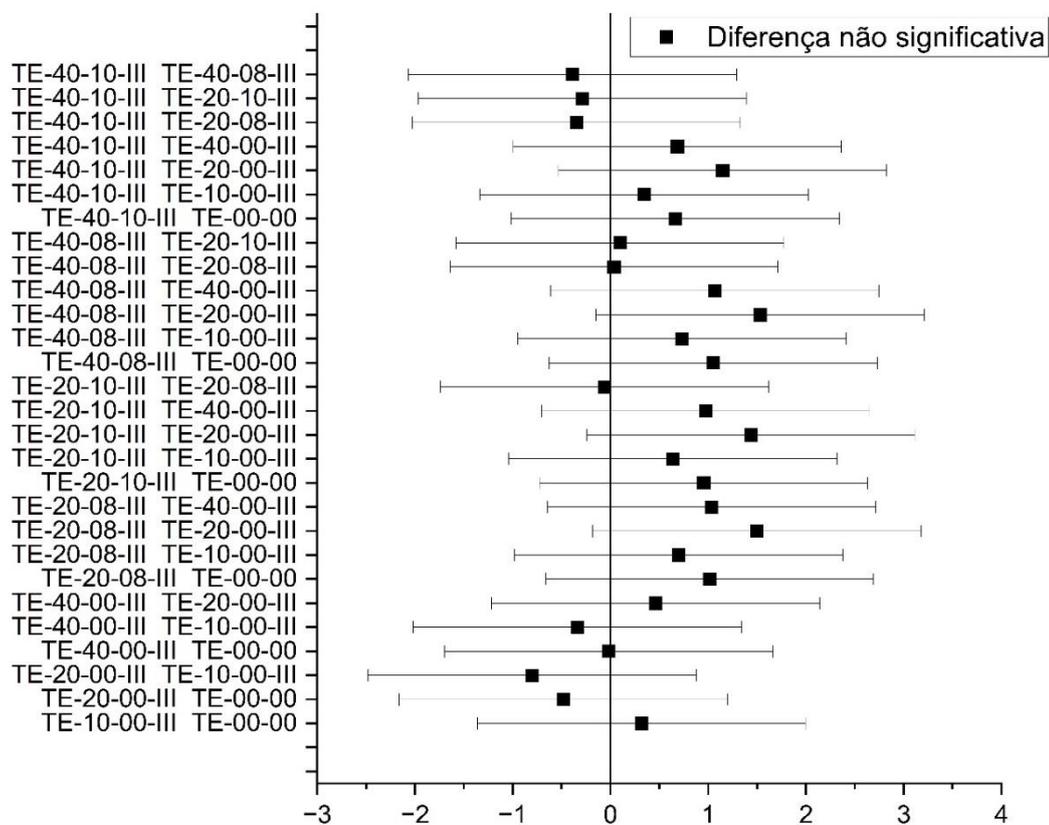
Fonte: Próprio autor.

Figura A9 – Teste de comparações múltiplas (*Tukey*) de resistência à tração na flexão da série “D”



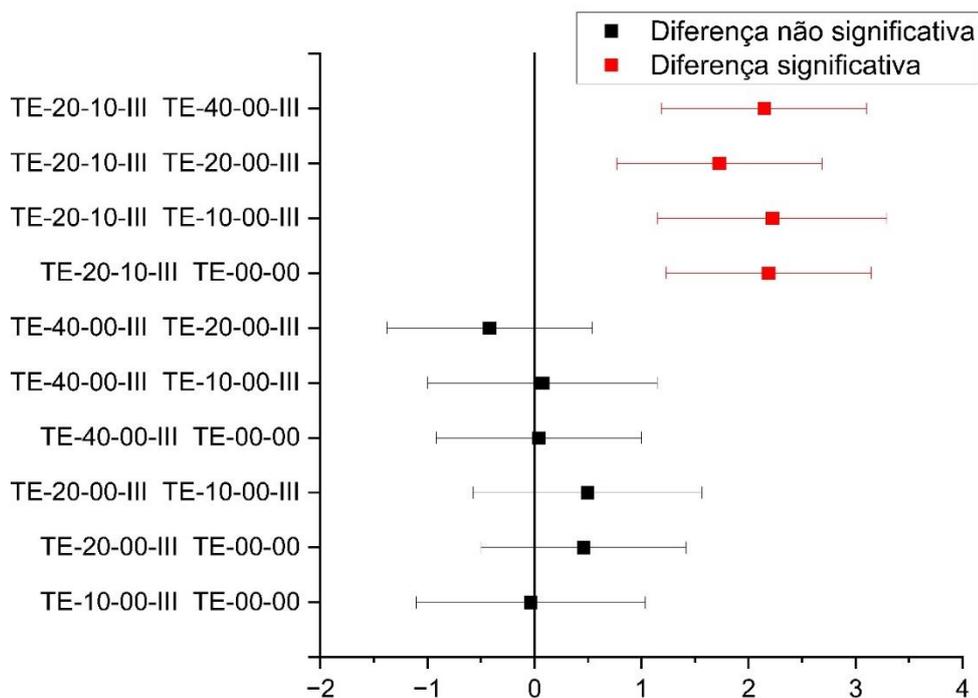
Fonte: Próprio autor.

Figura A10 – Teste de comparações múltiplas (*Tukey*) de resistência à tração na flexão da série “E”



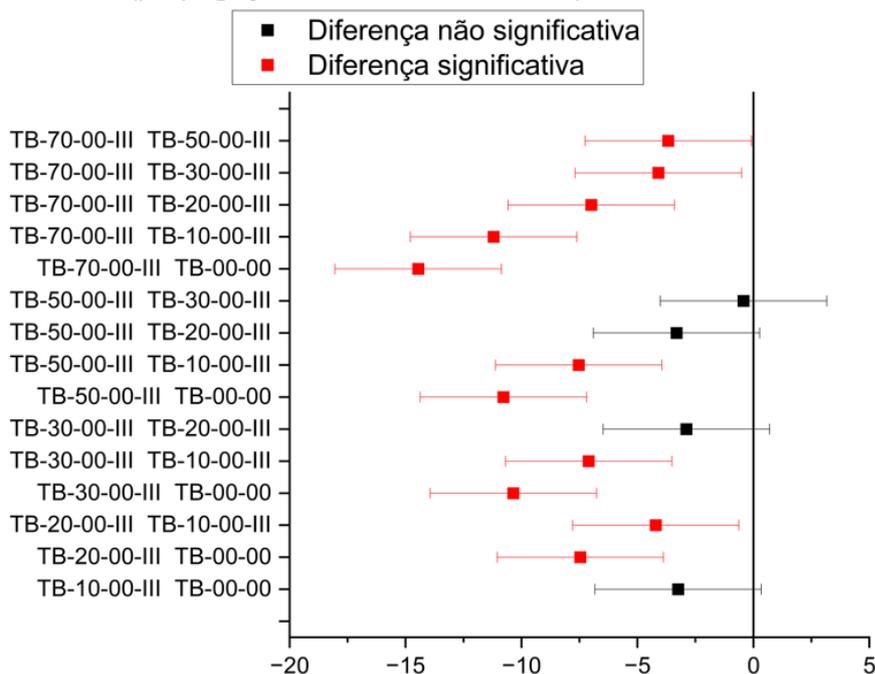
Fonte: Próprio autor.

Figura A11 – Teste de comparações múltiplas (*Tukey*) de resistência à tração na flexão da série “E” aos 7 dias



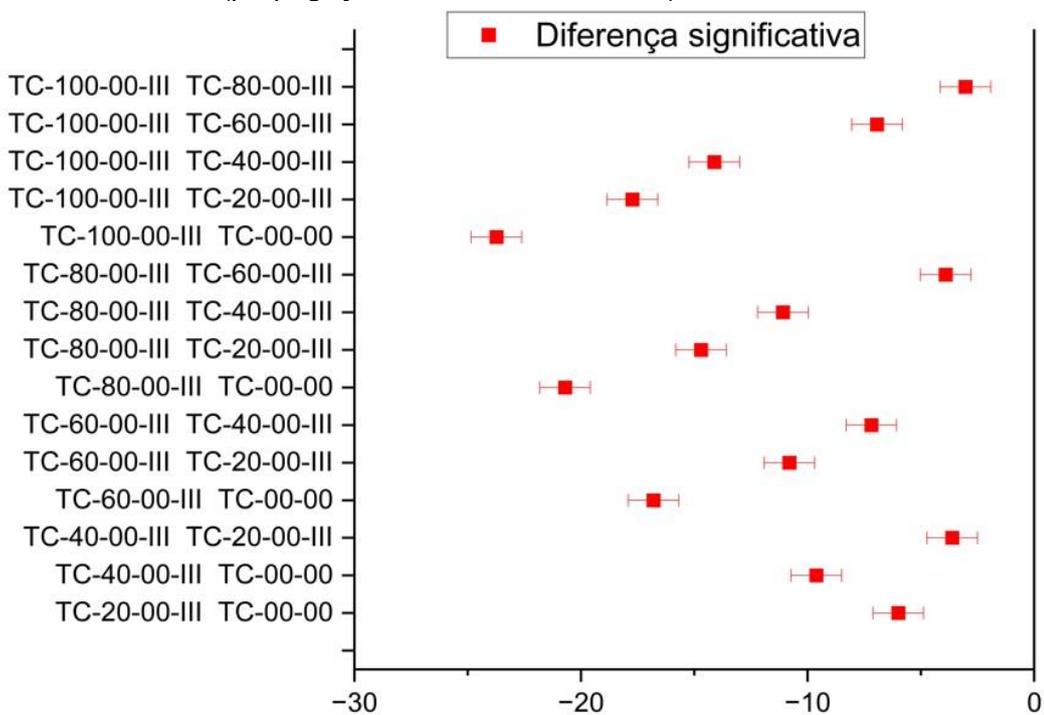
Fonte: Próprio autor.

Figura A12 – Teste de comparações múltiplas (*Tukey*) de módulo de elasticidade (propagação de onda ultrassônica) da série “B”



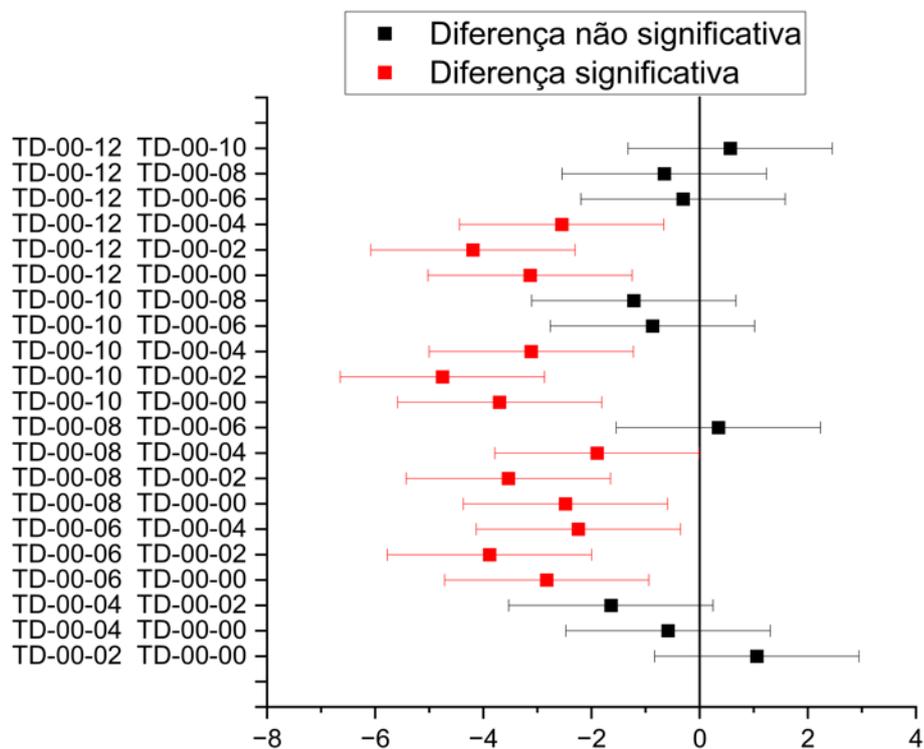
Fonte: Próprio autor.

Figura A13 – Teste de comparações múltiplas (*Tukey*) de módulo de elasticidade (propagação de onda ultrassônica) da série “C”



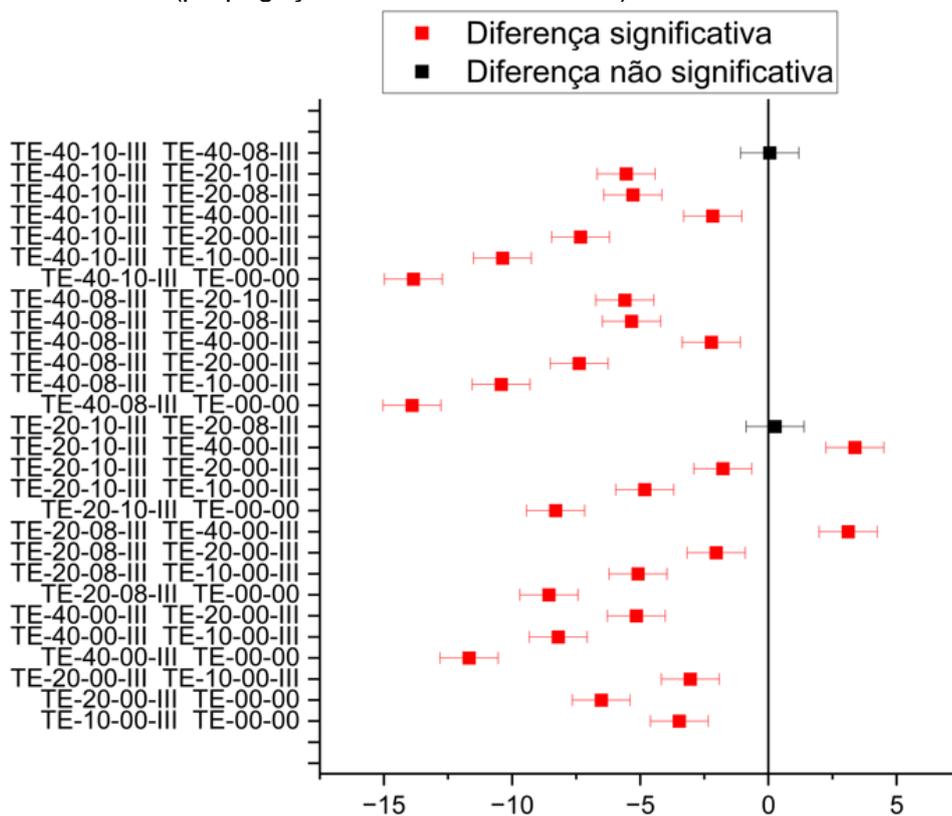
Fonte: Próprio autor.

Figura A14 – Teste de comparações múltiplas (*Tukey*) de módulo de elasticidade (propagação de onda ultrassônica) da série “D”



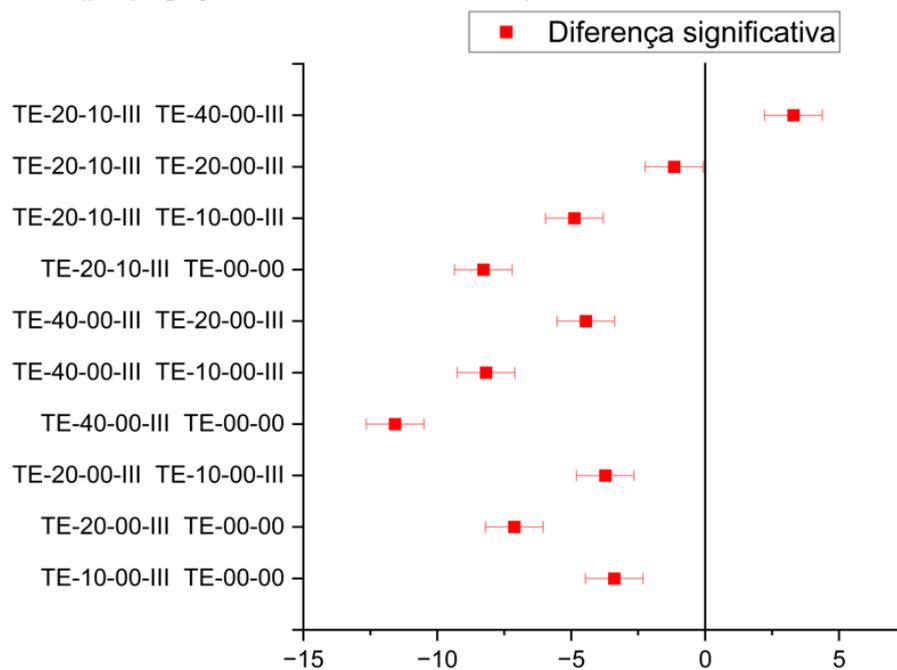
Fonte: Próprio autor.

Figura A15 – Teste de comparações múltiplas (*Tukey*) de módulo de elasticidade (propagação de onda ultrassônica) da série “E”



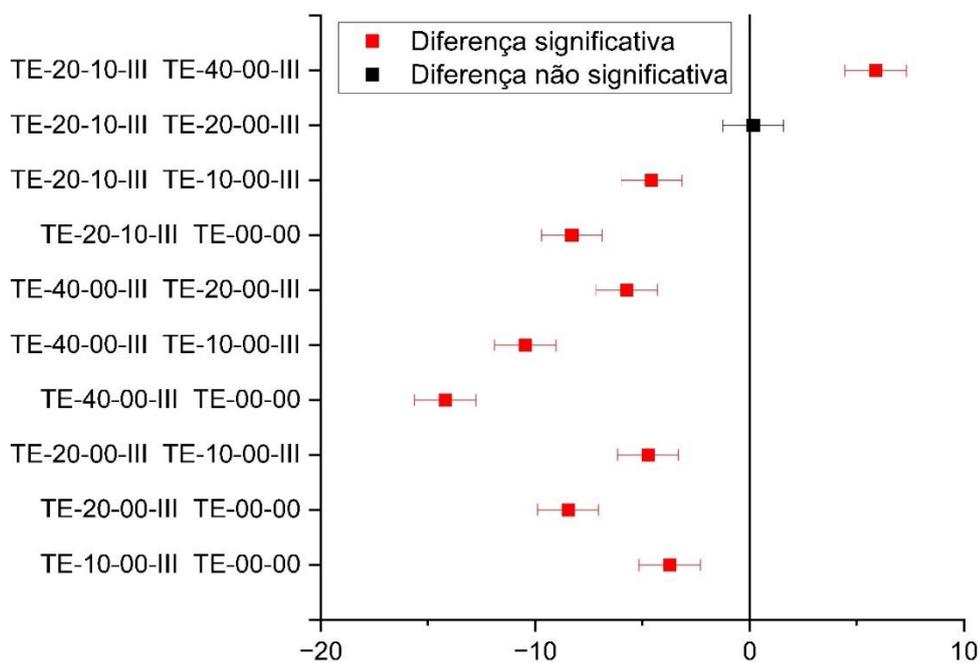
Fonte: Próprio autor.

Figura A16 – Teste de comparações múltiplas (*Tukey*) de módulo de elasticidade (propagação de onda ultrassônica) da série “E” aos 7 dias



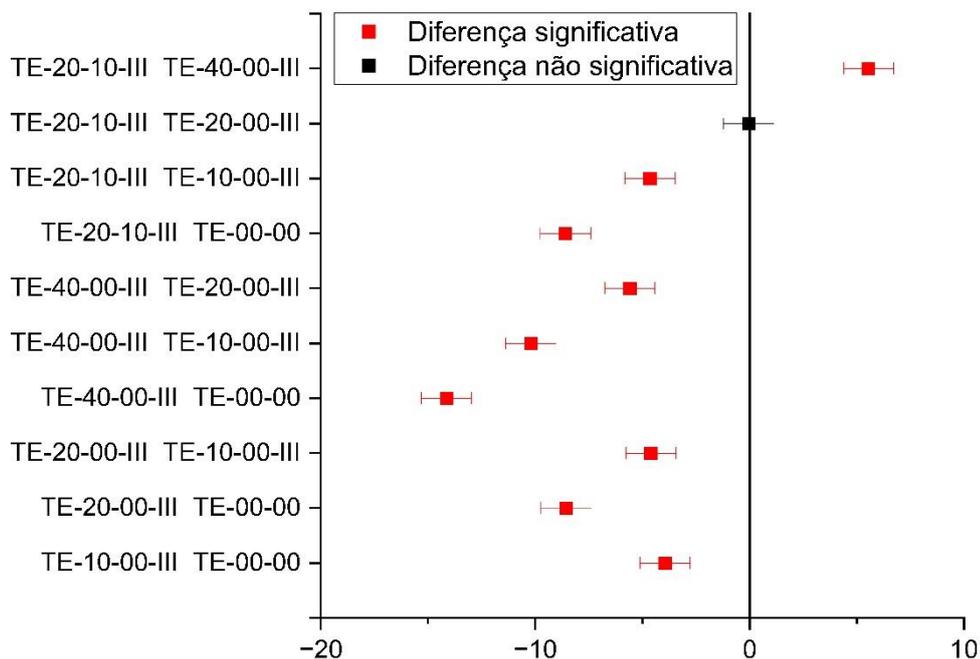
Fonte: Próprio autor.

Figura A17 – Teste de comparações múltiplas (*Tukey*) de módulo de elasticidade flexional (frequências naturais de vibração) da série “E” (parcial)



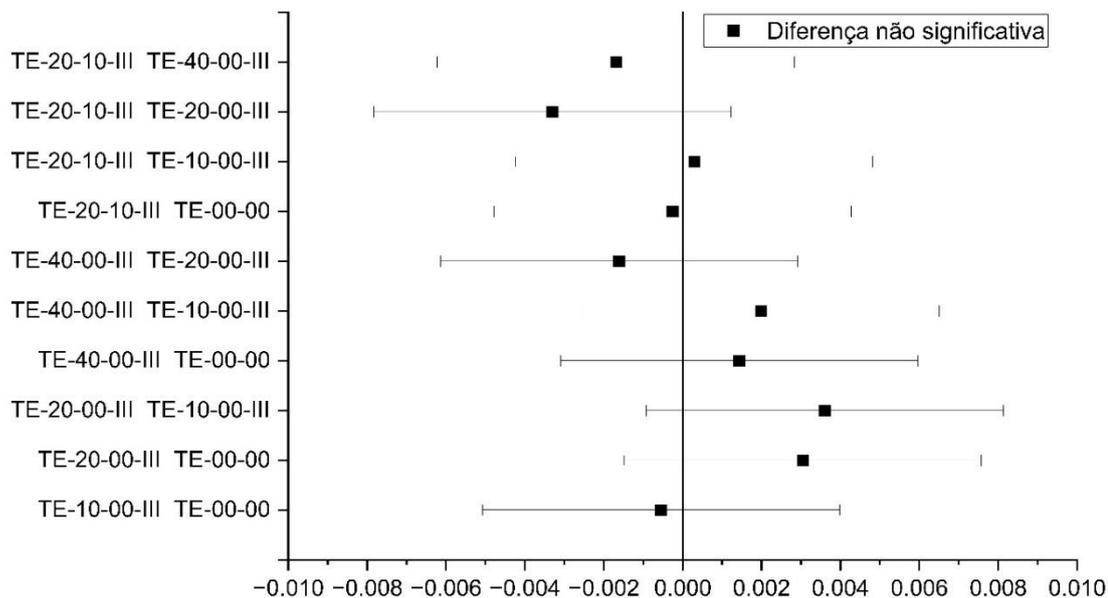
Fonte: Próprio autor.

Figura A18 – Teste de comparações múltiplas (*Tukey*) de módulo de elasticidade longitudinal (frequências naturais de vibração) da série “E” (parcial)



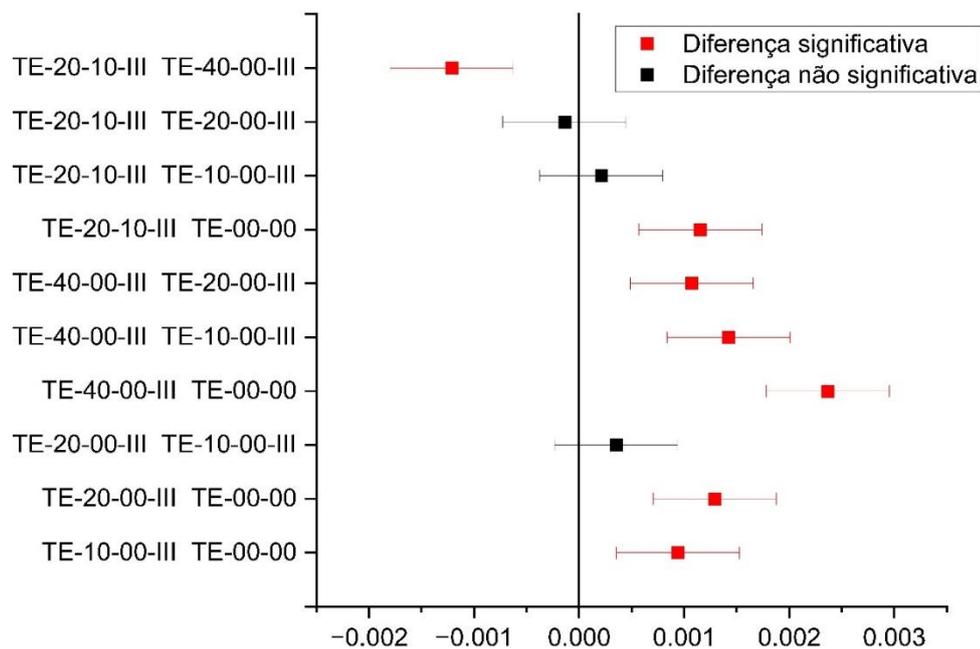
Fonte: Próprio autor.

Figura A19 – Teste de comparações múltiplas (*Tukey*) de Fator de amortecimento flexional (frequências naturais de vibração) da série “E” (parcial)



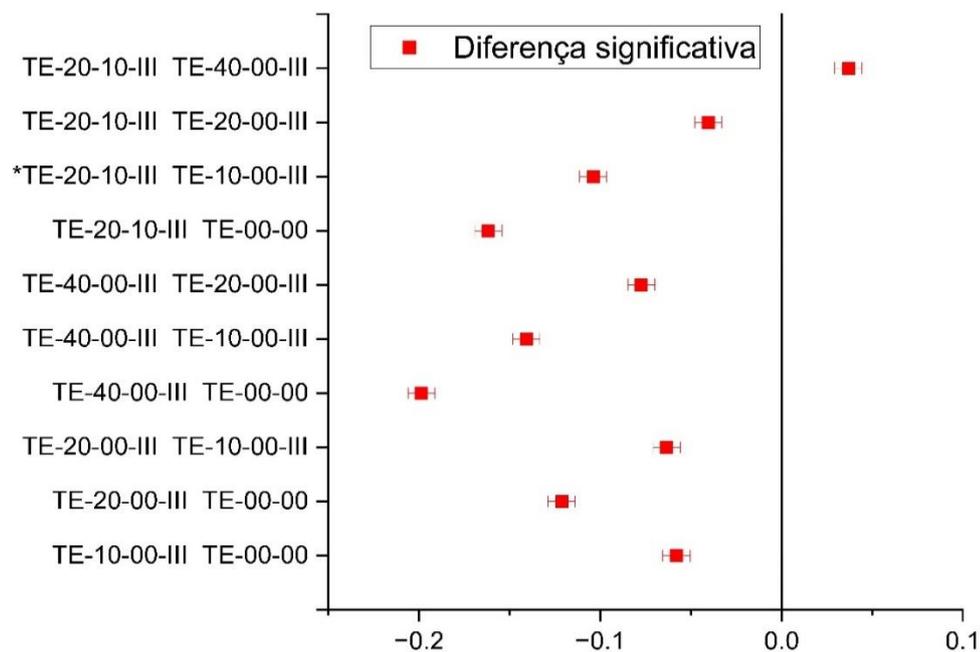
Fonte: Próprio autor.

Figura A20 – Teste de comparações múltiplas (*Tukey*) de Fator de amortecimento longitudinal (frequências naturais de vibração) da série “E” (parcial)



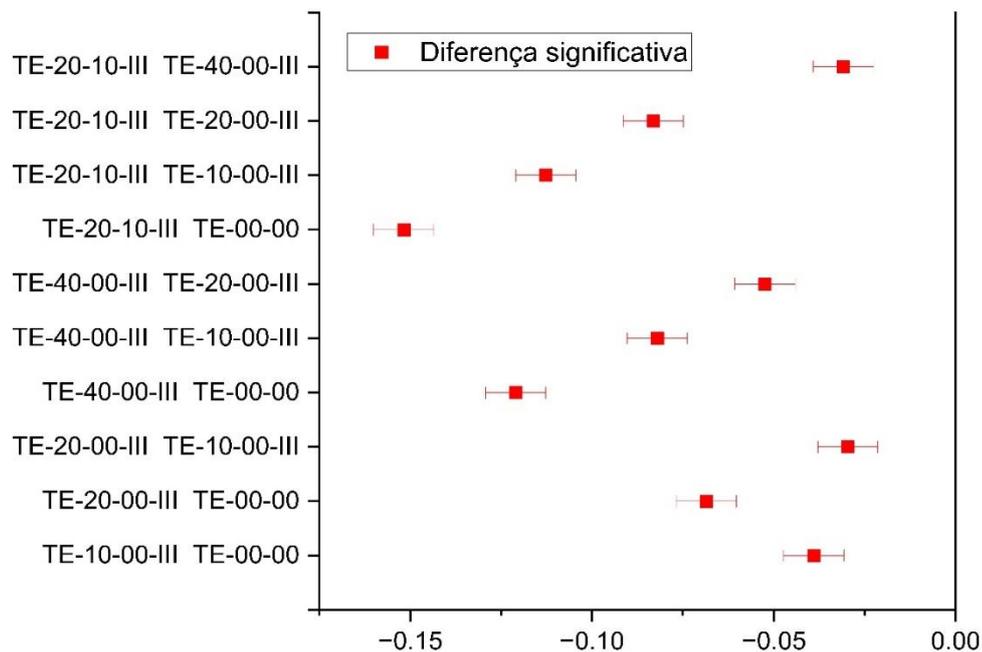
Fonte: Próprio autor.

Figura A21 – Teste de comparações múltiplas (*Tukey*) de massa específica seca da série “E” (parcial)



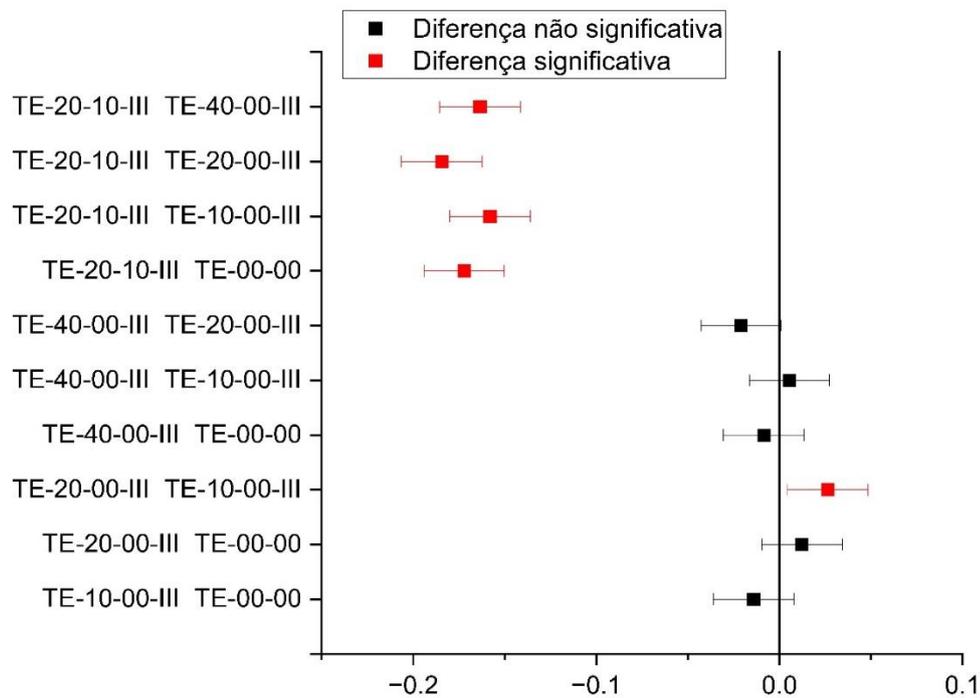
Fonte: Próprio autor.

Figura A22 – Teste de comparações múltiplas (*Tukey*) de massa específica saturada da série “E” (parcial)



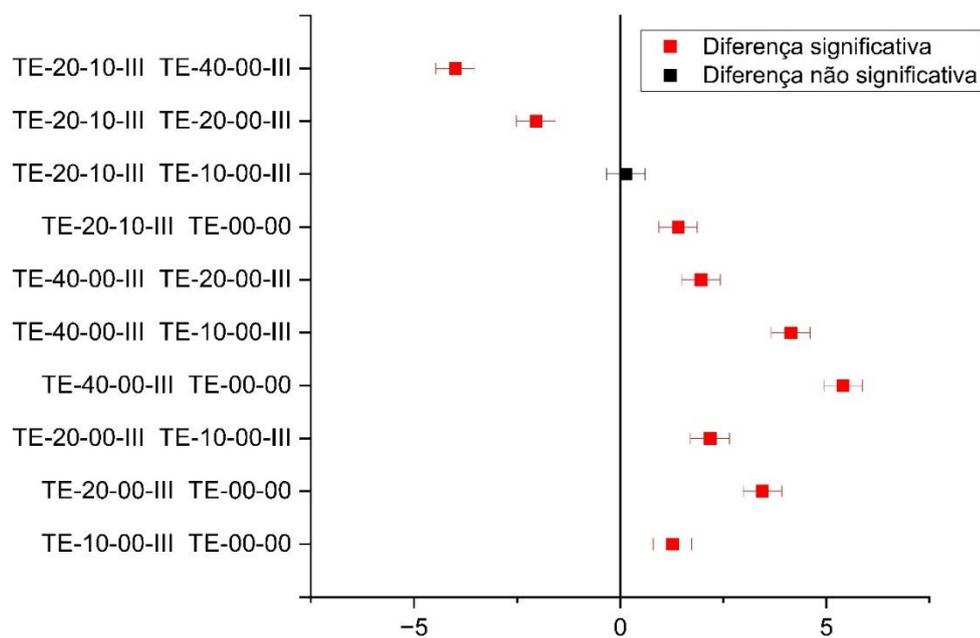
Fonte: Próprio autor.

Figura A23 – Teste de comparações múltiplas (*Tukey*) de massa específica real da série “E” (parcial)



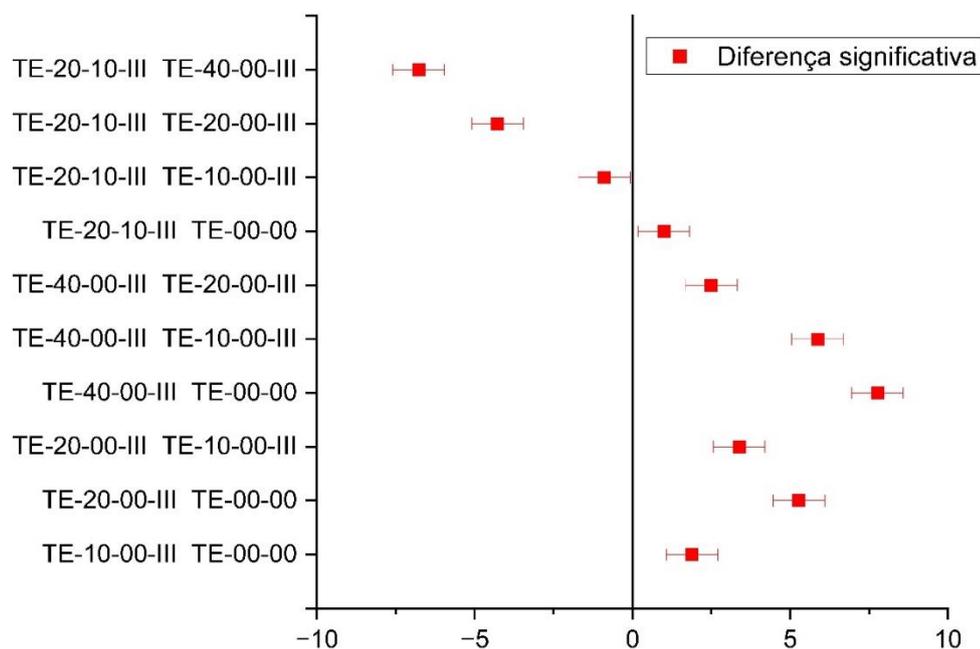
Fonte: Próprio autor.

Figura A24 – Teste de comparações múltiplas (*Tukey*) de absorção de água da série “E” (parcial)



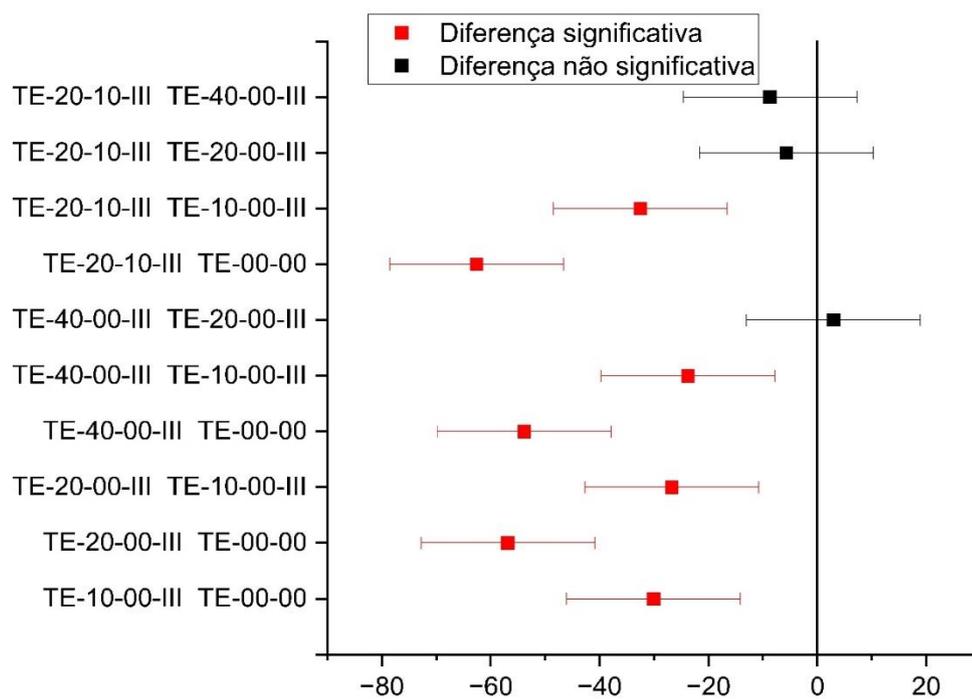
Fonte: Próprio autor.

Figura A25 – Teste de comparações múltiplas (*Tukey*) de Índice de vazios da série “E” (parcial)



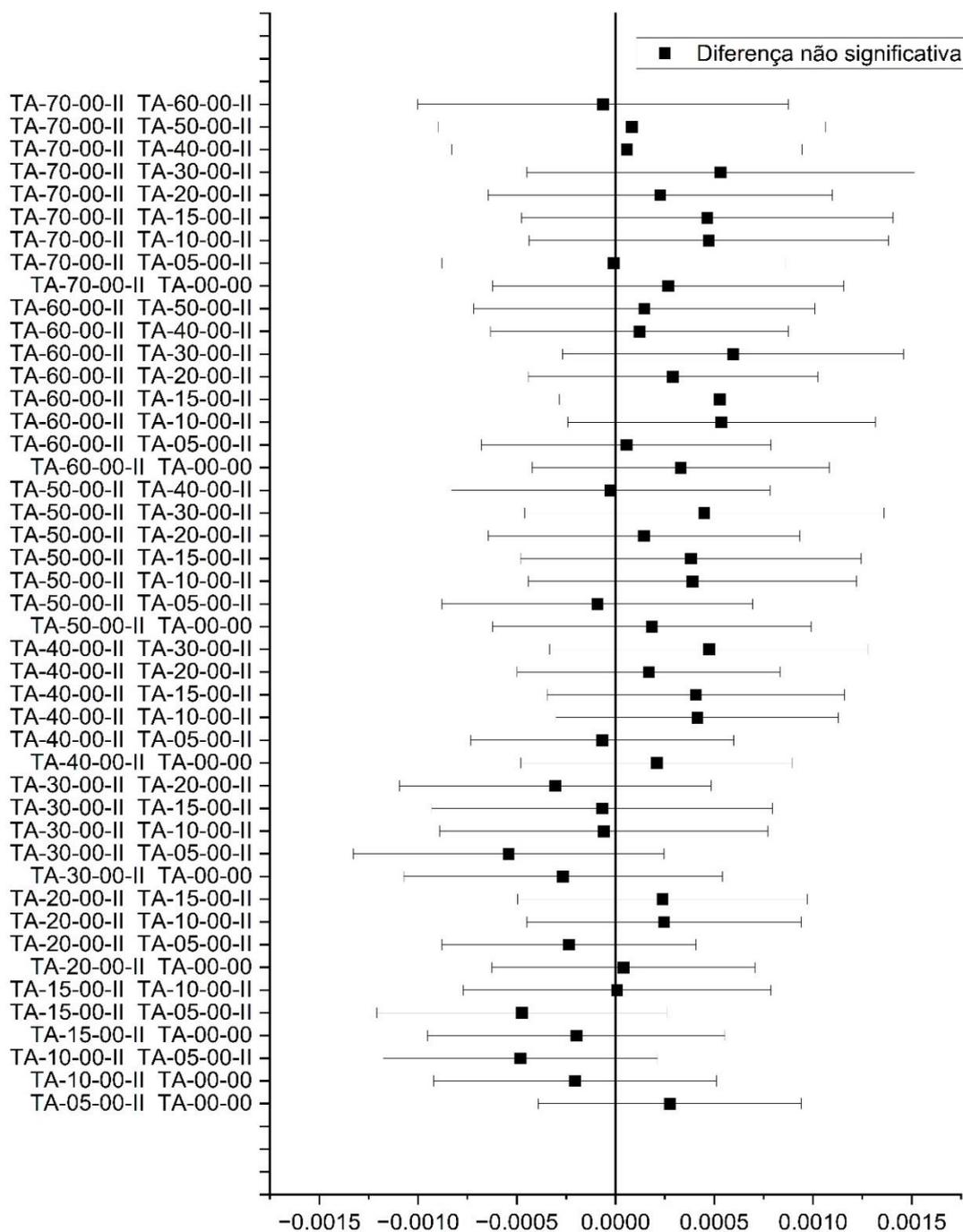
Fonte: Próprio autor.

Figura A26 – Teste de comparações múltiplas (*Tukey*) de Índice de consistência da série “E” (parcial)



Fonte: Próprio autor.

Figura A27 – Teste de comparações múltiplas (Tukey) de condutividade elétrica (40 Hz) da série “A”



Fonte: Próprio autor.

Figura A29 – Teste de comparações múltiplas (*Tukey*) de condutividade elétrica (100 kHz) da série “A”

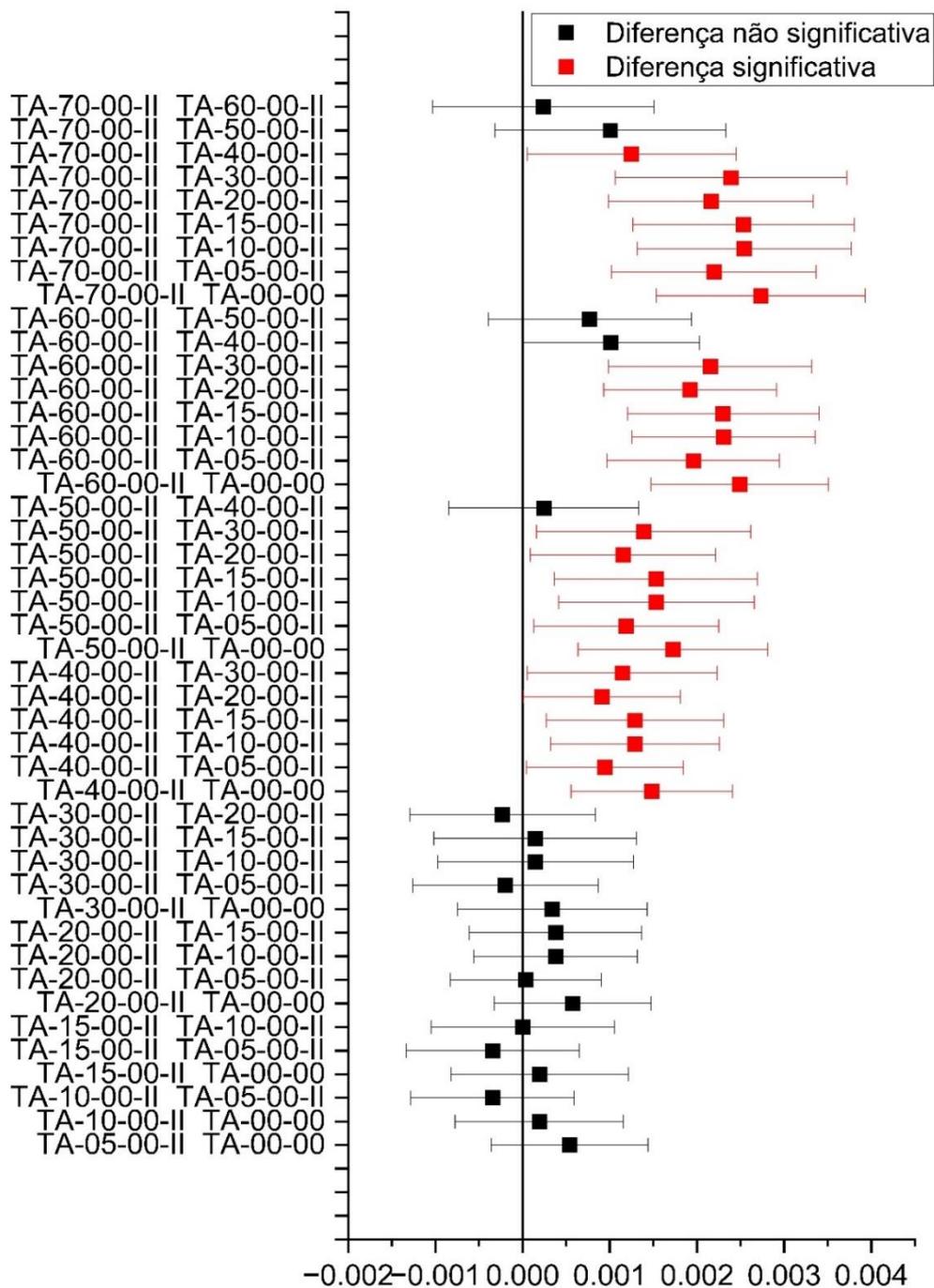
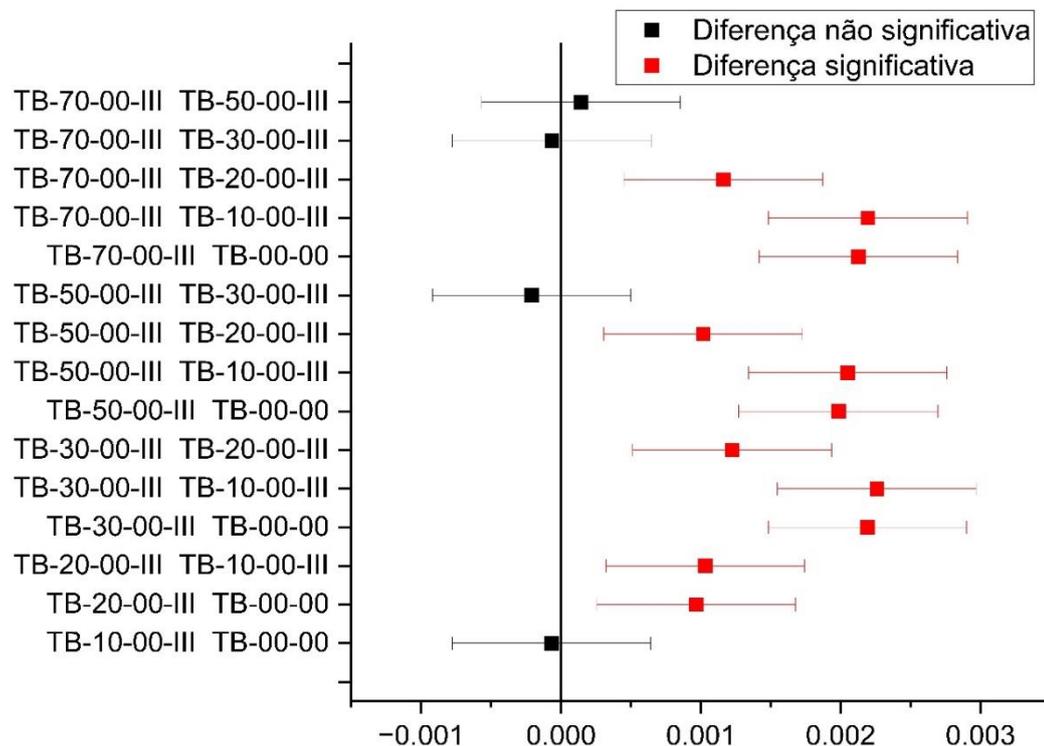
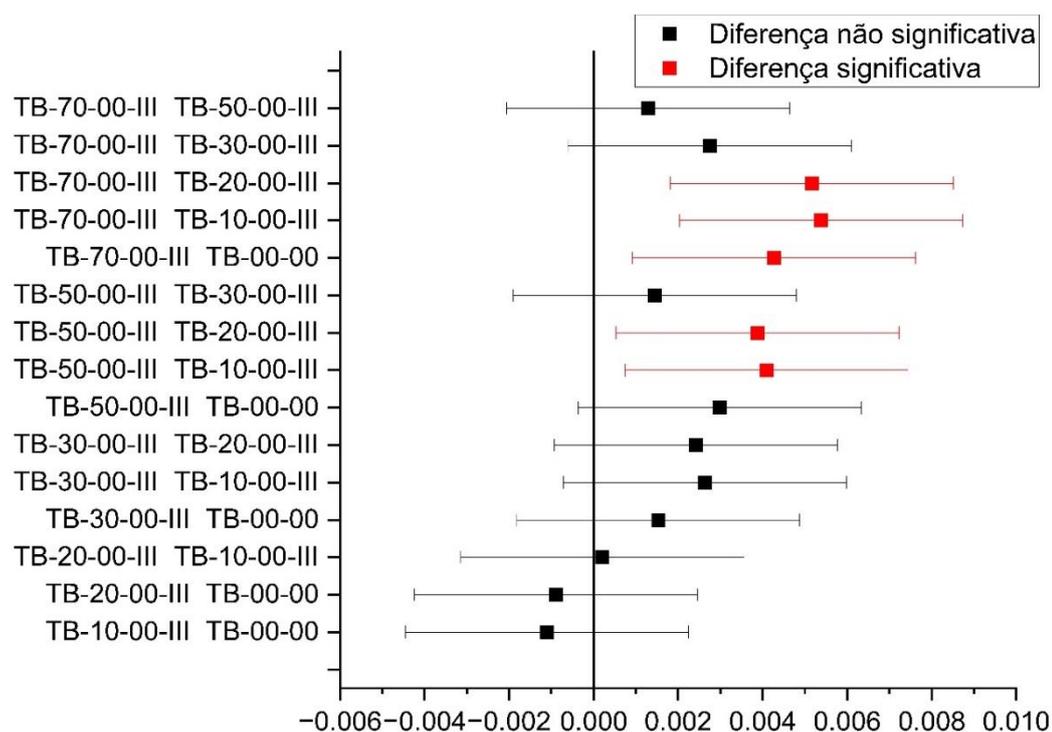


Figura A30 – Teste de comparações múltiplas (*Tukey*) de condutividade elétrica (40 Hz) da série “B”



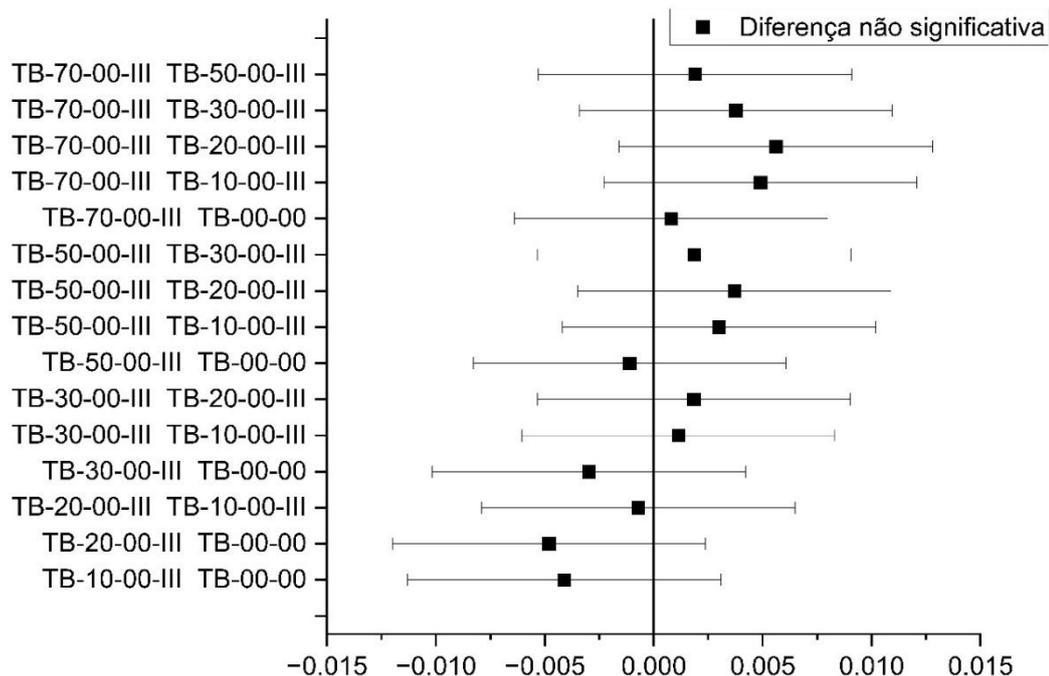
Fonte: Próprio autor.

Figura A31 – Teste de comparações múltiplas (*Tukey*) de condutividade elétrica (499 kHz) da série “B”



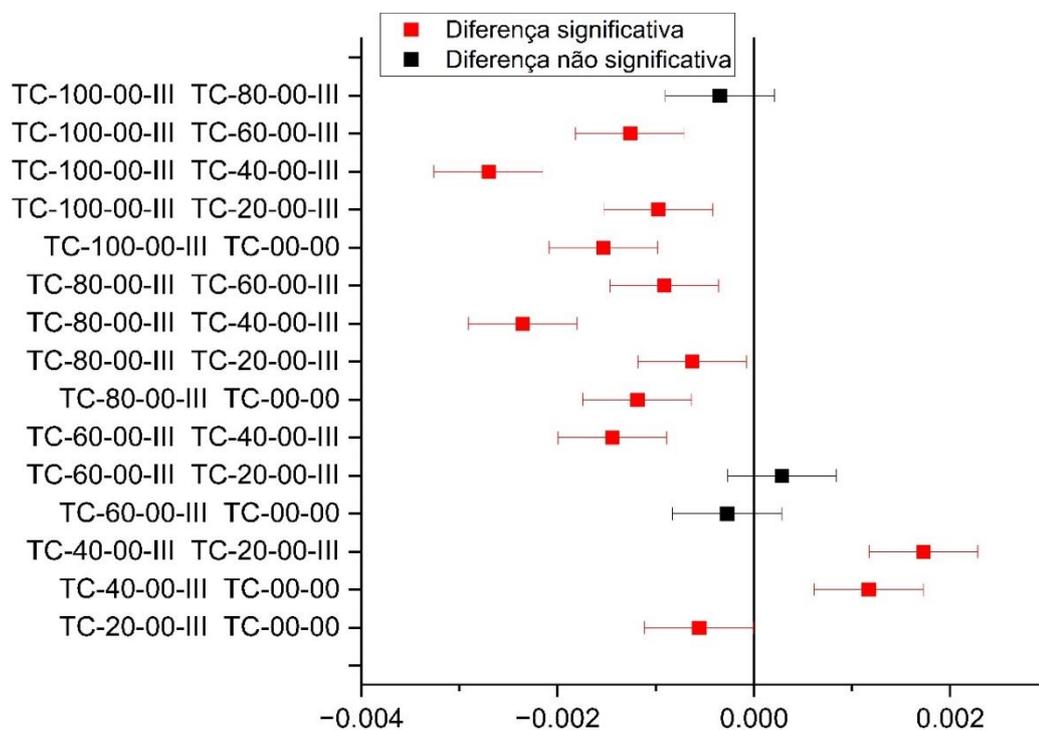
Fonte: Próprio autor.

Figura A32 – Teste de comparações múltiplas (*Tukey*) de condutividade elétrica (1 MHz) da série “B”



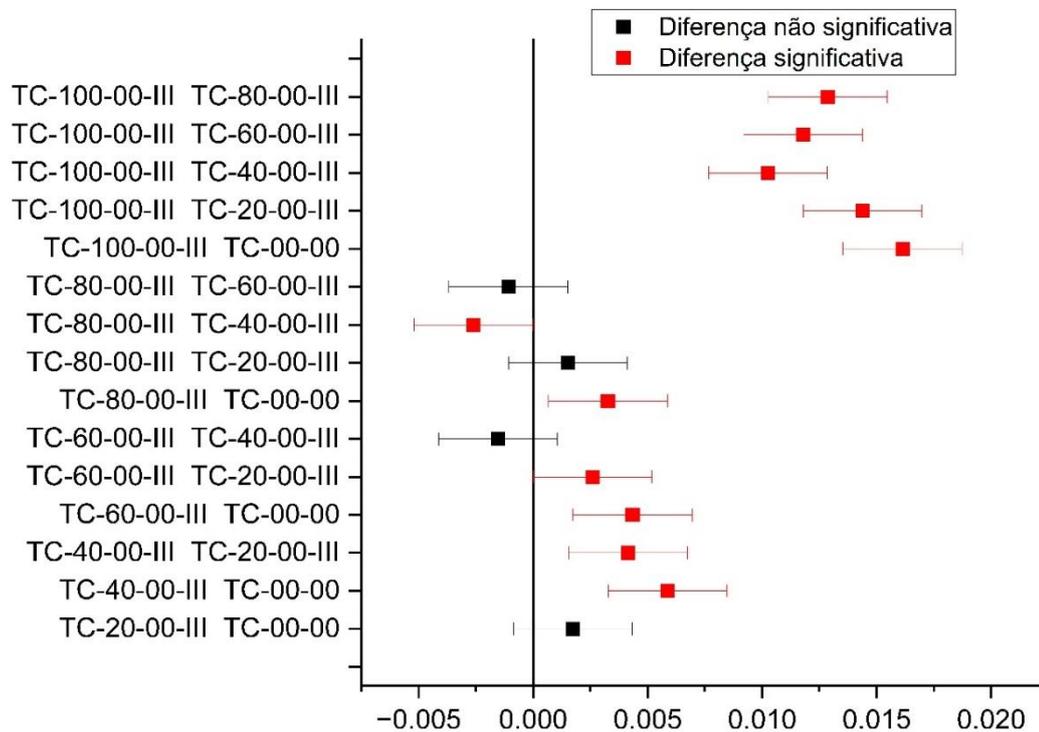
Fonte: Próprio autor.

Figura A33 – Teste de comparações múltiplas (*Tukey*) de condutividade elétrica (40 Hz) da série “C”



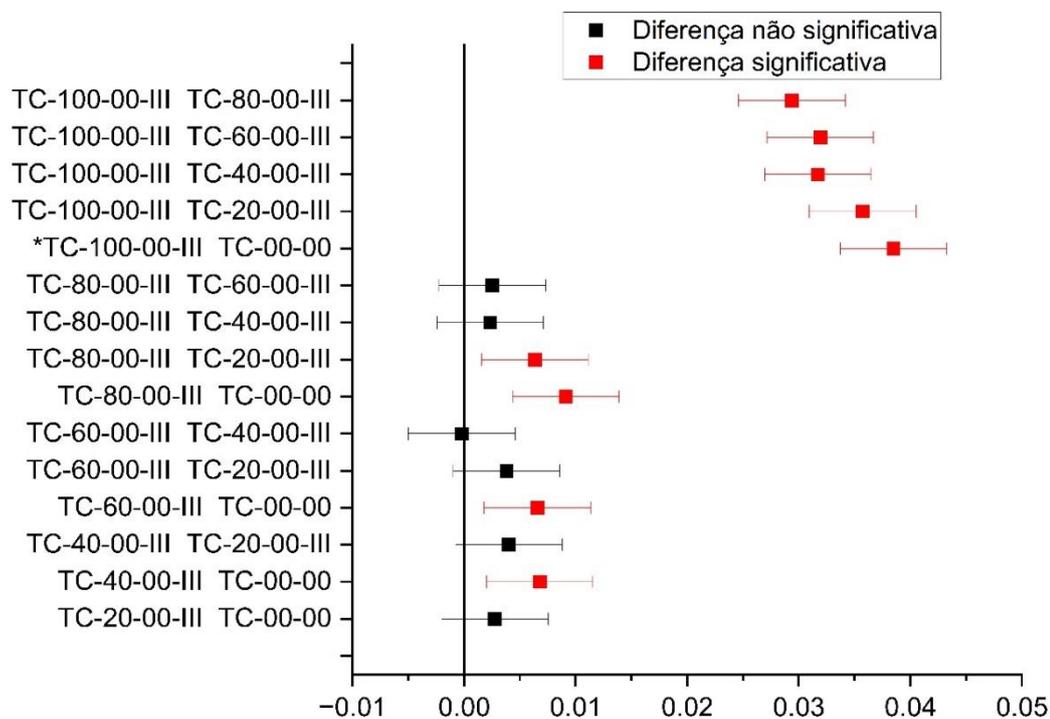
Fonte: Próprio autor.

Figura A34 – Teste de comparações múltiplas (*Tukey*) de condutividade elétrica (499 kHz) da série “C”



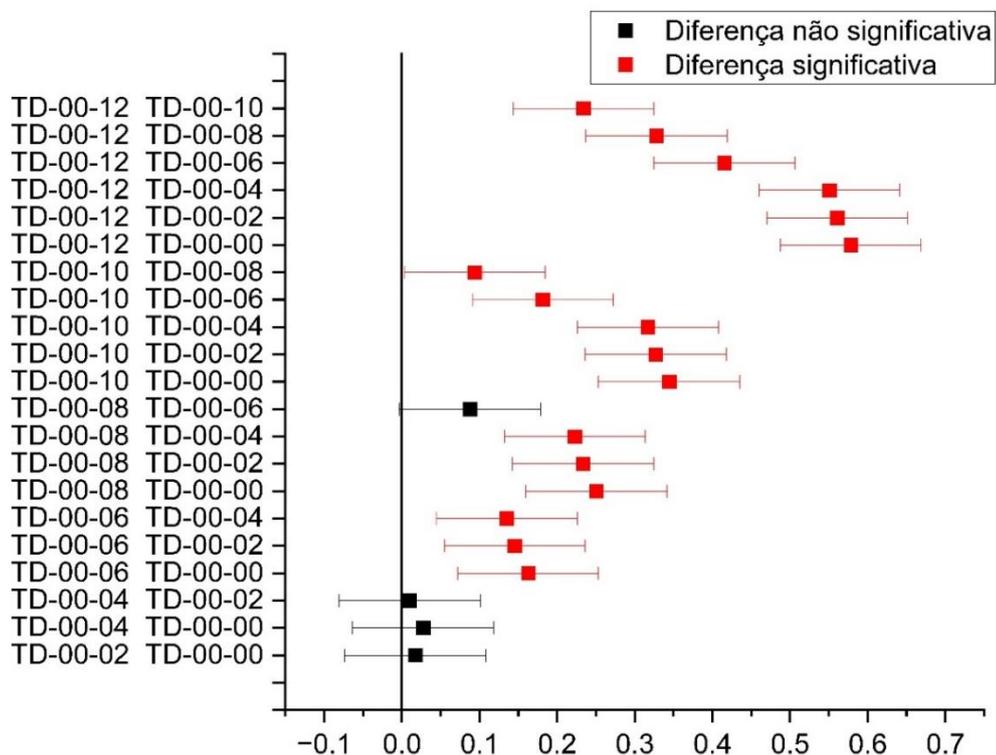
Fonte: Próprio autor.

Figura A35 – Teste de comparações múltiplas (*Tukey*) de condutividade elétrica (1 MHz) da série “C”



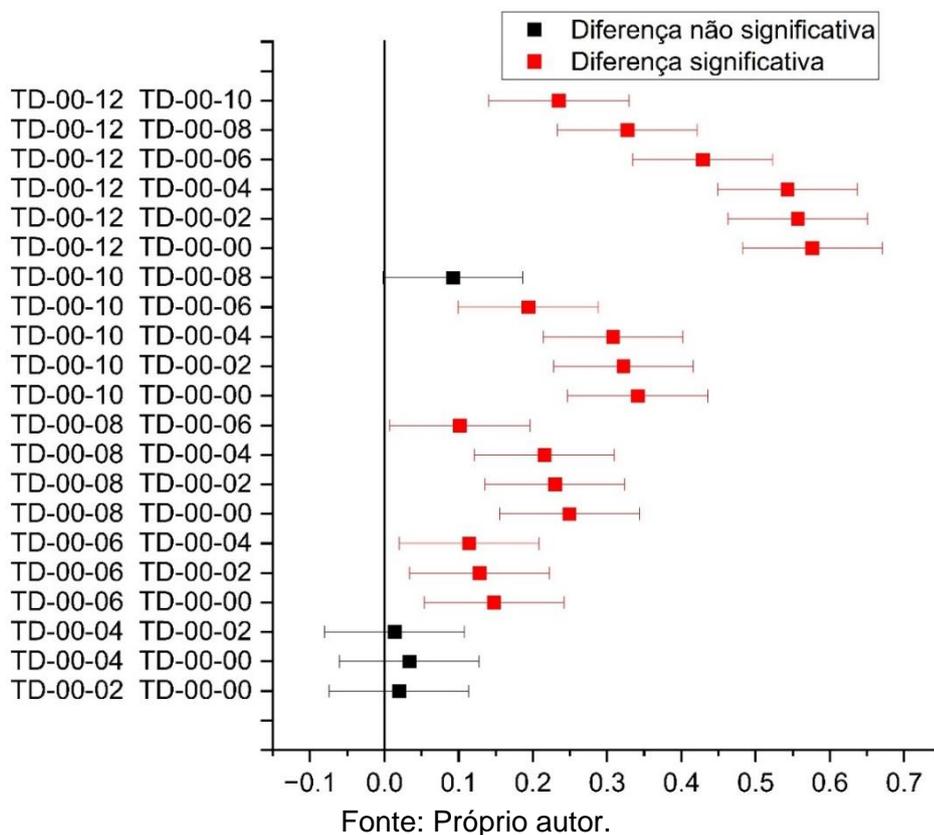
Fonte: Próprio autor.

Figura A36 – Teste de comparações múltiplas (*Tukey*) de condutividade elétrica (40 Hz) da série “D”



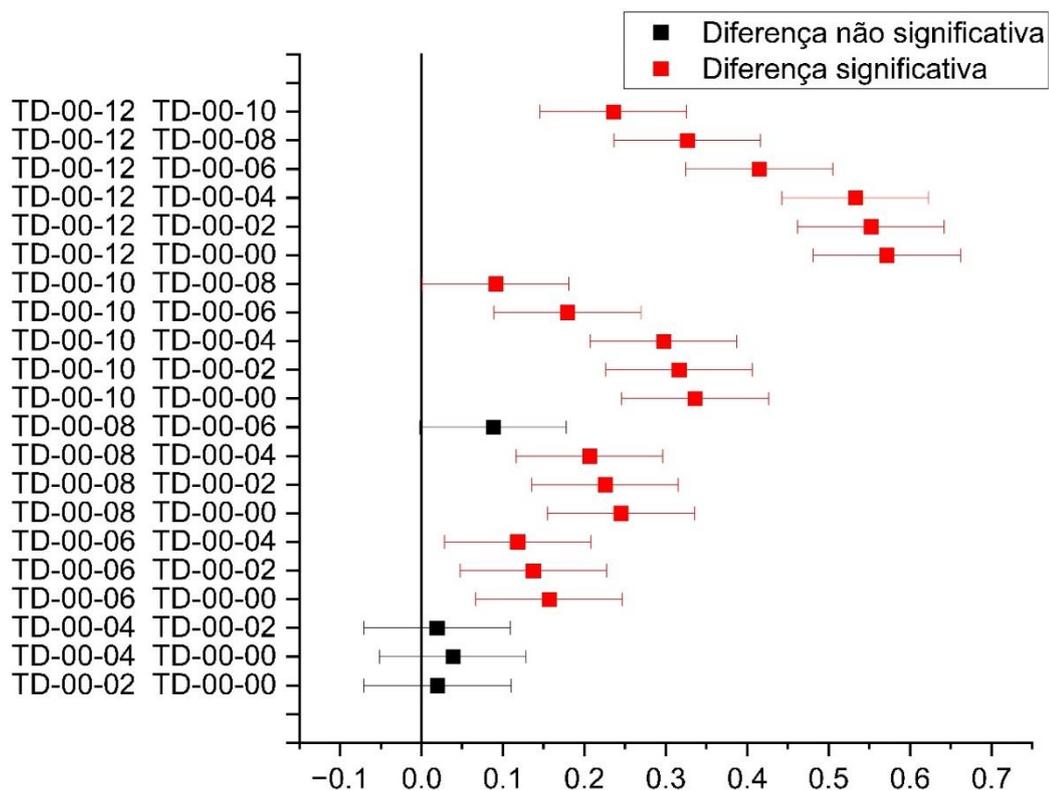
Fonte: Próprio autor.

Figura A37 – Teste de comparações múltiplas (*Tukey*) de condutividade elétrica (499 kHz) da série “D”



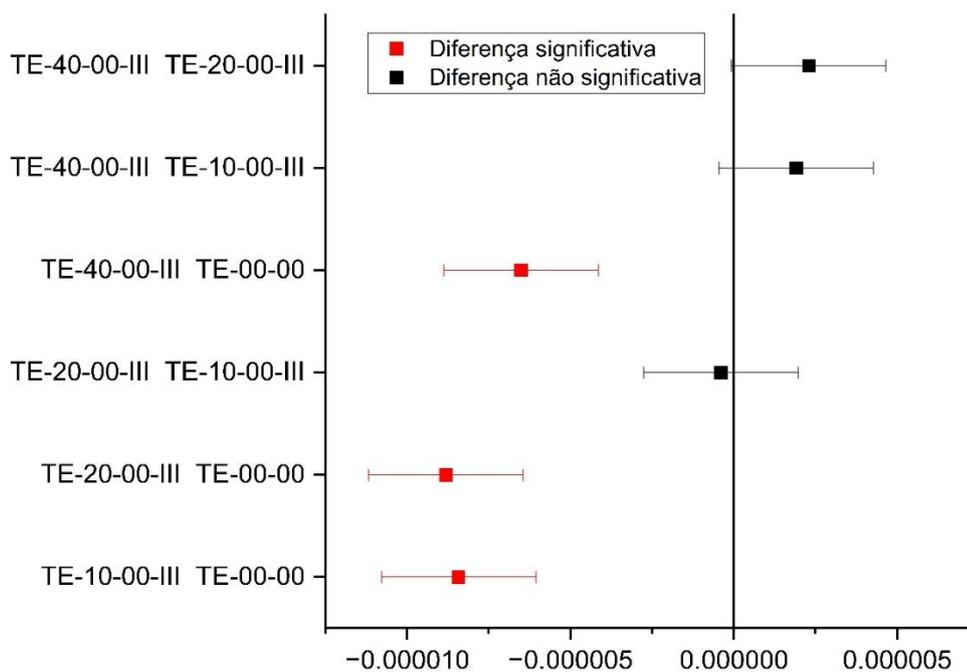
Fonte: Próprio autor.

Figura A38 – Teste de comparações múltiplas (*Tukey*) de condutividade elétrica (1 MHz) da série “D”



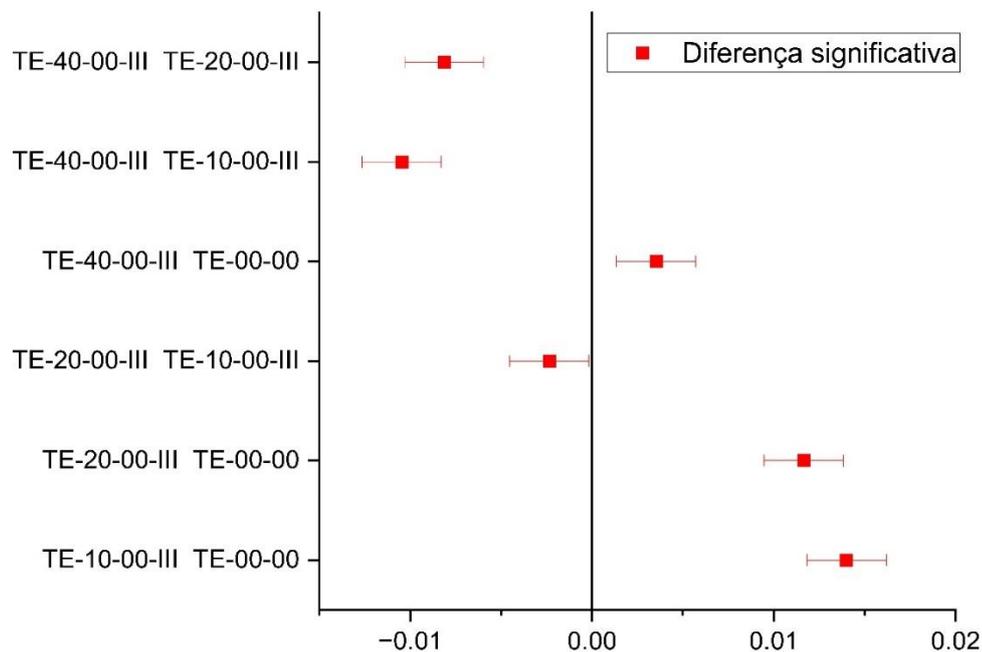
Fonte: Próprio autor.

Figura A39 – Teste de comparações múltiplas (*Tukey*) de condutividade elétrica (40 Hz) da série “E” (somente entre traço de referência e traços com resíduo de lona de freio)



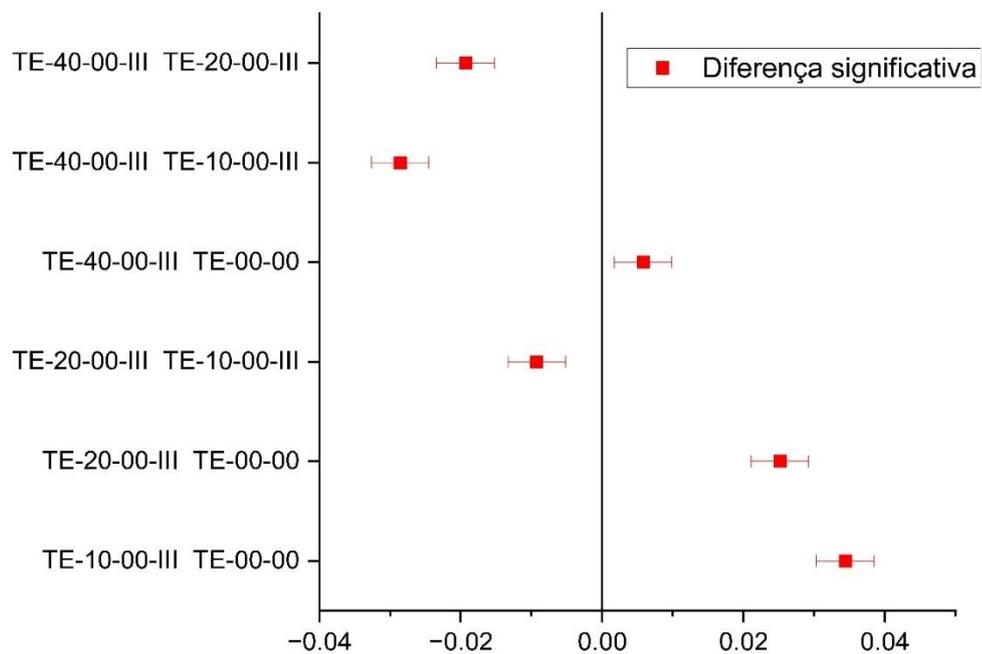
Fonte: Próprio autor.

Figura A40 – Teste de comparações múltiplas (*Tukey*) de condutividade elétrica (499 kHz) da série “E” (somente entre traço de referência e traços com resíduo de lona de freio)



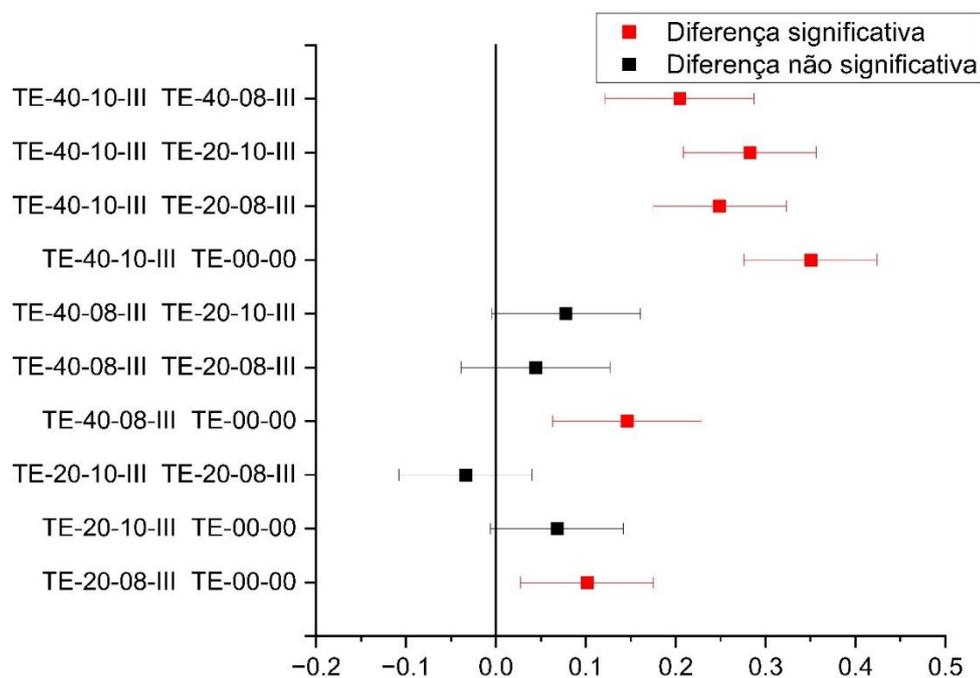
Fonte: Próprio autor.

Figura A41 – Teste de comparações múltiplas (*Tukey*) de condutividade elétrica (1 MHz) da série “E” (somente entre traço de referência e traços com resíduo de lona de freio)



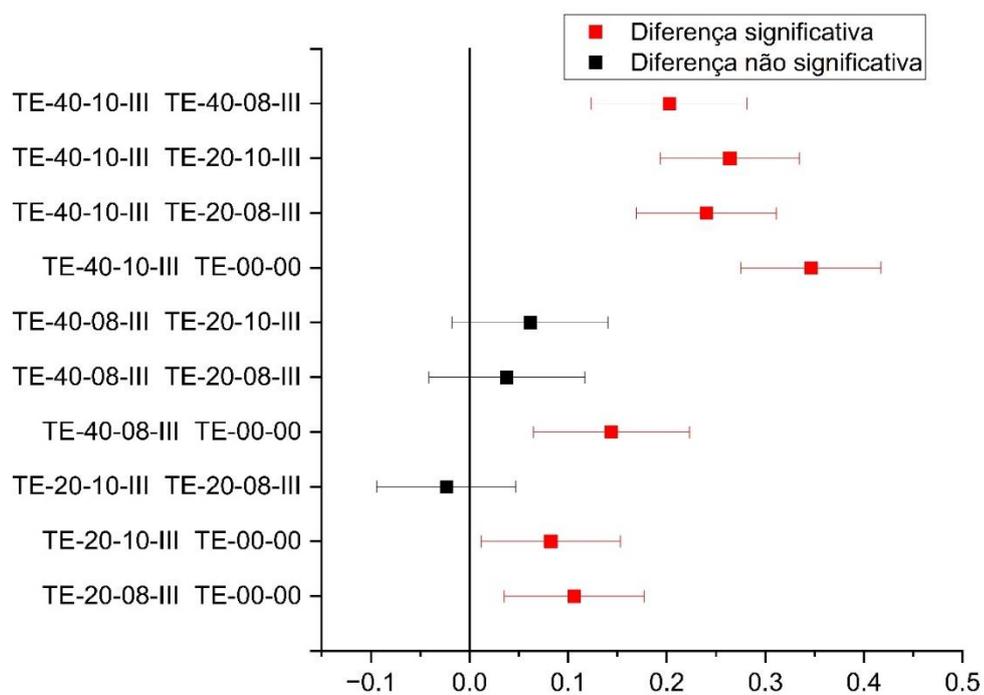
Fonte: Próprio autor.

Figura A42 – Teste de comparações múltiplas (*Tukey*) de condutividade elétrica (40 Hz) da série “E” (somente entre traço de referência e traços com resíduo de lona de freio e fibra de carbono)



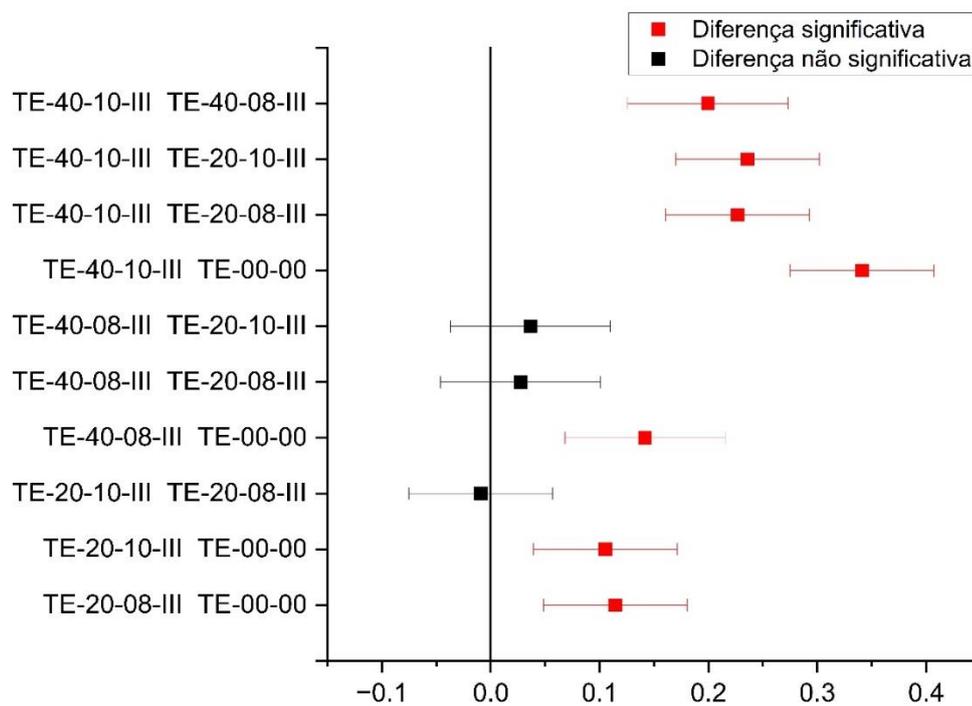
Fonte: Próprio autor.

Figura A43 – Teste de comparações múltiplas (*Tukey*) de condutividade elétrica (499 kHz) da série “E” (somente entre traço de referência e traços com resíduo de lona de freio e fibra de carbono)



Fonte: Próprio autor.

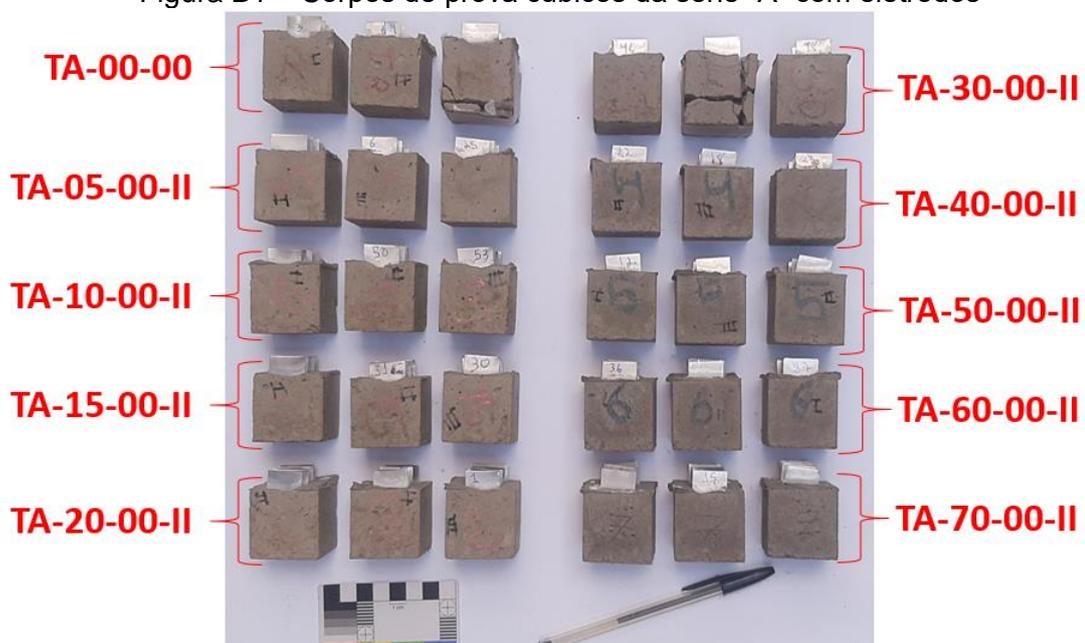
Figura A44 – Teste de comparações múltiplas (*Tukey*) de condutividade elétrica (1 MHz) da série “E” (somente entre traço de referência e traços com resíduo de lona de freio e fibra de carbono)



Fonte: Próprio autor.

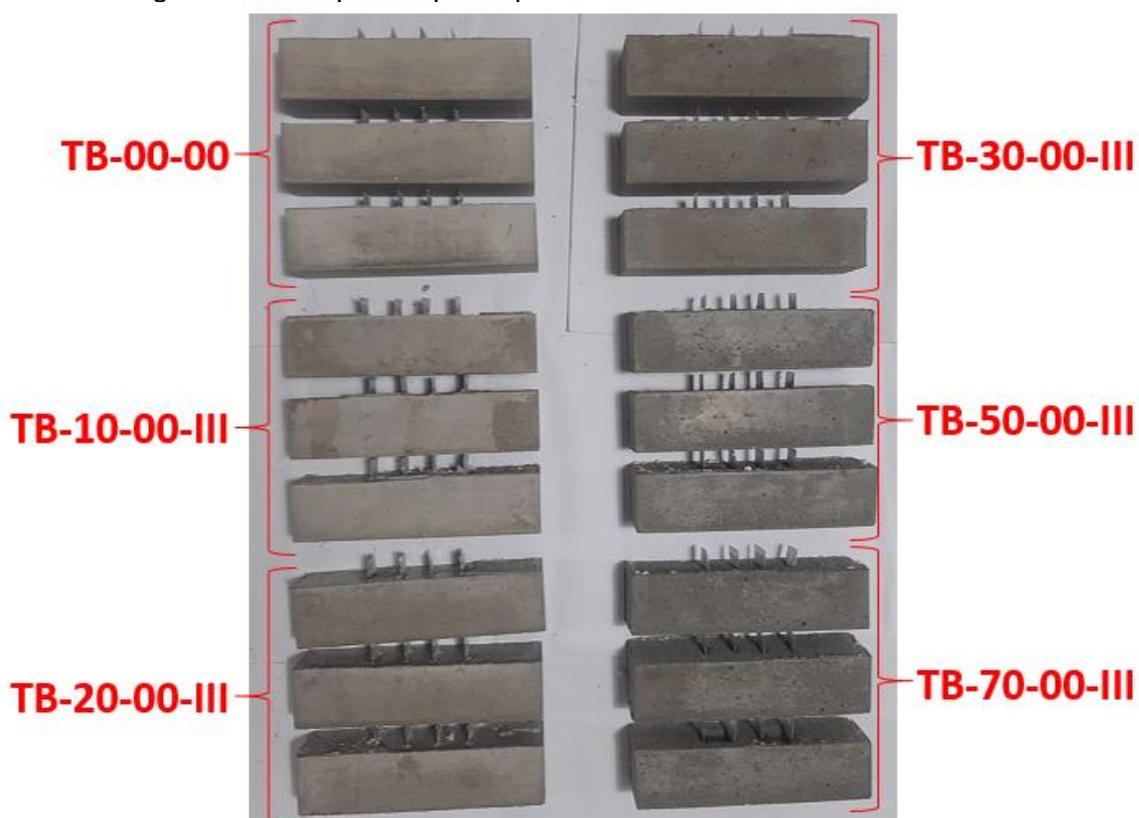
APÊNDICE B

Figura B1 – Corpos de prova cúbicos da série “A” com eletrodos



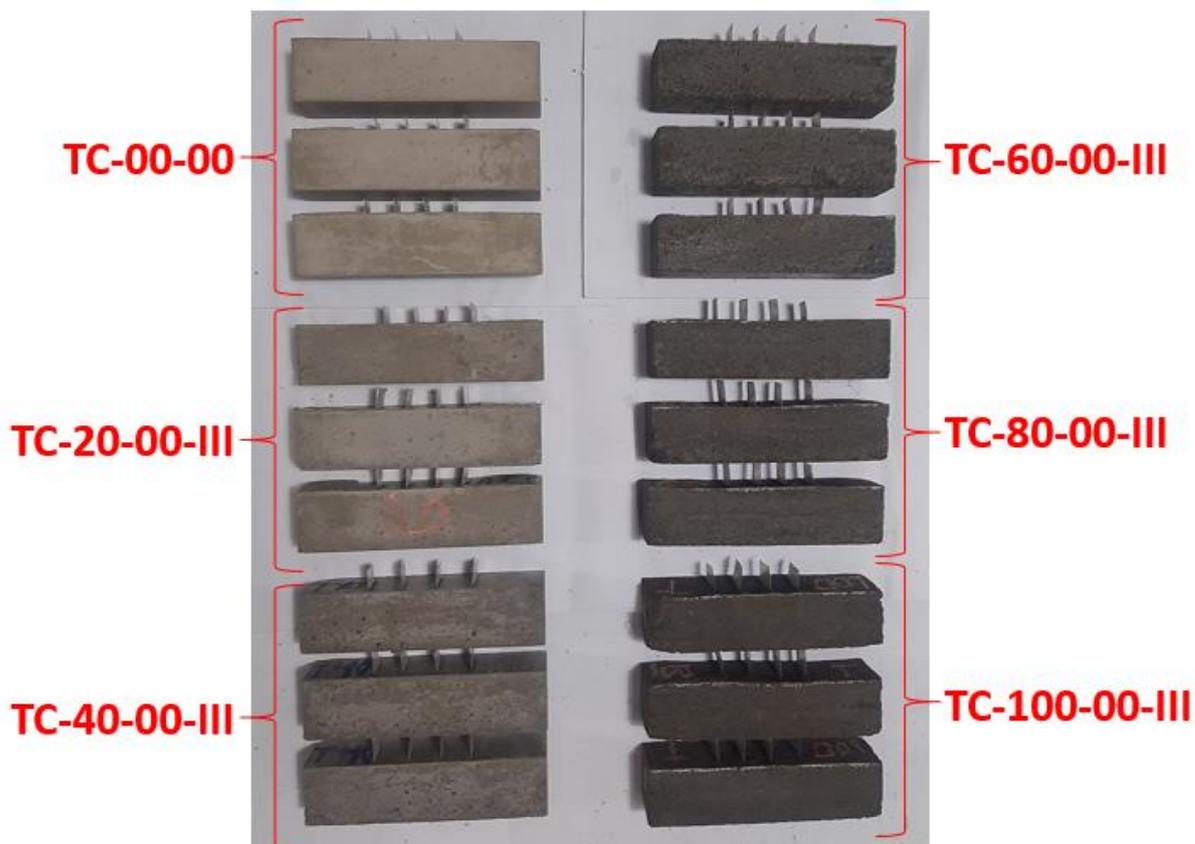
Fonte: Próprio autor.

Figura B2 – Corpos de prova prismáticos da série “B” com eletrodos



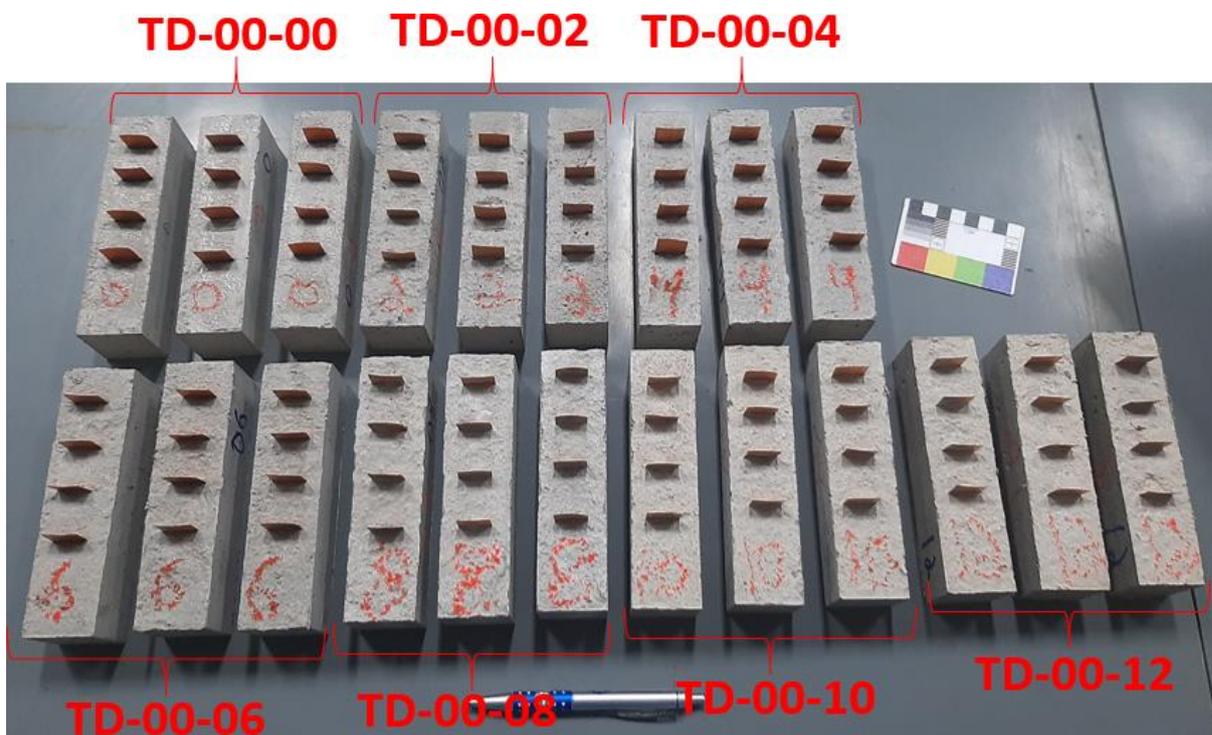
Fonte: Próprio autor.

Figura B3 – Corpos de prova prismáticos da série “C” com eletrodos



Fonte: Próprio autor.

Figura B4 – Corpos de prova prismáticos da série “D” com eletrodos



Fonte: Próprio autor.

Figura B5 – Corpos de prova prismáticos da série “E” com eletrodos



Fonte: Próprio autor.

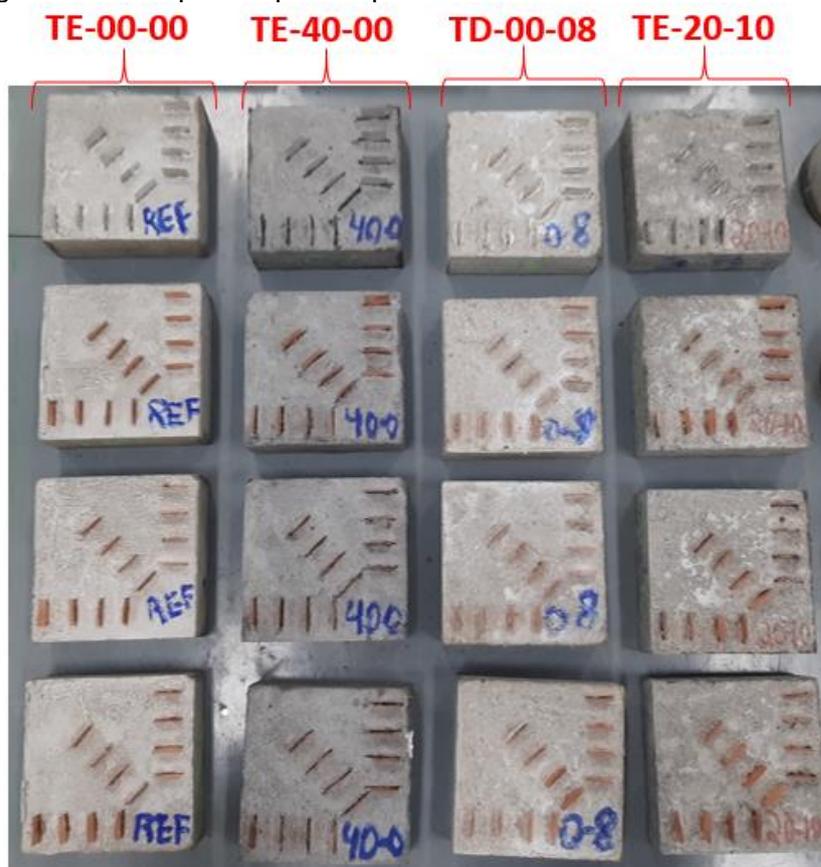
Figura B6 – Corpos de prova cilíndricos da série “E” com eletrodos

TE-00-00 TE-40-00 TD-00-08 TE-20-10



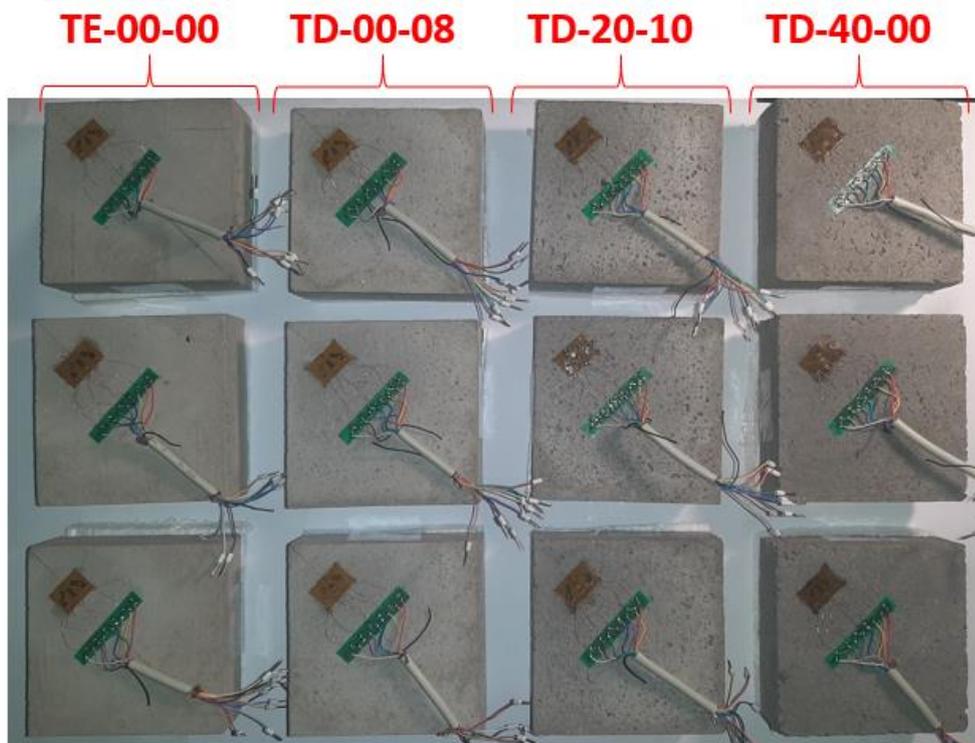
Fonte: Próprio autor.

Figura B7 – Corpos de prova tipo roseta da série “E” com eletrodos



Fonte: Próprio autor.

Figura B8 – Corpos de prova tipo roseta da série “E” com extensômetros



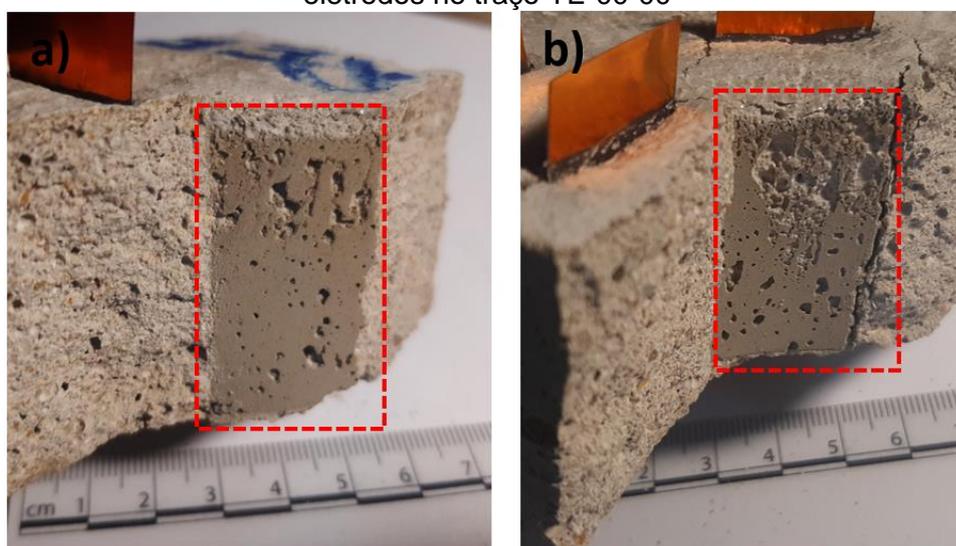
Fonte: Próprio autor.

Figura B9 – Amostras de lonas de freio usadas que tiveram condutividade elétrica analisada



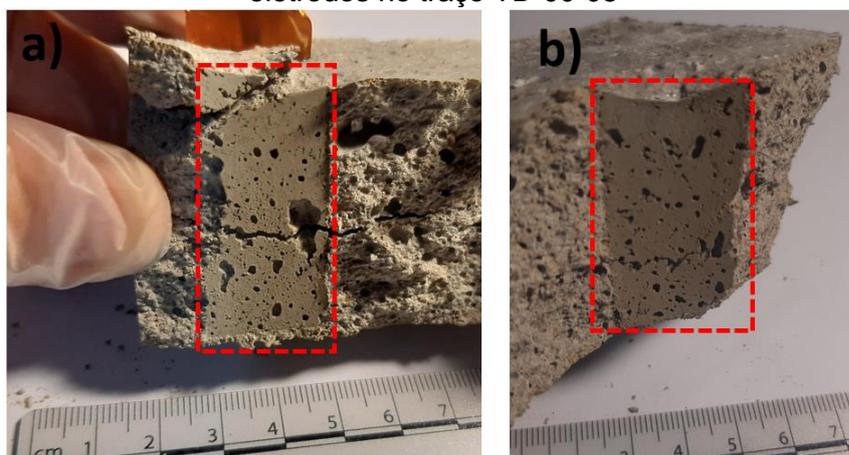
Fonte: Próprio autor.

Figura B10 – Superfícies de contato do corpo de prova tipo roseta (após ruptura) com os eletrodos no traço TE-00-00



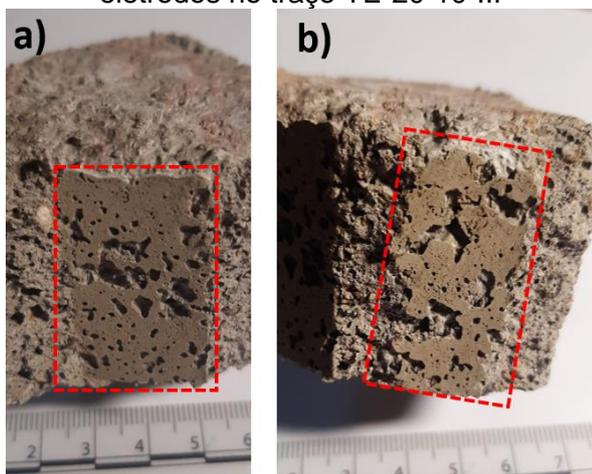
Fonte: Próprio autor.

Figura B11 – Superfícies de contato do corpo de prova tipo roseta (após ruptura) com os eletrodos no traço TD-00-08



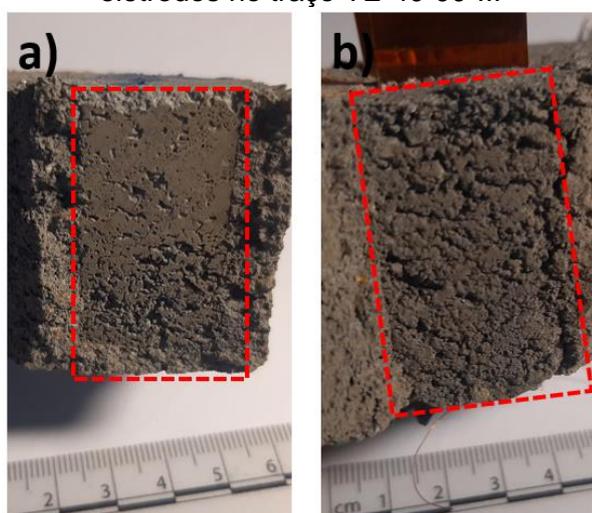
Fonte: Próprio autor.

Figura B12 – Superfícies de contato do corpo de prova tipo roseta (após ruptura) com os eletrodos no traço TE-20-10-III



Fonte: Próprio autor.

Figura B13 – Superfícies de contato do corpo de prova tipo roseta (após ruptura) com os eletrodos no traço TE-40-00-III



Fonte: Próprio autor.