



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS RUSSAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

RYAN ARAÚJO DE MATOS

**CARACTERIZAÇÃO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO
DIELÉTRICO DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS À BASE DE NANOTUBOS DE
CARBONO**

RUSSAS

2023

RYAN ARAÚJO DE MATOS

CARACTERIZAÇÃO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO
DIELÉTRICO DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS À BASE DE NANOTUBOS DE
CARBONO

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, Campus Russas, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita.

RUSSAS

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M382c Matos, Ryan Araújo de.

Caracterização numérico - experimental do comportamento dielétrico de compósitos cimentícios à base de nanotubos de carbono / Ryan Araújo de Matos. – 2023.
56 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Curso de Engenharia Civil, Russas, 2023.

Orientação: Prof. Dr. Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita..

1. Compósito cimentício. 2. Nanotubos de carbono. 3. Materiais inteligentes. 4. Modelagem numérica. I. Título.

CDD 620

RYAN ARAÚJO DE MATOS

CARACTERIZAÇÃO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO
DIELÉTRICO DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS À BASE DE NANOTUBOS DE
CARBONO

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Civil da
Universidade Federal do Ceará, Campus Russas,
como requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: 20/11/2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Lais Cristina Costa
Universidade Federal do Ceará (UFC)

M.Sc Israel Nilton Lopes Souza
Universidade de Perúgia (UNIPG)

Dedico este trabalho a Deus por ter me ajudado a ser perseverante. Aos meus pais e irmão que muito me apoiaram e me incentivaram a não desistir.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por Sua presença constante em todos os momentos da minha vida, capacitando-me e abençoando-me. Expresso minha profunda gratidão aos meus pais extraordinários, Maria Auxiliadora de Matos e José Gildécio Araújo de Matos, que não apenas me deram a vida, mas também foram arquitetos incansáveis na construção dos melhores valores e princípios que agora carrego como alicerce. Agradeço pelo amor, incentivo e compreensão que sempre me dedicaram de maneira sincera e especial. Cada gesto de confiança de vocês foi um farol iluminando meu caminho, sem medir esforços para que eu pudesse viver minha vida da melhor forma possível.

Manifesto meu agradecimento sincero ao meu irmão, Gildécio Araújo de Matos Junior, e à minha namorada, Thamires Rocha Cavalcante. Em situações difíceis, quando a desistência parecia uma opção tentadora, a presença amorosa de vocês foi o alicerce que me impulsionou a continuar. A gratidão que sinto por vocês vai além das palavras.

Aos amigos e amigas que compartilharam comigo os anos de formação, destaco Gilmário e Julya. Valorizo os momentos de companheirismo, as resenhas e até mesmo os perrengues que enfrentamos juntos ao longo da graduação. Agradeço pelas risadas compartilhadas, pelos memes que nos alegraram e tantos outros gestos de amizade. Além disso, expresso minha gratidão a Macgyver Viana, Sizy Brenda e Israel Nilton. Mesmo com pouco tempo de contato, compartilhamos experiências valiosas, aprendizados enriquecedores e, acima de tudo, agradeço pela paciência que tiveram comigo. Estendo meu reconhecimento a tantos outros que, embora não mencionados aqui, contribuíram de alguma forma para tornar os dias mais agradáveis, tanto na UFC como em outros lugares.

Aos meus professores, em especial ao professor, e orientador, Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita, por seu apoio incansável em toda minha jornada acadêmica. Durante os desafios de viver em outra cidade, ele não apenas esteve presente, mas desempenhou um papel crucial ao me ajudar a superar obstáculos. Sua paciência e compreensão foram luzes orientadoras nos momentos mais difíceis, demonstrando um comprometimento notável com meu desenvolvimento pessoal e acadêmico. O Professor Esequiel foi responsável por me introduzir ao mundo da pesquisa, transmitindo entusiasmo e a gratificação de contribuir para a sociedade. Agradeço por nunca ter desistido de mim, por sua paciência infinita. A influência positiva que você teve em minha vida acadêmica e pessoal é inestimável. Sou profundamente grato por ter um orientador tão dedicado e motivador.

A todo o corpo docente do curso Engenharia Civil, por todos os ensinamentos e conhecimentos compartilhados durante os anos que vivenciei como aluno, que sem dúvidas me proporcionaram uma excelente formação acadêmica. Agradeço a UFC Campus Russas por me acolher e possibilitar minha graduação.

À Instituição FUNCAP e a CNPq, pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio.

“Há muito espaço lá embaixo”

*Richard Feynman, Prêmio Nobel de Física de
1965.*

RESUMO

Os Nanotubos de Carbono (NTC) auxiliou no desenvolvimento de materiais inteligentes, especialmente para aplicações em monitoramento de integridade estrutural (SHM). A interação entre nanotubos e compósitos de cimento tem avançado no estudo de concretos com propriedades elétricas notáveis. Entretanto, pesquisas sobre as propriedades dos compósitos à base de cimento contendo Nanotubos de Carbono (CNTCS) são desafiadoras devido aos custos elevados dos NTC, dificultando a produção de um número significativo de amostras para testes experimentais ou a implementação em estruturas em escala real. Nesse contexto, a modelagem numérica surge como uma ferramenta eficaz para otimizar pesquisas, economizando tempo e recursos. Este trabalho propõe a aplicação de um modelo numérico baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF) para simular e analisar o comportamento elétrico do CNTCS. O modelo foi calibrado e validado em estudos passados por meio de análises analíticas e experimentais da literatura. As simulações numéricas de ensaios elétricos foram conduzidas em corpos de prova de CNTCS com amostras de 14 dias com teores de 0%, 1%, 1,5% e 2% de NTC em peso de cimento, variando as distâncias entre os eletrodos (4 cm, 8 cm e 12 cm). Os resultados destacam a influência significativa da distância entre os eletrodos no comportamento elétrico do CNTCS. A eficiência e precisão do modelo numérico foram comprovadas, estabelecendo-o como uma ferramenta excepcional para orientar o desenvolvimento de sensores SHM, oferecendo *insights* valiosos para otimizar a aplicação prática desses materiais em monitoramento estrutural.

Palavras-chave: compósito cimentício; nanotubos de carbono; materiais inteligentes; modelagem numérica.

ABSTRACT

Carbon Nanotubes (CNT) have helped in the development of smart materials, especially for structural health monitoring (SHM) applications. The interaction between nanotubes and cement composites has advanced the study of concretes with notable electrical properties. However, research into the properties of cement-based composites containing Carbon Nanotubes (CNTCS) is challenging due to the high costs of CNTs, making it difficult to produce a significant number of samples for experimental testing or implementation in full-scale structures. In this context, numerical modeling emerges as an effective tool for optimizing research, saving time and resources. This work proposes the application of a numerical model based on the Finite Element Method (FEM) to simulate and analyze the electrical behavior of the CNTCS. The model was calibrated and validated in past studies through analytical and experimental analyzes of the literature. Numerical simulations of electrical tests were conducted on CNTCS specimens with 14-day samples with contents of 0%, 1%, 1.5% and 2% of CNTS in cement weight, varying the distances between the electrodes (4 cm, 8 cm and 12 cm). The results highlight the significant influence of the distance between electrodes on the electrical behavior of the CNTCS. The efficiency and accuracy of the numerical model have been proven, establishing it as an exceptional tool to guide the development of SHM sensors, offering valuable insights to optimize the practical application of these materials in structural monitoring.

Keywords: Cement composite; Carbon Nanotubes; intelligent materials; numerical modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática de diferentes alótropos de carbono: a) grafite; b) diamante; c) fulereno; d) nanotubo de carbono de parede simples; e) nanotubo de carbono de parede múltipla; f) grafeno.....	20
Figura 4 – Esquema e dimensões (mm) do sensor à base de cimento de nanotubo de carbono.	24
Figura 5 – I) MWCNT na forma de um pó; II) imagem SEM do modo eletrônico secundário do MWCNT, utilizado no trabalho de Mesquita et al. (2023).....	25
Figura 6 – Ilustrativo do processo de preparação de amostras.....	26
Figura 7 – Escolha do modelo disponibilizadas pelo COMSOL.....	29
Figura 8 – Dimensões espaciais.....	29
Figura 9 – Escolha da Física.....	30
Figura 10 – Escolha do Estudo.....	31
Figura 11 – Tela inicial do COMSOL Multiphysics.	31
Figura 12 – Geometria do corpo prismático.....	32
Figura 13 – seleção da face para a elaboração dos eletrodos.	33
Figura 14 – Geometria dos eletrodos.	33
Figura 15 – Geometria dos eletrodos fixados no corpo prismático.....	34
Figura 16 – Sinalização das faces selecionadas para (I) o Terminal (II) e o Ground, distância 4 cm.....	36
Figura 17 – Sinalização das faces selecionadas para (I) o Terminal (II) e o Ground, distância 8 cm.....	36
Figura 18 – Sinalização das faces selecionadas para (I) o Terminal (II) e o Ground, distância 12 cm.....	37
Figura 19 – Malha definida para as simulações.	38
Figura 20 – Esquema elétrico para modelagem de cada componente, eletrodo I e corpo cimentício II dopado com NTC e III unidos.	39
Figura 21 – Condução do potencial elétrico no eletrodo metálico.....	43
Figura 22 – Condução do potencial elétrico no corpo cimentício após 14 dias de cura com teor de 0% em distâncias de 4 cm. Representação para todos os teores.....	43
Figura 31 – Corrente elétrica ao longo do tempo após 14 dias de cura com teor de 2% em distâncias de 4, 8 e 12 cm.....	48
Figura 33 – Resistência elétrica ao longo do tempo após 14 dias de cura com teor de 1% em distâncias de 4, 8 e 12 cm.....	50
Figura 34 – Resistência elétrica ao longo do tempo após 14 dias de cura com teor de 1,5% em distâncias de 4, 8 e 12 cm.....	51
Figura 35 – Resistência elétrica ao longo do tempo após 14 dias de cura com teor de 2% em distâncias de 4, 8 e 12 cm.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades do MWCNT utilizado.	25
Tabela 2 – Proporções das misturas.	26
Tabela 3 – Valores de corrente elétrica (A) a partir da Lei de Ohm.	42
Tabela 4 – Resultados da condutividade elétrica.	43
Tabela 5 – Resultados da corrente elétrica obtidos pelo Software.	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CNTCS	<i>Carbon Nanotube Cement-Based Sensor</i>
DWCNT	<i>Double - Wall Carbon Nanotubes</i>
EDO	Equação Diferencial Parcial
EC	<i>Electric Currents</i>
GUI	<i>Graphical User Interface</i>
MEF	Método dos Elementos Finitos
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MWCNT	<i>Multi-Wall Carbon Nanotubes</i>
NTC	Nanotubos de Carbono
SHM	<i>Structural Health Monitoring</i>
SWCNT	<i>Single-Wall Carbon Nanotubes</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

i	Corrente elétrica
U	Tensão
R	Resistência Elétrica
σ	Condutividade elétrica
L	Comprimento do material
A	área da seção transversal do material
ϵ_r	Permissividade relativa
c	Capacitância
d	Distância entre os eletrodos
ϵ_0	Permissividade do material

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Objetivo geral	19
1.2	Objetivos específicos	19
2	REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1	Nanotubos de carbono	20
2.2	Compósitos cimentícios reforçados com nanotubos de carbono	21
2.3	Propriedades elétricas de compósitos cimentícios incorporados com nanotubos de carbono	22
3	METODOLOGIA	24
3.1	Modelo experimental de Mesquita	24
3.2	Procedimento para a modelagem e análise numérica	27
3.2.1	<i>COMSOL Multiphysics®</i>	27
3.2.2	<i>Modelagem numérica</i>	28
3.2.2.1	<i>Geometria</i>	31
3.2.2.2	<i>Materiais</i>	34
3.2.2.3	<i>Física</i>	35
3.2.2.4	<i>Malha</i>	37
3.2.2.5	<i>Estudo</i>	38
4	RESULTADOS	42
5	CONCLUSÕES	52
5.1	Recomendações de estudos futuros	53
	REFERÊNCIAS	54

1. INTRODUÇÃO

Com a evolução das pesquisas em relação à nanotecnologia possibilitou o seu emprego em conjunto com materiais cimentícios, chamados de “concretos de terceira geração”. Nesse viés, a inserção dos nanotubos de carbono propiciou aumentos significativos de resistência à compressão e à flexão nesses compostos. Duart *et al.* (2015) verificaram que a inclusão de 2% de nanotubos ao compósito cimentício aumentou em 11% a sua resistência à compressão em relação ao traço de referência. Não obstante, a proporção de acréscimo em 5% de nanomaterial, obteve a elevação da resistência em 18% em comparação ao traço de referência utilizado (MARCONDES, 2012; MELO, 2009).

Os compósitos cimentícios apresentam uma composição estrutural complexa devido à presença de hidratos resultantes da hidratação do cimento. Por esta razão, ao longo do processo de hidratação do concreto, ocorre a formação de poros na estrutura, cuja origem e dimensões podem variar. Assim, a introdução de NTC pode contribuir significativamente para o preenchimento desses vazios, resultando em um aumento da compacidade do compósito, o que, por sua vez, resulta em um aumento das propriedades mecânicas do material. Ademais, o efeito das ligações dos NTC na matriz do concreto também desempenha um papel importante, uma vez que eles ocupam os espaços vazios e fissuras, permitindo a transferência eficiente de tensões por essa área (MARCONDES, 2012; MELO, 2009).

Além disso, a descoberta dos nanotubos de carbono proporcionou um enorme avanço em inúmeras áreas da ciência, como no desenvolvimento de materiais avançados e/ou inteligentes, dispositivos eletrônicos e células combustíveis. Dentre as variações do concreto, os NTC são opções para o monitoramento estrutural quanto ao comportamento mecânico, estático e dinâmico, além da correlação com propriedades eletromagnéticas (D'ALESSANDRO, 2020; MATERAZZI, 2013).

Os NTC são excepcionalmente multifuncionais devido à combinação de suas excelentes propriedades mecânicas com suas propriedades elétricas. Os nanotubos atingem uma densidade de corrente alta com médias em torno de 109 A/cm² (BAGGIO *et al.*, 2015). Em compostos cimentícios, as condições de condução dos NTC podem variar, seja pela composição da matriz seja pela dispersão, entre outros fatores (BILLIG, 2013). A força da ligação sp² entre os átomos de carbono nos nanotubos concebe a eles designação de material com maior resistência e dureza atualmente (KHARE *et al.*, 2005).

Com isto, muitas ramificações de pesquisas e estudos foram desenvolvidas com o intuito de se compreender os diversos tipos de materiais com enfoque em sua capacidade piezoresistiva. Acerca dos nanotubos de carbono, observou-se que mesmo aqueles com uma pequena energia requerida de condução mostraram altas mudanças em sua resistência e principalmente, na piezoresistividade, comprovando que os nanotubos são materiais promissores e com uma ótima capacidade responsiva para o seu uso, identificando pequenos estresses e pressões (CHUNG, 2020; CHEN *et al*, 2019).

Silvestre (2022) concluiu que, referente às propriedades condutivas e elétricas dos nanotubos de carbono, uma quantidade de nanotubos maior do que 1% faz com que a condução aumente e que haja dois locais divergentes, um dependente da frequência e outro não. Concomitantemente, a permissividade, propriedade ligada ao campo elétrico de um respectivo material, irá apresentar maiores valores, aumentando a polarização existente na interface do material, comprovando assim as suas promissoras características elétricas e contribuindo para o seu uso dentro de investigações estruturais.

Os estudos experimentais das propriedades eletromecânicas exigem tempo e custos elevados, problemáticas que podem ser superadas com a utilização da modelagem numérica baseada no Método dos elementos finitos. A criação de um modelo numérico a partir de estudos anteriores possibilita a caracterização da influência dos inúmeros parâmetros no comportamento eletromecânico da matriz cimentícia com NTC, tendo extrema importância para a difusão de materiais inteligentes que viabilizam o monitoramento de seu comportamento.

Os seguintes estudos ratificam a importância da modelagem numérica. Curci (2022) modelou computacionalmente materiais cimentícios sob carregamentos mecânicos e térmicos. As primeiras abordagens do campo de deformações foram estipuladas via Matlab, assim seu pós-processamento foi realizado dentro do programa GID. Nele, o modelo trata-se de um modelo estrutural com uma formulação geométrica não linear a qual estabelece as deformações e efeitos térmicos. Esta modelagem foi tratada pelo então Método dos elementos finitos com a discretização em modelos de domínio bidimensional. Em razão desse estudo, elenca-se as vantagens do uso dessa modelagem no que tange ao ganho de dificuldade nos problemas analisados.

A principal fundamentação do Método dos elementos finitos é a validação dos modelos experimentais, sendo assim é realizada a calibração entre esses métodos. Dessa forma, é possível obter, numericamente, fatores de concentração de tensões para diversas configurações (NONATO, 2022).

Como forma de contribuir para a disseminação da área, este estudo propõe a implementação de um modelo numérico utilizando o Método dos elementos finitos para analisar o comportamento dielétrico de amostras cimentícias com nanotubos de carbono de paredes múltiplas, ou seja, entender como a adição desses materiais afeta as propriedades elétricas dos compósitos cimentícios. O modelo foi calibrado e validado com base em estudos analíticos e experimentais da literatura. Com isso, as simulações numéricas tem enfoque na influência elétrica nas amostras.

1.1. Objetivo geral

Simular e analisar o comportamento dielétrico de compósitos à base de cimento contendo nanotubos de carbono, baseado no método dos elementos finitos, visando sua aplicação efetiva no desenvolvimento futuro de sensores para o monitoramento de integridade estrutural na construção civil.

1.2. Objetivos específicos

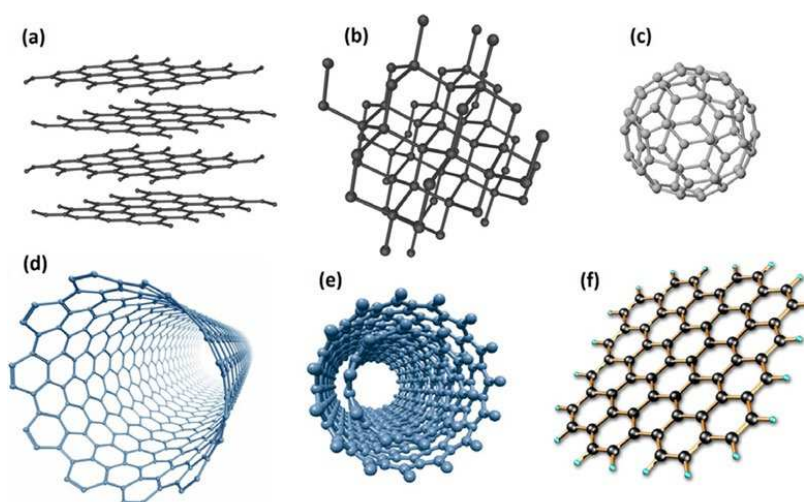
- Desenvolver um modelo numérico baseado no MEF para compósitos à base de cimento com nanotubos de carbono;
- Conduzir simulações numéricas com diferentes distâncias entre os eletrodos (4 cm, 8 cm e 12 cm) em corpos de prova de CNTCS, explorando e quantificando a influência dessa variável crucial no comportamento elétrico do material compósito.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Nanotubos de carbono

O carbono é um elemento abundante na natureza e é frequentemente considerado o elemento fundamental da vida. Sua notável versatilidade desperta grande interesse, exigindo esforços substanciais para uma compreensão mais profunda. A versatilidade do carbono deriva de sua capacidade de hibridização. Com quatro elétrons de valência, seus orbitais de ligação podem combinar-se de várias maneiras. A Figura 1 ilustra algumas das estruturas de carbono relevantes (OLIVEIRA, 2009; ROA, 2008).

Figura 1 – Representação esquemática de diferentes alótropos de carbono: a) grafite; b) diamante; c) fulereno; d) nanotubo de carbono de parede simples; e) nanotubo de carbono de parede múltipla; f) grafeno.



Fonte: Adaptado de ZARBIN (2013).

Em 1991, Sumio Iijima, enquanto estudava a síntese do fulereno (estrutura de faces pentagonais e hexagonais de carbono com hibridização sp^2), através do método de vaporização de grafite pela descarga de arcoelétrico realizou a descoberta dos nanotubos de carbono de paredes múltiplas. A descoberta dos Nanotubos de Carbono proporcionou um enorme avanço em inúmeras áreas da Ciência, como no desenvolvimento de materiais avançados e/ou inteligentes, dispositivos eletrônicos e células combustíveis.

Os nanotubos de carbono consistem em estruturas compostas por cadeias hexagonais de carbono que se organizam em formato cilíndrico, podendo apresentar uma ou

várias camadas. As características e propriedades dos NTC são fortemente influenciadas pelo diâmetro e ângulo das cadeias. (HERBST, 2004).

A classificação dos nanotubos de carbono também pode ser feita em relação a quantidade de camadas que o mesmo irá apresentar, podendo ser uma única camada (SWCNT - single-wall carbon nanotubes), duas ou mais camadas (MWCNT- *multi-wall carbon nanotubes*) e por fim, não comumente utilizado, o de parede dupla (DWCNT - *double - wall carbon nanotubes*). Dentre essas categorias, os MWCNT são os mais utilizados devido as primeiras pesquisas e aprofundamentos terem enfoque em seu uso. Ademais, os nanotubos com múltiplas paredes apresentam melhores propriedades condutivas e metálicas (SOUZA FILHO, 2007; ZARBIN, 2013).

2.2. Compósitos cimentícios reforçados com nanotubos de carbono

As pesquisas voltadas para a investigação do comportamento dos nanotubos de carbono em compostos cimentícios usualmente analisam o seu comportamento frente a suas diversas quantidades, além das suas resistências geradas devido a esforços atuantes. O estudo de Li *et al.* (2004) demonstrou que as propriedades mecânicas das argamassas de cimento melhoraram substancialmente com a inclusão de nanopartículas, resultando em um aumento significativo da resistência à compressão dessas argamassas.

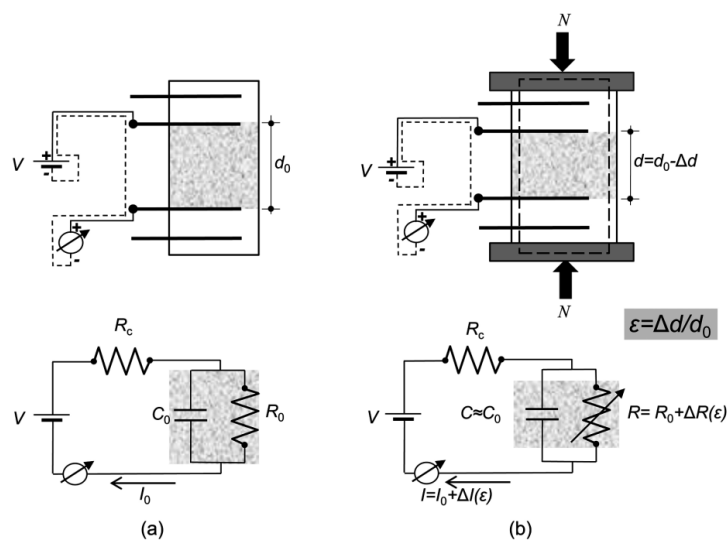
Além disso, MacLeod *et al.* (2020) utilizaram-se de concentrações igual a 2,5; 5 e 10% de nanotubos de carbono presentes em concreto de cimento Portland de alta resistência e comum, sendo o maior valor aquele que apresentou resultados mais concisos e benéficos em relação a resistência à compressão.

Além da utilização de métodos desde a dosagem até os ensaios com corpos de prova, o estudo da matriz cimentícia dopada com nanotubos de carbono carece de condições de contornos específicas para a obtenção de processamentos mecânicos válidos relacionados com respostas elétricas, quer seja os ensaios laboratoriais estáticos, quer seja dinâmicos. Observa-se a influência dos fatores geométricos nos resultados, podendo destacar a variação da resistência interna (R_o) causada pelo distanciamento dos eletrodos. Dessa forma, as variantes nas condições de contorno tendem a limitar os resultados, deixando um espaço entre os ensaios laboratoriais e a aplicabilidade dos nanotubos de carbono em estruturas existentes.

M. Siahkouhi *et al.* (2021) constataram que, para se utilizar os nanotubos de carbono como um mecanismo com finalidade de averiguar a saúde de uma determinada estrutura, deve-se se atentar aos esforços que a estrutura será submetida, visto que esforços de

compressão irão diminuir a resistividade elétrica enquanto a tração irá aumentá-la. Além disso, D'Alessandro (2015) desenvolveu um modelo matemático, baseado em um circuito passivo concentrado, para simular o comportamento eletromecânico de corpos de prova de uma matriz cimentícia com nanotubos de carbono. O modelo compreende em um capacitor, associado à polarização interna do compósito, juntamente com dois resistores, referente à condutividade da interface eletrodos-sensores e do compósito. A deformação mecânica do composto modula os parâmetros do circuito, resultando assim em uma resposta elétrica dependente da deformação do sensor, notado na Figura 2.

Figura 2 – Modelo eletromecânico de um corpo de prova: amostras (a) descarregadas e (b) descarregadas. (D'Alessandro,2015).



Fonte: D'Alessandro (2015).

2.3. Propriedades elétricas de compósitos cimentícios incorporados com nanotubos de carbono

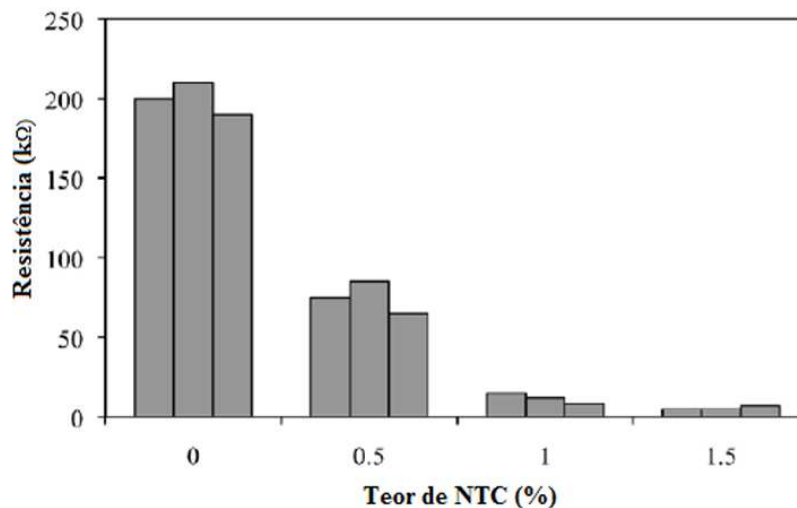
As notáveis propriedades elétricas dos nanotubos de carbono são, em grande parte, atribuídas à sua estrutura unidimensional (1-D) e à peculiar configuração do grafite. Com isso, a resistência elétrica ocorre quando um elétron colide com algum defeito na estrutura cristalina que atravessa, sendo esses defeitos, por exemplo, átomos de impureza, desordens na estrutura cristalina ou vibrações atômicas fora de suas posições no cristal. Tais colisões desviam a trajetória do elétron (KHARE; BOSE, 2005 apud HAN *et al.*, 2011).

No entanto, dentro da estrutura dos NTC, os elétrons não são facilmente dispersos, já que não têm as mesmas oportunidades de dispersão que ocorrem em condutores tridimensionais (3-D). Os NTC são capazes de suportar densidades de corrente mais elevadas

do que qualquer outro material conhecido, podendo atingir valores médios tão altos quanto 109 A/cm^2 . Os compósitos cimentícios contendo nanotubos de carbono podem exibir uma ampla gama de variações em relação às condições de condução elétrica e propriedades piezorresistivas, influenciadas por diversos fatores. Estes fatores englobam o tipo de NTC, sua concentração, a área superficial, a uniformidade de dispersão e a composição da matriz, conforme mencionado por HAN *et al.* (2011).

No que diz respeito às concentrações de nanotubos de carbono em nanocompósitos, observa-se uma acentuada redução na resistência elétrica à medida que a concentração aumenta de 0 a 0,5% em volume de cimento, como demonstrado na Figura 3. No entanto, o aumento da concentração para além de 1% não resulta em variações significativas, fato que pode estar atrelado ao limiar de percolação, em excede o limiar de percolação, em que a condução de contato domina a condutividade elétrica, mencionado por BILLIG (2013). Outro fator que influencia a resistência elétrica é a aplicação de cargas de tração ou compressão no nanocompósito, como destacado por SAAFI (2009).

Figura 3 – Efeito da concentração de nanotubos de carbono sobre a resistência elétrica de nanocompósitos.



Fonte: Adaptado BILLIG, 2013.

Segundo as observações de KONSTA-GDOUTOS *et al.* (2010), foi notada uma variação na resistência elétrica da pasta de cimento e da argamassa de cimento reforçada com nanotubos de carbono funcionalizados com grupos carboxila sob repetidas cargas de compressão e carregamento impulsivo. Os resultados revelaram que a resistência elétrica tanto da pasta de cimento, com a adição de 0,1% de NTC, quanto da argamassa de cimento, com 0,4% de NTC, diminuiu após a compressão e aumentou durante o descarregamento.

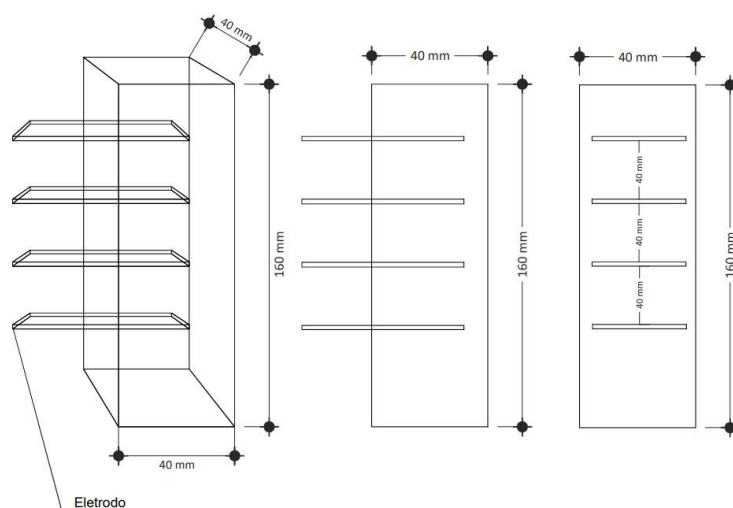
3. METODOLOGIA

3.1. Modelo experimental de Mesquita

O estudo experimental explorado neste trabalho foi desenvolvido por Mesquita *et al.* (2023), em que foram realizados ensaios com corpos de prova, de dimensões de $40 \times 40 \times 160$ mm³, visualizado na Figura 4, de compósito cimentício incorporados com MWCNT com teores de 0%, 1%, 1,5% e 2% em relação ao peso do cimento. Uma diferença de potencial estabilizada foi aplicada através dos eletrodos inseridos nas amostras para observação do comportamento condutivo do compósito. Vale ressaltar que esta diferença de potencial simula possíveis deformações mecânicas, às quais os sensores devem responder. Além disso, as amostras foram conectadas através de cabos coaxiais a um multímetro digital, cuja função é medir a corrente que passa pela amostra durante um intervalo de tempo específico (MESQUITA *et al.*, 2023).

Além disso, os corpos de prova foram elaborados a partir de cimento Portland padrão (PC) CEM II/B-S 42.5, atendendo também a ABNT NBR 16697 (2018) e a norma britânica, BS-EN197 (2011), utilizando água potável, com densidade e superfície específica de Blaine e água potável (MESQUITA *et al.*, 2023).

Figura 2 – Esquema e dimensões (mm) do sensor à base de cimento de nanotubo de carbono.

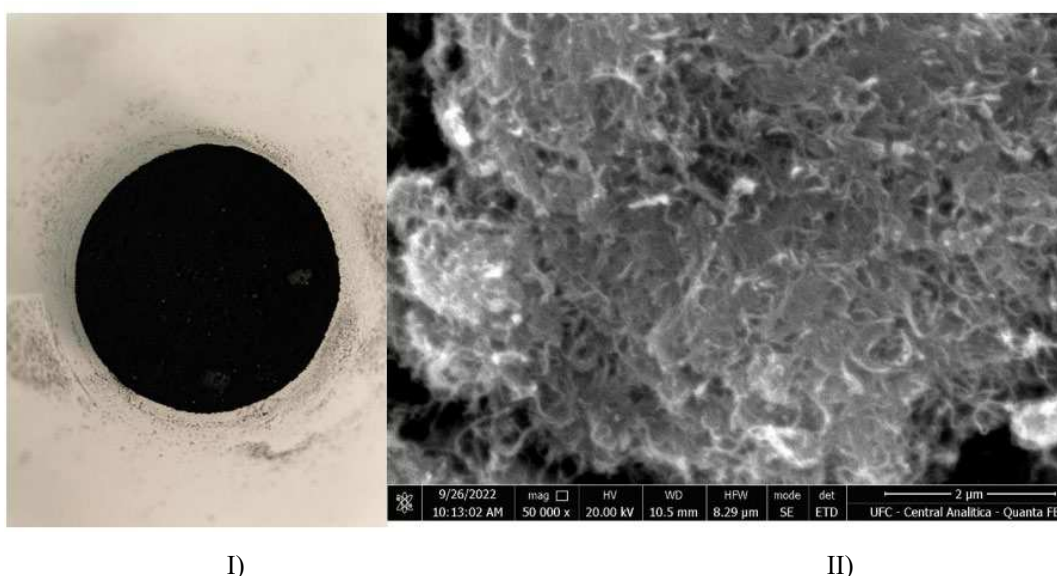


Fonte: Autor (2023).

Os MWCNT foram escolhidos devido à sua notável sensibilidade à deformação, em contraste com os nanotubos de parede simples, SWNTC, uma vez que a resistência elétrica dos

MWCNT pode variar na faixa de 0,2 a - 0,4 $k\Omega \cdot \mu m$ (ZAMKOV, 2006). A capacidade de eles estabelecerem múltiplos pontos de contato elétrico na mistura contribui significativamente para o aumento da condutividade do material. Os nanotubos de paredes múltiplas funcionalizados foram fornecidos na forma de um pó, Figura 5-I pela CTNano (UFMG). Conforme revelado pela observação em Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) na Figura 5-II, esses nanotubos exibem uma estrutura unidimensional com um diâmetro próximo a 20 nm. As propriedades físicas detalhadas do nanomaterial funcionalizado podem ser encontradas na Tabela 1 (MESQUITA *et al.*, 2023).

Figura 3 – I) MWCNT na forma de um pó; II) imagem SEM do modo eletrônico secundário do MWCNT, utilizado no trabalho de Mesquita *et al.* (2023).



Fonte: Mesquita *et al.* (2023).

Tabela 1 – Propriedades do MWCNT utilizado.

Propriedades	Descrição/valor
Aparência	Pó preto
Diâmetro externo	10-30 nm
Comprimento	1-10 μm
% Carbono	> 95%
Condutividade elétrica	> 100 S/cm

Fonte: CTNano (UFMG, 2022).

Com isso, quatro pastas de cimento foram preparadas, incorporando 0%, 1%, 1,5% e 2% de MWCNT em relação ao peso do cimento. A relação peso água/cimento (a/c)

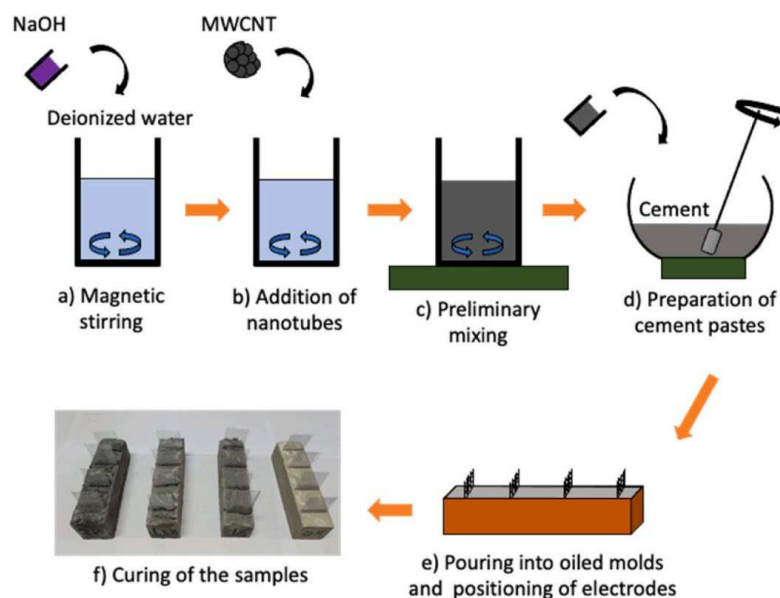
permaneceu constante em 0,45 para todas as pastas. Os detalhes das proporções de mistura das pastas de cimento estão apresentados na Tabela 2. Destaca-se que este estudo se concentrou na avaliação do efeito isolado do NaOH como agente dispersante para os nanotubos de paredes múltiplas, portanto, não houve utilização de superplastificantes ou outros agentes dispersantes, a fim de evitar possíveis interações indesejadas entre esses componentes. Além disso, o NaOH foi incorporado exclusivamente nas composições contendo NTC, desempenhando o papel de agente dispersante para os nanomateriais, observado no esquema da Figura 6.

Tabela 2 – Proporções das misturas.

<i>Proporções da Mistura (Kg/m³)</i>				
<i>Material Constituinte</i>	MWCNT C0%	MWCNT C1%	MWCNT C1.5%	MWCNT C2%
<i>Cimento</i>	1277	1241	1241	1241
<i>Água</i>	574	558	558	558
<i>MWCNT</i>	-	12,41	18,62	24,82
<i>Proporções a/c</i>	0,45	0,45	0,45	0,45
<i>MWCNT/c</i>	0,0%	1,0%	1,5%	2,0%

Fonte: Mesquita *et al.* (2023).

Figura 4 – Ilustrativo do processo de preparação de amostras.



Fonte: Mesquita *et al.* (2023).

Por fim, os eletrodos de aço, com dimensões 70x35x1,1 mm, foram embutidos nas amostras para garantir uma boa conexão com o material de detecção. Dessa forma, para a

realização do ensaio, utilizou-se o das 2 sondas ou método dos 2 pontos, em que os eletrodos serviram para aplicar a diferença de tensão. Vale destacar que alguns autores utilizam o método de quatro pontos, o mais difundido quando se trata de determinação da resistividade elétrica de semicondutores e condutores metálicos, em que as pontas que medem a corrente são conectadas aos eletrodos externos, assim, as sondas são responsáveis por monitorar a tensão entre elas e a diferença de potencial nos dois eletrodos internos.

No entanto, esta tensão não é a mesma tensão aplicada pela fonte, mas sim a tensão causada pelo campo elétrico resultante da tensão gerada pela fonte. É o método mais eficaz em termos de velocidade, garantindo a precisão dos resultados. Procedimento semelhante não foi implementado neste trabalho, pois, considerando a alta resistividade do material, um aumento na distância dos eletrodos ativos teria resultado em intensidades de corrente muito baixas, difíceis de serem medidas em taxas de amostragem suficientes para investigar fenômenos dinâmicos (AVILÉS, 2019).

3.2. Procedimento para a modelagem e análise numérica

O uso de simulações numéricas tornou-se uma ferramenta de trabalho indispensável para pesquisadores de diversas áreas. Estas simulações permitem desenvolver protótipos virtuais do produto de interesse, onde os modelos podem ser criados por softwares comerciais como o AltoQi Eberick, fornecendo meios para criar um modelo 3D da estrutura, realizar análises de carga, dimensionamento. Elementos estruturais como pilares, vigas e lajes, este é um software voltado para projetos de concreto armado. Para as simulações dos estudos numéricos descritos neste trabalho, o *software* COMSOL *Multiphysics*® foi escolhido por sua interface interativa e capacidade de acoplar múltiplas grandezas físicas em um único modelo.

3.2.1. COMSOL Multiphysics®

O *software* comercial COMSOL *Multiphysics*® foi projetado para realizar simulações numéricas usado principalmente para modelagem e simulação de fenômenos físicos e sistemas complexos, além disso, é amplamente utilizado em diversas áreas de aplicação, como engenharia, física e ciências naturais. Os cálculos são baseados no Método dos Elementos Finitos, que consiste em decompor e dividir o domínio do problema (seja simples ou complexo) em elementos infinitesimais, onde o programa compila e resolve uma Equação Diferencial Parcial para cada elemento criado, em que as simulações são computadas para obter a

convergência do problema. O campo de trabalho oferecido pelo COMSOL é amplo e variado, proporcionando um escopo considerável para simulação. Para executar uma simulação, o usuário deve selecionar a grandeza física envolvida no problema.

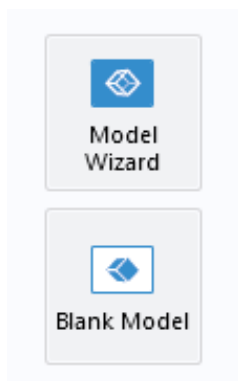
O campo de trabalho disponibilizado pelo COMSOL é amplo e variado, proporcionando um escopo considerável para simulação. Para a execução de uma simulação qualquer, o usuário deve selecionar a geometria, com dimensões disponibilizadas, como 3D, 2D Axisymmetric, 2D, 1D Axisymmetric, 1D e 0D. Em seguida, a seleção da Física que está envolvida no problema, na qual estão distribuídas em módulos, além disso, o *software* possibilita o incremento de várias grandezas físicas em um único problema de estudo, ideal para simulações que envolvem diferentes grandezas físicas. Por fim, seleciona o estudo que irá ser realizado para o problema.

O principal objetivo deste trabalho é realizar simulações numéricas de um corpo cimentício prismático dopado com nanotubos de carbono, com diferentes teores, apresentando dimensões 40x40x160 mm, em que são fixados, em seu corpo, telas metálicas, com malha de abertura de 2,70 mm, representando eletrodos, para que uma tensão de 1,5 V seja aplicada, com o fito de analisar a influência dos teores em relação a condução de corrente elétrica no material em diferentes distâncias entre as malhas. Além disso, verificou-se a influência da distância entre os eletrodos na sua resistência elétrica. Foram analisadas todas as etapas para realizar a modelagem, como a definição da dimensão espacial, desenho da geometria, seleção dos materiais, físicas e estudos, serão discutidas no decorrer do capítulo de forma detalhada.

3.2.2. Modelagem numérica

Inicialmente, ao abrir o *software*, é apresentada ao usuário a página do modelo, que apresenta ao usuário duas opções: Um assistente de modelo (*Model Wizard*), que fornece auxílio na construção do modelo proposto, dimensões espaciais, interfaces físicas e estudos necessários e o modelo em branco (*Blank Model*), em que não fornece nenhum modelo configurado no *Model Builder* ou retorna ao COMSOL Desktop padrão, assim, o usuário é livre para adicionar componentes físicos e interfaces ao modelo. A Figura 7 apresenta as opções de escolha para o desenvolvimento do modelo.

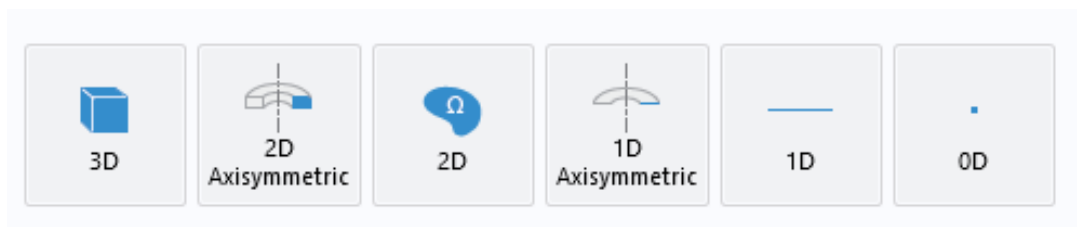
Figura 5 – Escolha do modelo disponibilizadas pelo COMSOL.



Fonte: Autor (2023).

Com isso, o processo mencionado abaixo será realizado selecionando o assistente de modelo, devido a facilidade durante a construção do modelo. Desse modo, após definir a página do modelo, escolhemos a geometria que irá descrever o problema. No entanto, esta escolha está relacionada com a simetria do problema, permitindo ao utilizador escolher entre dimensões 3D, 2D *Axisymmetric*, 2D, 1D *Axisymmetric*, 1D e 0D do espaço de modelação, conforme apresentado na Figura 8.

Figura 6 – Dimensões espaciais.



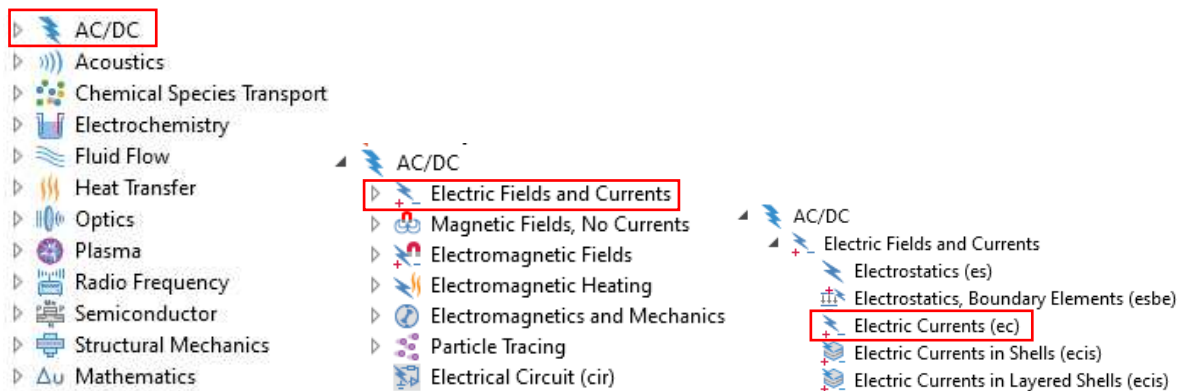
Fonte: Autor (2023).

O poder computacional necessário para processar uma simulação aumenta à medida que as dimensões espaciais se expandem. Os protótipos desenvolvidos, para as medições da resistividade elétrica, foram desenhados com uma geometria utilizando a dimensão 3D, apesar do tempo de processamento, a escolha se resume a maior precisão com os resultados do sistema real, permitindo capturar detalhes de forma mais precisa e realista para a análise do problema.

Definida a dimensão espacial, a próxima etapa é selecionar a física envolvida no problema. Assim, será realizado um ensaio de resistividade elétrica do material cimentício incorporado com nanotubos de carbono, em diferentes teores de nanotubos, através do Método duas pontas (ou de dois terminais), em que será aplicado uma diferença de potencial constante,

afim de medir a corrente elétrica que flui através da amostra sob a ação de um campo elétrico aplicado. Com isso, necessita-se de aplicação de uma física que atenda a essa análise de problema proposto. Dentre a gama de físicas disponibilizadas pelo *software*, opta-se pela Física *Electric Currents* (EC), que possibilita estudar a corrente em meios condutores sob condições em que os efeitos indutivos são desprezíveis, quando a profundidade da pele é muito maior que o aparelho estudado. A Figura 9 apresenta a escolha da Física para a realização da simulação.

Figura 7 – Escolha da Física.

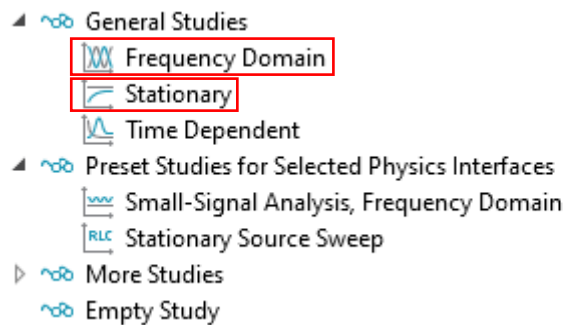


Fonte: Autor (2023).

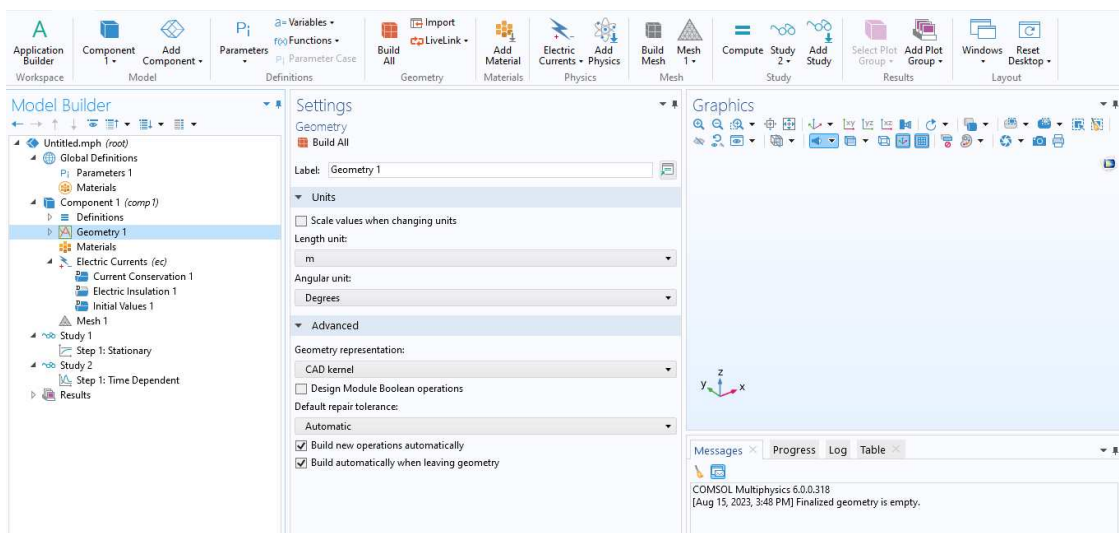
Em seguida, foi determinado o tipo de estudo que seria feito durante a simulação. O *software* disponibiliza vários tipos de estudos no módulo *Study*, e como o nosso estudo envolve analisar a corrente e resistividade elétrica, o *Stationary* e o *Time Dependent* foram os escolhidos. O primeiro se dedica em calcular a resposta para uma situação estacionária, em que as variáveis não mudam com o tempo. Já o estudo *Time Dependent* será utilizado para a verificação das variações ao longo do tempo. A Figura 10 apresenta a escolha do estudo para as simulações que serão realizadas.

Com isso, após as definições iniciais da simulação, é apresentado ao usuário a tela de trabalho da simulação (Figura 11) está contida na *Graphical User Interface* (GUI) e é dividida em três partes: o *ModelBuilder*, onde são organizados os blocos de simulação (geometria, materiais, condições de contorno, estudos e resultados), conhecidos como árvores ou nós, em que o usuário pode adicionar ou retirar livremente cada item conforme sua necessidade; um bloco de configuração, onde podem ser configurados e editados; e a *Graphics*, dedicado a mostrar o trabalho realizado durante a simulação.

Figura 8 – Escolha do Estudo.



Fonte: Autor (2023).

Figura 9 – Tela inicial do COMSOL *Multiphysics*.

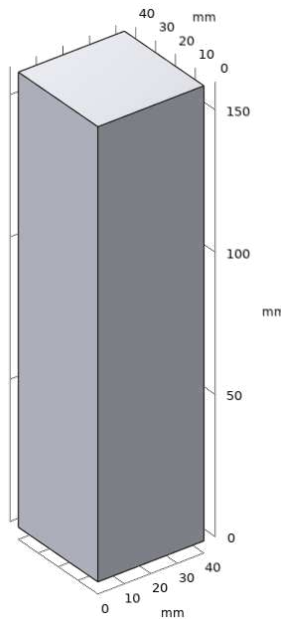
Fonte: Autor (2023).

3.2.2.1. Geometria

Para projetar as estruturas a serem estudadas, o COMSOL fornece o nó *Geometry* onde várias formas geométricas podem ser desenhadas, desde as formas mais simples, como retângulos, círculos, esferas e cilindros, até formas mais complexas, como polígonos e curvas. Muitas dessas geometrias já são fornecidas no *software*, mas os arquivos de geometria no formato CAD podem ser importados e modelados. Devido à simplicidade de projetar o objeto de pesquisa deste trabalho, neste caso um corpo maciço cimentício prismático dopado com nanotubos de carbono com eletrodos fixados em sua superfície, serão utilizadas as ferramentas disponibilizadas por este *software*.

Inicialmente foi feito somente o desenho do corpo prismático, deixando os eletrodos para serem realizados posteriormente. Para a criação do corpo prismático, selecionou na barra de ferramentas do nó Geometry a opção Block, em que o usuário adiciona nas especificações size and shape, as seguintes dimensões: 40x40x160 mm, não sendo alterado essas dimensões para a realização das simulações com teores de nanotubos diferentes. Com isso, após a criação da geometria, visualizado na Figura 12, prepare-se para a criação dos eletrodos.

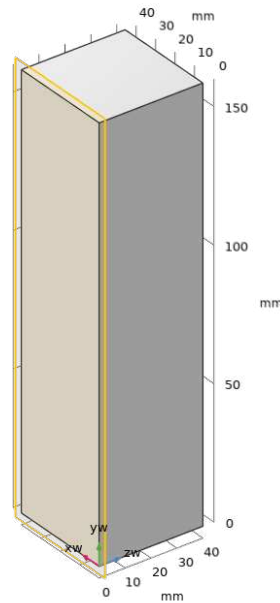
Figura 10 – Geometria do corpo prismático.



Fonte: Autor (2023).

Assim, após a criação do corpo prismático, foi desenvolvido os eletrodos, para a reprodução do método das duas sondas onde os mesmos eletrodos de aço inoxidável serviram para aplicar a diferença de tensão e para medir a intensidade da corrente. Com isso, eles ficaram dispostos entre si a uma distância de 40 mm. Com isso, para obter uma melhor desenvoltura na criação, foi selecionado na barra de ferramentas a opção *Work Plane* em que definimos um plano para definir objetos 2D em 3D, como extrudar um objeto 2D em um 3D, além disso, uma ótima função para definir o posicionamento dos objetos em uma determinada peça, no nosso caso, determinar as coordenadas dos eletrodos no corpo prismático. Assim, após a escolha da face em que seria trabalhada no plano para união dos eletrodos com o corpo cimentício dopado com nanotubos de carbono, observado na Figura 13, que será trabalhado para o desenvolvimento do desenho.

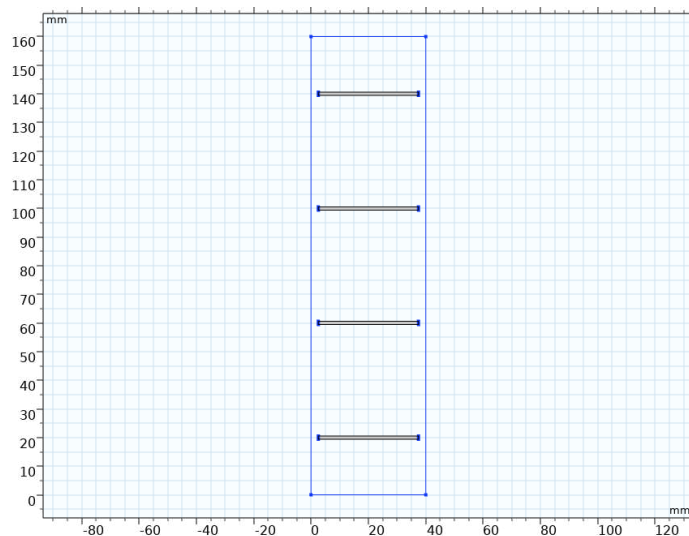
Figura 11 – seleção da face para a elaboração dos eletrodos.



Fonte: Autor (2023).

Após a seleção do plano que será trabalhado, na barra de ferramentas do nó *Plane Geometry*, optou-se pela seleção de uma geometria retangular, onde foi colocado as dimensões dos eletrodos, apresentados no plano experimental, com as seguintes dimensões: 70x35x1,1 mm, assim, inseridas no *Size and Shape* a largura e a altura, e em seguida, a posição em que se encontra o eletrodo. Com isso, criado a primeira geometria retangular, realizou-se a cópia da geometria criada, ajustando apenas os espaçamentos entre si. A Figura 14, apresenta a geometria dos eletrodos.

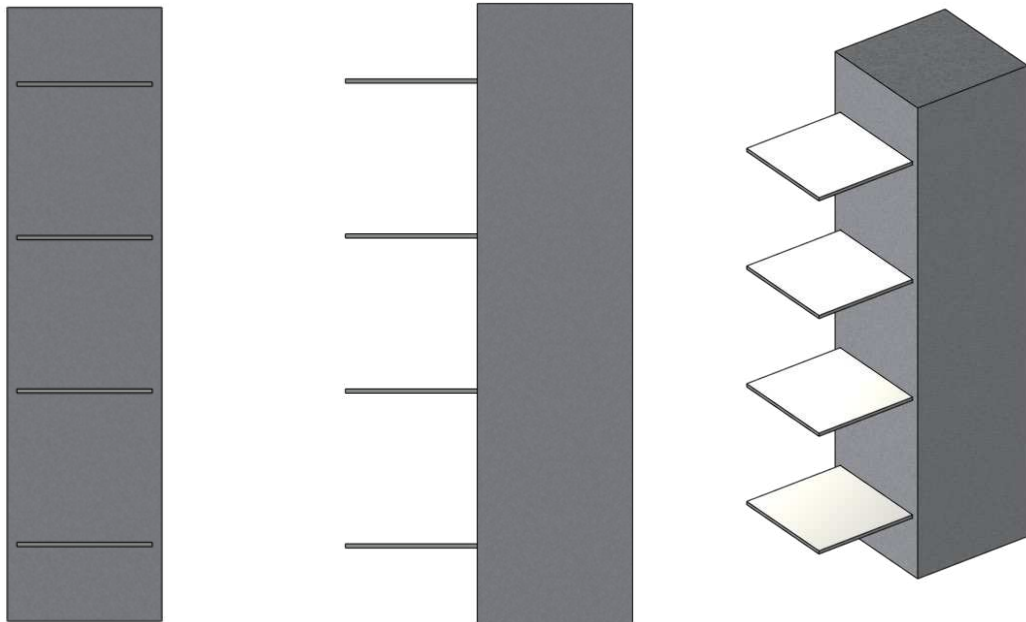
Figura 12 – Geometria dos eletrodos.



Fonte: Autor (2023).

Com isso, realizado o desenho da geometria em 2D, foi necessário transformar os objetos em 3D a partir da extrusão, selecionado na barra de ferramentas do nó *Work Plane*, que selecionando o objeto que será extrudado, necessita-se apenas fornecer o comprimento que será extrudado, vale salientar que, inserir um valor positivo ou negativo, influencia na orientação do eixo que foi proposto, no nosso caso, inserido -36 mm, sendo direcionado para fora, e 34 mm, por sua vez, direcionado para dentro do protótipo, totalizando um comprimento de 70 mm. Com isso, feito o acoplamento geométrico, visualizado na Figura 15, a próxima etapa da simulação a definir é a escolha dos materiais em cada objeto criado.

Figura 13 – Geometria dos eletrodos fixados no corpo prismático.



Fonte: Autor (2023).

3.2.2.2. *Materiais*

Para a seleção dos materiais utilizados em cada componente da simulação podem ser escolhidos e importados no nó *Materials*, que é a biblioteca de materiais disponibilizada pelo próprio *software*. Outra opção é adicionar o material se ele não estiver na biblioteca do *software* COMSOL. Assim, foi necessário realizar a criação manual dos materiais, visto que as opções disponíveis na biblioteca do *software* não atendiam. Com isso, o material do corpo prismático e dos eletrodos foram definidos como *Cement paste doped with NTC* e *Stainless steel*, respectivamente, análogo ao trabalho experimental realizado. Assim, foram inseridas as

propriedades que nos importavam para o estudo, Permissividade relativa e Condutividade elétrica, sendo inalteradas as propriedades dos eletrodos no decorrer das simulações, alterando apenas as propriedades da pasta cimentícia dopada com nanotubos de carbono de paredes múltiplas, visto que os teores e as distâncias das medições mudaram.

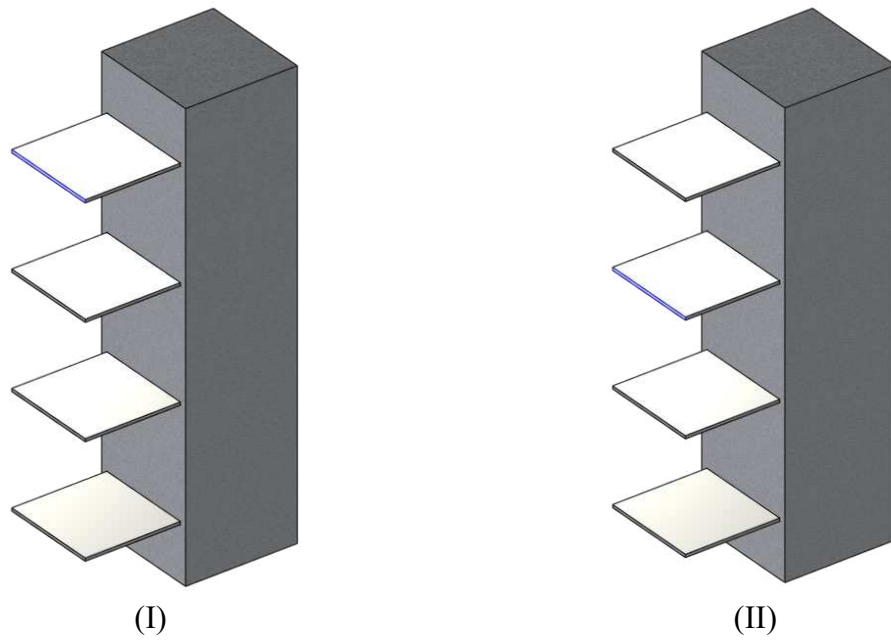
3.2.2.3. Física

Com a escolha dos materiais para a simulação, foi definido a Física do problema. Assim, utilizou-se o módulo *Electric Currents* (EC), da árvore de trabalho do *software* COMSOL, que nos permite analisar os efeitos do potencial elétrico, aplicado na face do eletrodo, no corpo cimentício dopados com nanotubos de carbono de paredes múltiplas.

Assim, quando a física é adicionada, são adicionados nós padrão no *Model Builder*: *Current Conservation*, atrelada para definir a condutividade elétrica, *Electric Insulation*, condição de limite padrão, adiciona isolamento elétrico como condição de limite, respeitando a conservação da carga elétrica, e *Initial Values*, em que o usuário adiciona um valor de potencial elétrico para a simulação. Assim, adicionou-se um *Terminal*, condição que fornece uma conexão com circuitos externos, a linhas de transmissão ou com uma tensão ou carga especificada. Dentro do nó, especifica-se qual terminal será conectado, podendo ser *Circuit*, *Current*, *Voltage* ou *Power*. O *Terminal* escolhido foi *Voltage*. Além disso, aplica-se o nó *Ground*, utilizado para definir um ponto de referência de potencial elétrico zero, $V=0$.

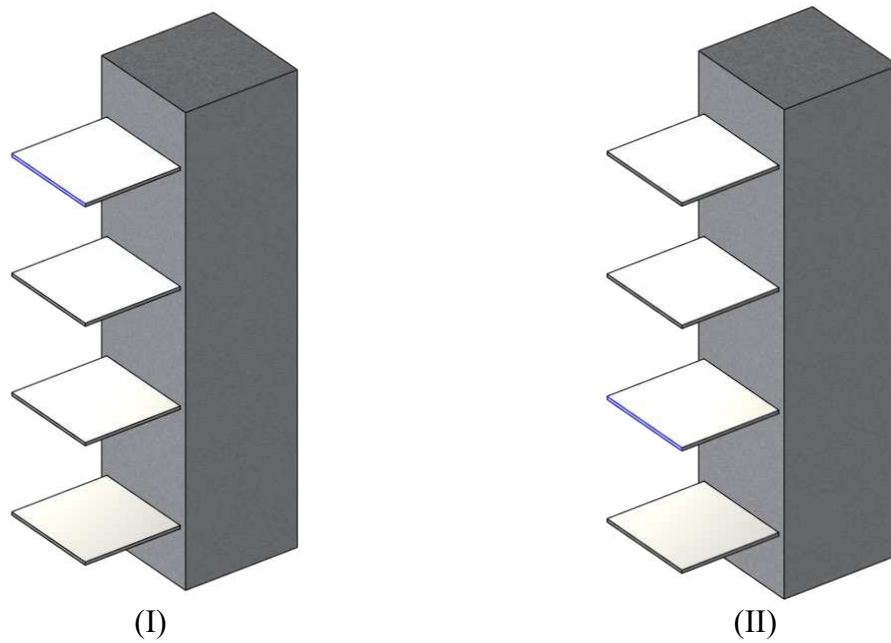
Após a seleção das condições, foi indicado quais objetos criados fariam parte dessa interação, desse estudo. Inicialmente, todos os objetos geométricos foram escolhidos para o estudo. Além disso, notou-se a necessidade de indicar ao *software* onde estaria o *Terminal*, sendo selecionado a face de aplicação do potencial de 1,5 V, e estaria o *Ground*, referente ao caminho de retorno da corrente à fonte elétrica, de acordo com o ensaio experimental. A Fig. 16, 17 e 18 apresenta a aplicação das faces para as condições inseridas, referente à distância entre os eletrodos de 4, 8 e 12 cm, respectivamente, utilizada.

Figura 14 – Sinalização das faces selecionadas para (I) o *Terminal* (II) e o *Ground*, distância 4 cm.



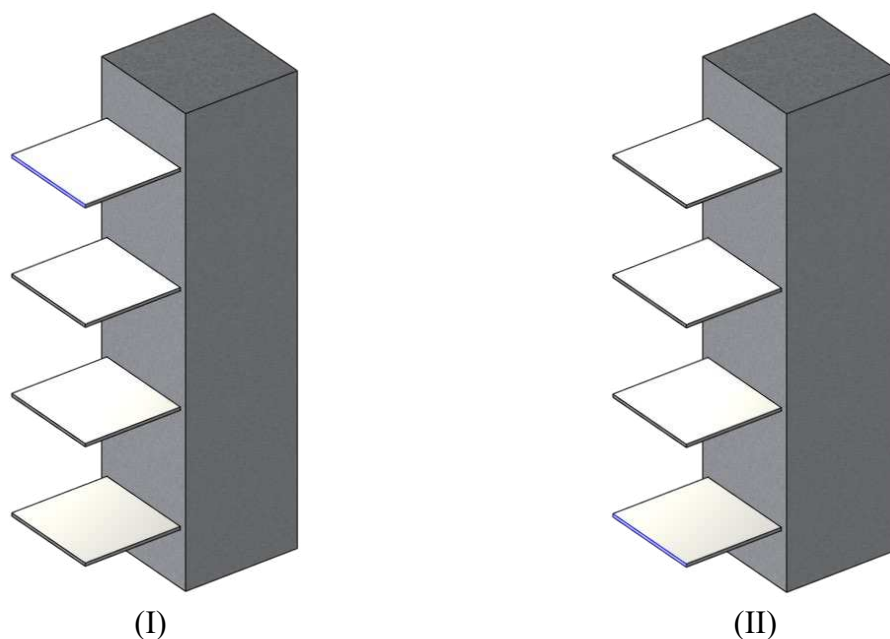
Fonte: Autor (2023).

Figura 15 – Sinalização das faces selecionadas para (I) o *Terminal* (II) e o *Ground*, distância 8 cm.



Fonte: Autor (2023).

Figura 16 – Sinalização das faces selecionadas para (I) o *Terminal* (II) e o *Ground*, distância 12 cm.



Fonte: Autor (2023).

3.2.2.4. *Malha*

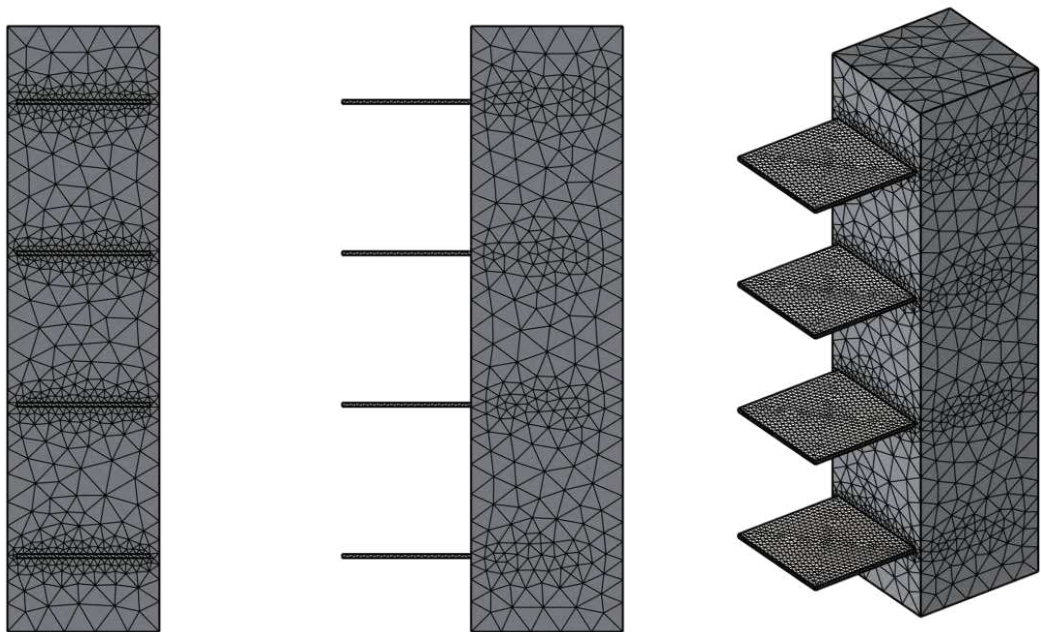
A discretização da geometria na simulação é realizada através do uso do recurso "Nó de Malha" disponibilizado pelo *software* COMSOL. Este nó desempenha o papel fundamental de dividir a geometria do problema em elementos infinitesimais que adotam formas geométricas específicas. Esses elementos são, então, empregados pelo *software* para aplicar o Método dos Elementos Finitos (MEF). Além de avaliar se a capacidade computacional disponível é adequada e determinar a velocidade de execução da simulação, a discretização da geometria é crucial para obter resultados precisos. Isso ocorre porque o tamanho e o número de elementos desempenham um papel crítico quando se aplica o MEF. Em outras palavras, quanto maior o número de elementos em uma discretização, menor é a taxa de erro nos resultados, o que contribui para aprimorar a precisão da simulação.

Assim sendo, a malha resultante é a união de todos esses elementos discretizados que se sobrepõem à geometria original. O COMSOL disponibiliza várias ferramentas dentro do "Nó de Malha" para serem empregadas durante a etapa de geração da malha. Essas ferramentas oferecem diversas opções em relação a formas, combinações e tamanhos de elementos que podem ser personalizados para a simulação. Isso concede ao usuário a flexibilidade de optar por utilizar as discretizações predefinidas pelo *software* ou criar sua própria discretização sob medida para atender às necessidades específicas de sua aplicação. As discretizações

predefinidas pelo *software* são *Extremely fine*, *Extra fine*, *finer*, *Normal*, *Coarse*, *Coarser*, *Extra coarse*, *Extremely coarse*. Com isso, quanto mais fina for a malha, mais elementos infinitesimais serão incluídos, o que resulta em uma discretização mais precisa. Contudo, é importante notar que o requisito de capacidade computacional aumenta à medida que a quantidade de elementos na malha aumenta.

Para o desenvolvimento da malha das geometrias desenvolvidas neste trabalho, foram utilizadas as ferramentas padronizadas pelo *software*, em que é estabelecido na função *Sequence type* a utilização malha controlada por física, utilizando elemento finito tetraédrico, em que permite que as interfaces físicas determinem a sequência de malha de acordo com a seção malha controlada por física, em que foi definido a discretização predefinida *fine*, com tamanho máximo de 3 mm. A Figura 19 apresenta a malha aplicada na geometria da simulação.

Figura 17 – Malha definida para as simulações.



Fonte: Autor (2023).

3.2.2.5. Estudo

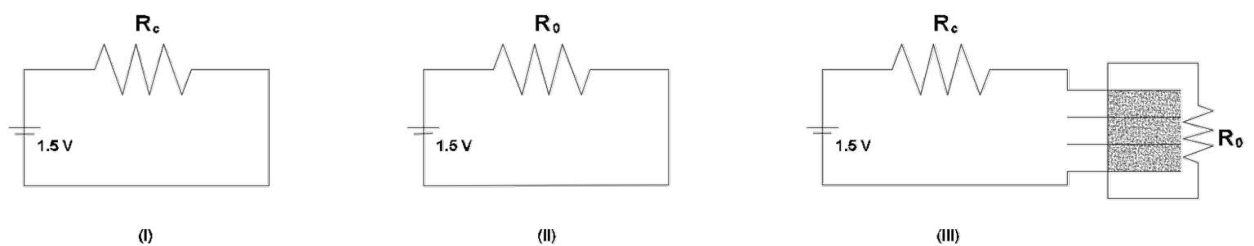
Por fim, para a realização das simulações, é definido o estudo que será realizado sobre o problema, que se encontra no módulo Estudo. Foram utilizados estudos estacionários e dependentes do tempo. A investigação *Stationary* calcula campos elétricos e correntes contínuas, onde as variáveis não mudam ao longo do tempo. O circuito elétrico criado na física

das Correntes Elétricas faz com que os sinais elétricos sejam enviados através de um terminal, no caso, o eletrodo fixo no bloco prismático, com tensão de 1,5 V, sem influência do tempo. O estudo Time dependent é utilizado para calcular, por exemplo, campos eletromagnéticos transitórios, em que são usados quando as variáveis do campo mudam ao longo do tempo.

Determinando a mesma física, os sinais elétricos passam por um eletrodo fixado no corpo cimentício dopado com nanotubos de carbono de paredes múltiplas, com de 0, 1, 1,5 e 2%, em um intervalo de tempo específico, sendo este intervalo configurado através do comando *Range*. Assim, para o estudo, buscamos um intervalo de 0 a 1000, em passos de 0,01s, portanto, *Range* (0, 0.01, 1000).

Para calibrar a modelagem dos componentes do modelo, inicialmente, cada componente (eletrodo e corpo cimentício dopado com NTC) foi modelado separadamente. Esta análise consistiu na aplicação de uma tensão de 1,5 V nas extremidades do eletrodo e do corpo cimentício dopado com NTC. A corrente elétrica obtida no componente foi comparada com a corrente calculada pela primeira lei de Ohm (Eq. 1). Com isso pode-se verificar se a condutividade elétrica adotada para cada componente do modelo numérico foi satisfatória. Este mesmo procedimento foi realizado considerando o corpo cimentício dopado com NTC e eletrodo juntos. A Figura 20 apresenta o esquema elétrico para modelagem dos componentes separadamente e em conjunto.

Figura 18 – Esquema elétrico para modelagem de cada componente, eletrodo I e corpo cimentício II dopado com NTC e III unidos.



Fonte: Autor (2023).

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

onde U é a tensão aplicada e R representa a resistência elétrica.

A verificação da corrente elétrica (i) no *software* ocorre através da incorporação da condutividade elétrica (σ). Essa propriedade permite que o material carregue carga ao longo do corpo, o que nos ajuda como parâmetro de entrada. As informações obtidas pelo documento, como fatores geométricos, propriedades dos materiais e resistência elétrica, possibilitam a utilização da equação (Eq. 2).

$$\sigma = \frac{L}{RA} \quad (2)$$

onde L é o comprimento do material, R é a resistência elétrica e A representa a área da seção transversal do material.

Na última etapa do desenvolvimento do modelo, todos os componentes são integrados, com os eletrodos fixados no corpo de prova. Além disso, a permissividade relativa (ϵ_r) é incluída como propriedade e parâmetro de entrada do corpo prismático. A calibração dos modelos é realizada com base nos dados do autor, que incluem capacitância (c), distância entre os eletrodos (d), permissividade do material (ϵ_0) e área da seção transversal (A) para calcular a permissividade relativa, observada na Eq. 3, fator que está relacionado ao aumento da capacidade de armazenamento de energia em um meio dielétrico sob efeito de um campo elétrico, para que seja gerada a variável de interesse, a corrente elétrica.

$$\epsilon_r = \frac{cd}{\epsilon_0 A} \quad (3)$$

Com isso, os resultados obtidos nas simulações representaram uma etapa crítica na validação do modelo numérico, sendo essencial a comparação entre os resultados experimentais e analíticos. Neste contexto, a corrente elétrica serviu como ponto de referência primordial para a validação do sistema proposto pelo autor, enfocando exclusivamente nas respostas elétricas do material nanocompósito à base de cimento, desconsiderando a aplicação de carregamento mecânico.

Para alcançar essa validação de forma sólida, o processo de construção do modelo foi dividido em duas fases distintas e complementares. A primeira etapa consistiu na análise individualizada dos componentes que compõem o sistema, nomeadamente o eletrodo, composto por uma tela metálica, e o corpo cimentício dopado com Nanotubos de Carbono de

Paredes Múltiplas (MWCNT). Cada um desses componentes foi minuciosamente examinado isoladamente, permitindo a identificação e a obtenção dos valores essenciais que serviram como entrada para o *software* COMSOL. Esses valores incluíram a condutividade elétrica de cada componente, um parâmetro crítico para a compreensão da resposta elétrica do sistema como um todo.

A segunda fase do processo de validação englobou a análise da permissividade relativa do sistema. Essa etapa desempenha um papel crucial na determinação das propriedades elétricas do material nanocompósito, sendo um aspecto fundamental da validação global do modelo. A partir dessas análises, foi possível obter uma compreensão detalhada de como o sistema se comporta em termos de suas propriedades elétricas.

4. RESULTADOS

A apresentação dos resultados da primeira etapa deste estudo utiliza valores obtidos para três diferentes distâncias entre os eletrodos: 4 cm, 8 cm e 12 cm. Além disso, a análise teve enfoque nas medições de amostras de 14 dias, com teores de 0%, 1%, 1,5% e 2%. Com base na aplicação da primeira Lei de Ohm (Eq. 1) e nos dados disponibilizados no documento de pesquisa intitulado, como “*Investigation of the electrical sensing properties of cementitious composites produced with multi-wall carbon nanotubes dispersed in NaOH*”, foram determinados os valores de corrente elétrica para o eletrodo de aço inoxidável, que se manteve inalterado, independente da distância analisada, bem como para o corpo cimentício dopado com MWCNT, que são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores de corrente elétrica (A) a partir da Lei de Ohm.

Descrição	14 DIAS											
	Corpo cimentício dopado com CNT (0%)			Corpo cimentício dopado com CNT (1%)			Corpo cimentício dopado com CNT (1,5%)			Corpo cimentício dopado com CNT (2%)		
	4 cm	8 cm	12 cm	4 cm	8 cm	12 cm	4 cm	8 cm	12 cm	4 cm	8 cm	12 cm
Corrente elétrica (μA)	1,60E-05	2,90E-05	2,80E-05	3,72E-04	3,00E-04	1,92E-04	4,85E-04	2,85E-04	2,03E-04	4,46E-04	2,72E-04	2,21E-04
Descrição	Eletrodo											
	Aço inoxidável											
Corrente elétrica (μA)	3,57E-01											

Fonte: Autor (2023).

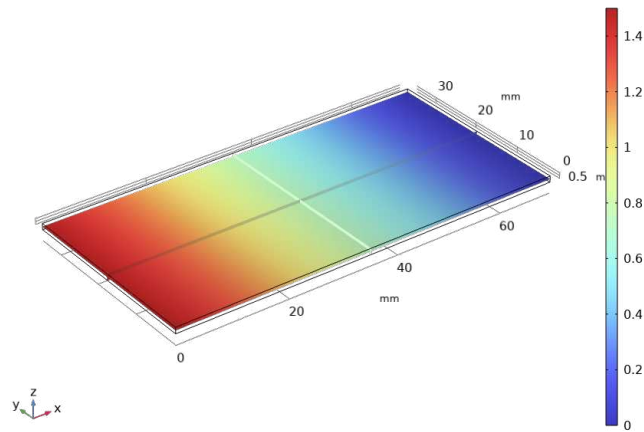
Assim, os valores de condutividade elétrica (σ), calculados a partir da equação já estabelecido na literatura (Eq. 2), foram inseridos no *software* COMSOL para cada distância analisada, com seus respectivos teores de nanotubos de carbono de paredes múltiplas, conforme estabelecido na Tabela 4. Foram observadas variações de tensões ao longo dos objetos estudados, como os eletrodos e o corpo prismático dopado com nanotubos de carbono de paredes múltiplas, conforme indicado nas Fig. 21–24. A partir disso, utilizando a ferramenta *Global Evaluation* no módulo *Derived Values*, a expressão da corrente elétrica foi analisada, resultando nos mesmos valores encontrados na Tabela 3 para o modelo do corpo cimentício, dopado com MWCNT, e do eletrodo, respectivamente.

Tabela 4 – Resultados da condutividade elétrica.

Descrição	14 DIAS											
	Corpo cimentício dopado com CNT (0%)			Corpo cimentício dopado com CNT (1%)			Corpo cimentício dopado com CNT (1,5%)			Corpo cimentício dopado com CNT (2%)		
	4 cm	8 cm	12 cm	4 cm	8 cm	12 cm	4 cm	8 cm	12 cm	4 cm	8 cm	12 cm
Condutividade Elétrica (S/m)	2,68E-04	9,75E-04	1,41E-03	6,92E-03	1,09E-02	1,01E-02	9,33E-03	1,03E-02	1,08E-02	8,47E-03	9,81E-03	1,18E-02
Descrição	Eletrodo											
	Aço inoxidável											
Condutividade Elétrica (S/m)	4,33E+02											

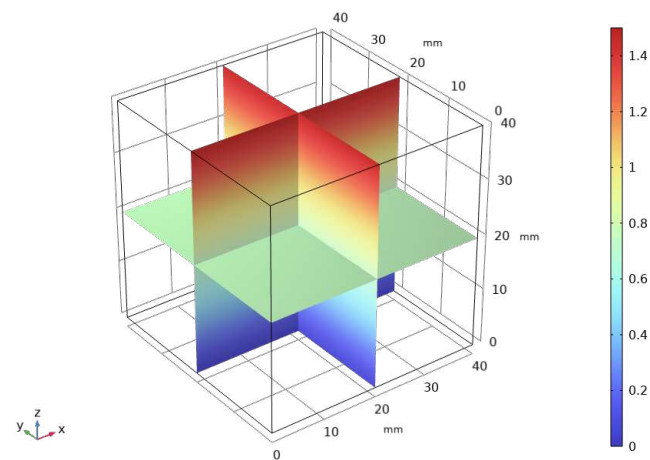
Fonte: Autor (2023).

Figura 19 – Condução do potencial elétrico no eletrodo metálico.



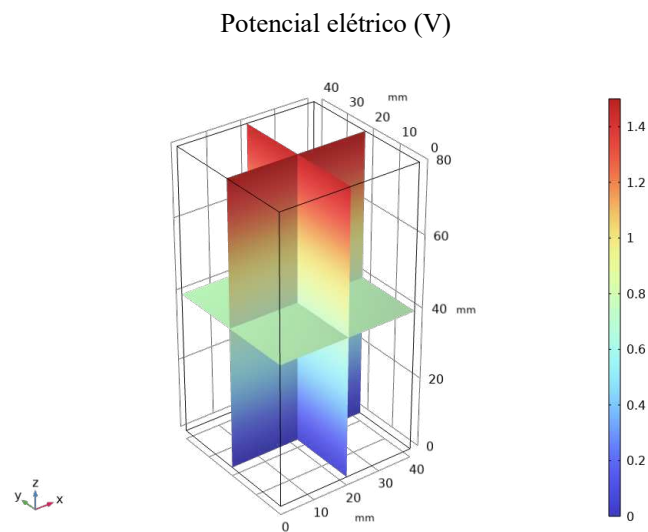
Fonte: Autor (2023).

Figura 20 – Condução do potencial elétrico no corpo cimentício após 14 dias de cura com teor de 0% em distâncias de 4 cm. Representação para todos os teores.



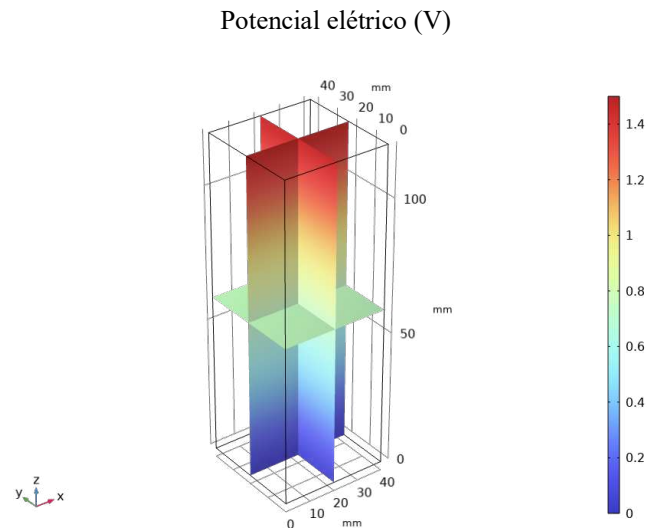
Fonte: Autor (2023).

Figura 23 – Condução do potencial elétrico no corpo cimentício após 14 dias de cura com teor de 0% em distâncias de 8 cm. Representação para todos os teores.



Fonte: Autor (2023).

Figura 24 – Condução do potencial elétrico no corpo cimentício após 14 dias de cura com teor de 0% em distâncias de 12 cm. Representação para todos os teores.

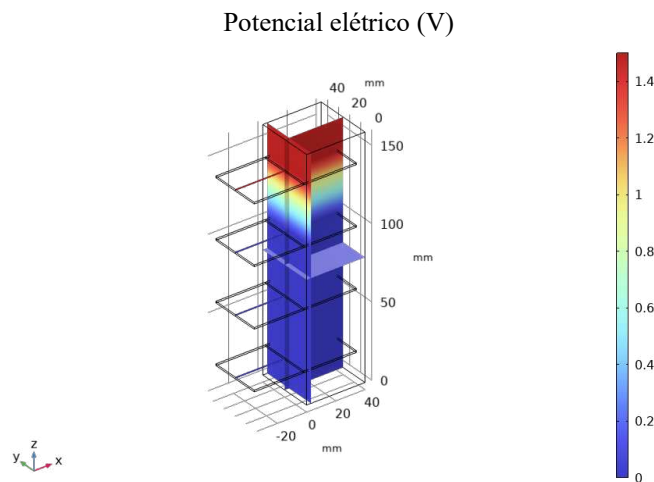


Fonte: Autor (2023).

É importante ressaltar que os valores obtidos pelo *software* COMSOL, notados na Tabela 5, concordam de forma consistente com os resultados calculados pela primeira Lei de Ohm, o que fortalece a confiabilidade do estudo. Após a validação de cada componente individual do sistema, a integração dos materiais foi realizada no *software* para analisar o sistema global.

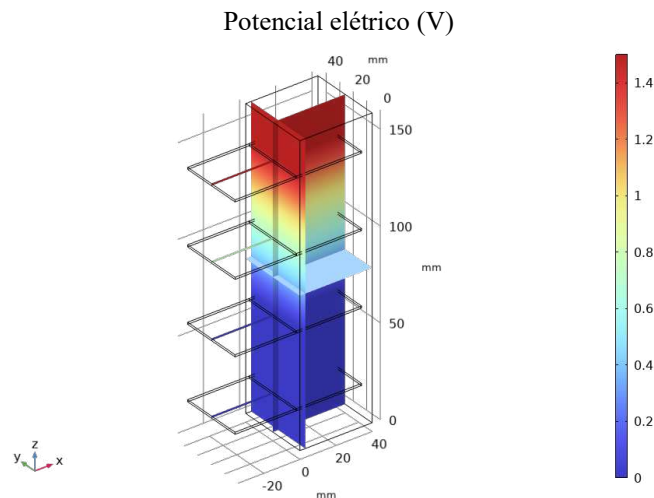
Com isso, após essa integração, o modelo foi simulado, exibindo uma alta tensão no terminal receptor, que foi distribuída ao longo do corpo de prova, atingindo, eventualmente, zero, conforme ilustrado nas Fig. 25–27. Além disso, a corrente elétrica, após a união dos componentes, apresenta um valor distinto, em comparação ao valor calculado pela Lei de Ohm, apresentado na Tabela 3. Visualiza-se na Tabela 5 a diferença, que pode ser explicada pelo fato de que, ao acoplar o eletrodo, a região dentro da geometria do corpo prismático é desconsiderada, o que afeta a condutividade elétrica do sistema.

Figura 25 – Condução do potencial elétrico no corpo cimentício após 14 dias de cura com teor de 0% em distâncias de 4 cm, com eletrodos fixados. Representação para todos os teores.



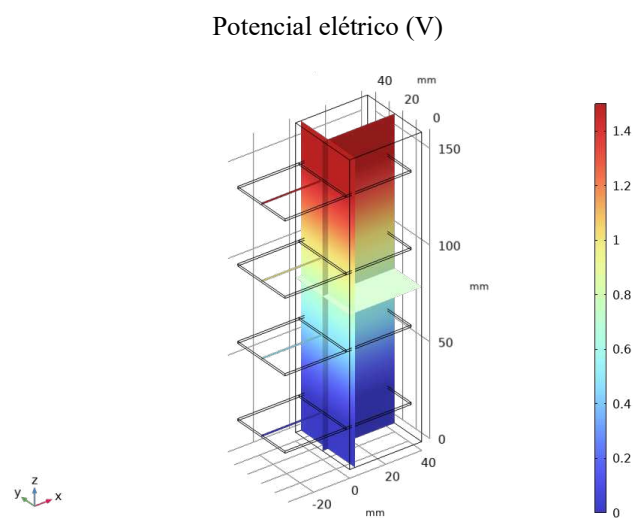
Fonte: Autor (2023).

Figura 26 – Condução do potencial elétrico no corpo cimentício após 14 dias de cura com teor de 0% em distâncias de 8 cm, com eletrodos fixados. Representação para todos os teores.



Fonte: Autor (2023).

Figura 27 – Condução do potencial elétrico no corpo cimentício após 14 dias de cura com teor de 0% em distâncias de 12 cm, com eletrodos fixados. Representação para todos os teores.



Fonte: Autor (2023).

Tabela 5 – Resultados da corrente elétrica obtidos pelo Software.

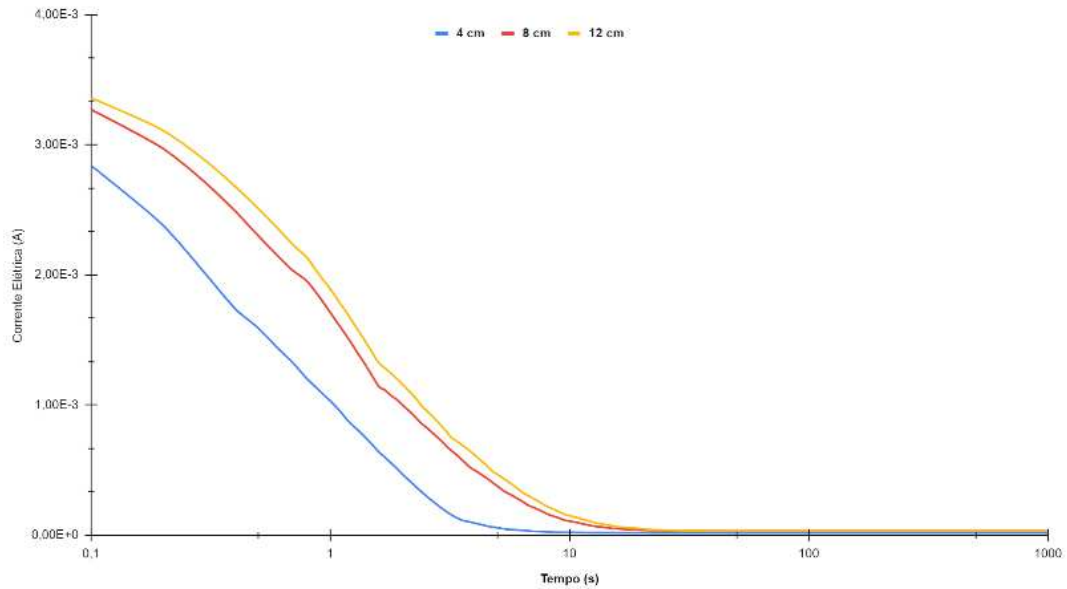
Descrição	14 DIAS											
	Corpo cimentício dopado com CNT (0%)			Corpo cimentício dopado com CNT (1%)			Corpo cimentício dopado com CNT (1,5%)			Corpo cimentício dopado com CNT (2%)		
	4 cm	8 cm	12 cm	4 cm	8 cm	12 cm	4 cm	8 cm	12 cm	4 cm	8 cm	12 cm
Corrente elétrica (μA)	1,62E-05	2,95E-05	2,85E-05	4,12E-04	3,04E-04	2,11E-04	5,13E-04	2,96E-04	2,15E-04	4,92E-04	2,87E-04	2,32E-04

Fonte: Autor (2023).

A segunda etapa deste estudo envolve o cálculo e a inclusão da permissividade relativa nos dados de entrada, seguida pela avaliação dos gráficos gerados pelo *software*. Devido aos diferentes teores, 0%, 1%, 1,5% e 2%, e distâncias entre os eletrodos, 4 cm, 8 cm e 12 cm, a permissividade relativa varia, calculada através da Eq. 3.

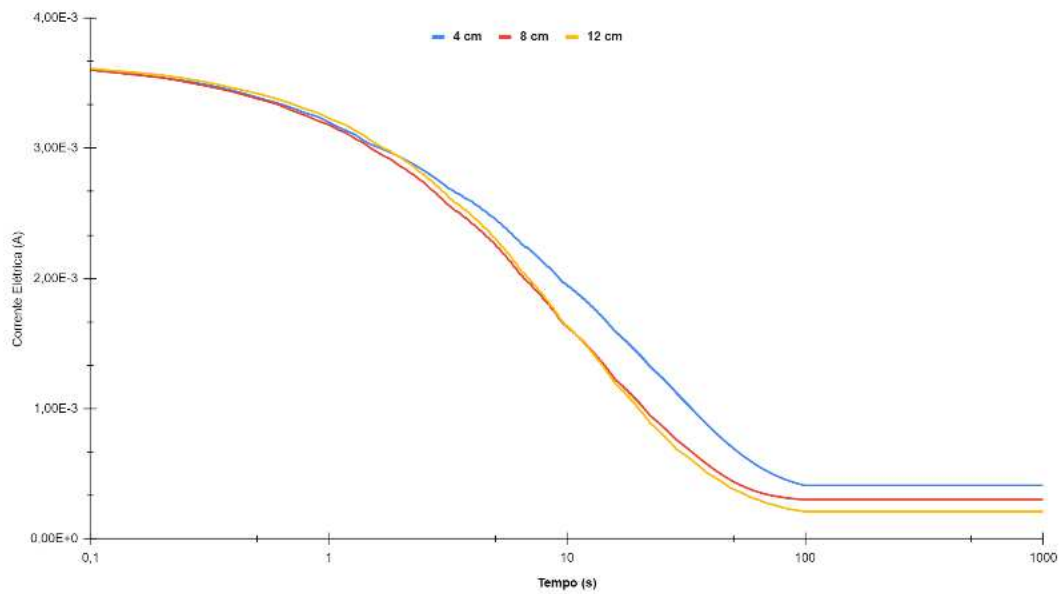
Foram conduzidas simulações numéricas das amostras desenvolvidos por Mesquita *et al.* (2023), e os resultados da corrente elétrica em função do tempo foram obtidos para diferentes espaçamentos entre os eletrodos em uma análise para cada teor. Os teores, notados nas Fig. 28–31, observa-se uma influência direta da condutividade elétrica, na qual representa a capacidade do material em transportar cargas elétricas, sendo inversamente proporcional à resistividade elétrica.

Figura 28 – Corrente elétrica ao longo do tempo após 14 dias de cura com teor de 0% em distâncias de 4, 8 e 12 cm.



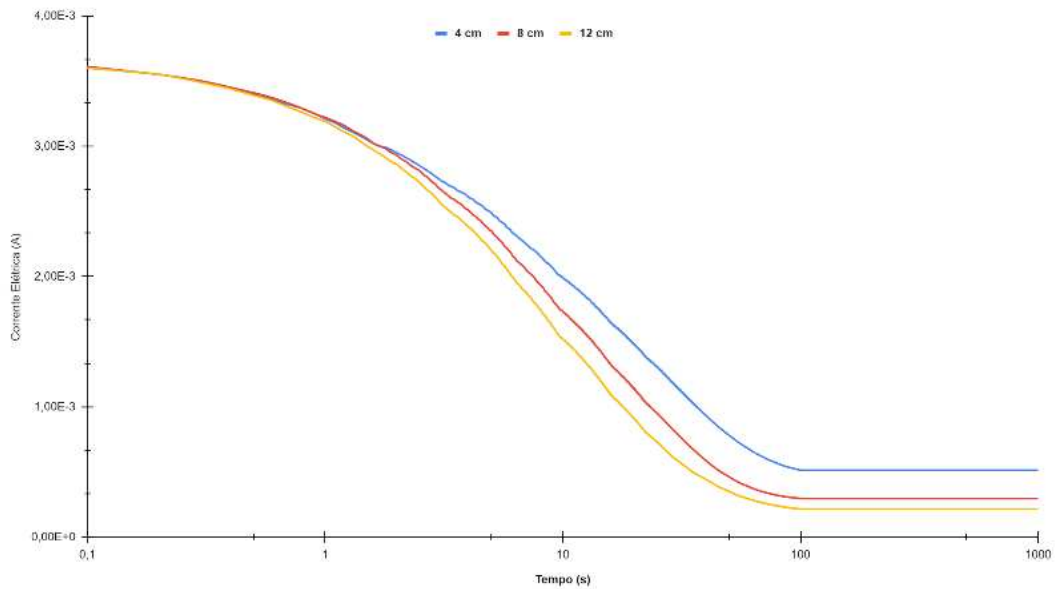
Fonte: Autor (2023).

Figura 29 – Corrente elétrica ao longo do tempo após 14 dias de cura com teor de 1% em distâncias de 4, 8 e 12 cm.



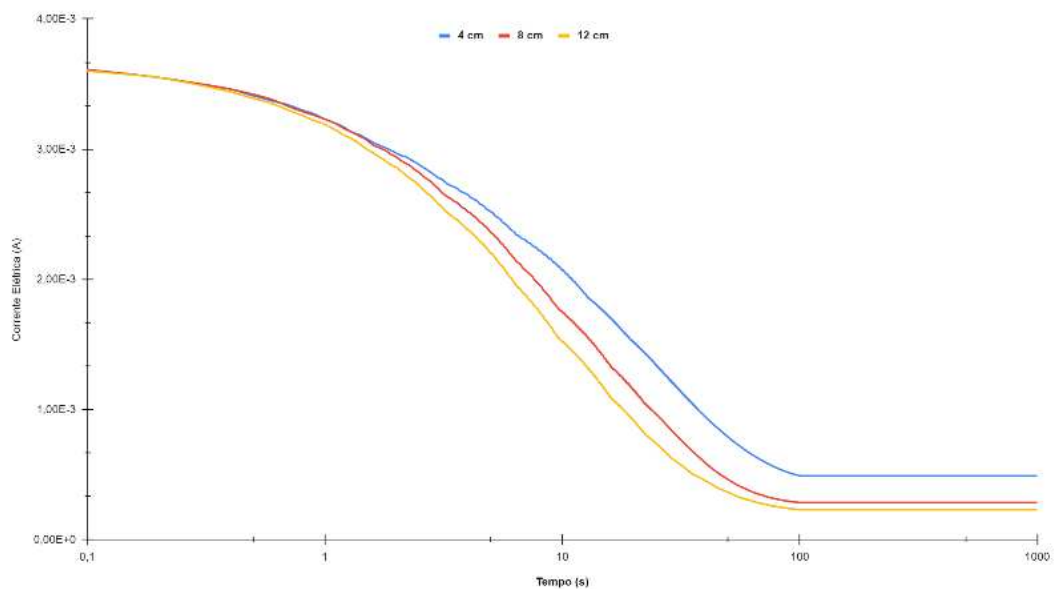
Fonte: Autor (2023).

Figura 30 – Corrente elétrica ao longo do tempo após 14 dias de cura com teor de 1,5% em distâncias de 4, 8 e 12 cm.



Fonte: Autor (2023).

Figura 21 – Corrente elétrica ao longo do tempo após 14 dias de cura com teor de 2% em distâncias de 4, 8 e 12 cm.



Fonte: Autor (2023).

Dessa forma, observa-se que o material age como um capacitor, gradualmente acumulando carga e impedindo a passagem de corrente elétrica até que alcance uma estabilização próxima de 100 segundos, permitindo então a passagem completa da corrente elétrica. Além disso, nota-se que o cimento dopado com MWCNT demonstrou condutividade elétrica, corroborando com os resultados de outros estudos.

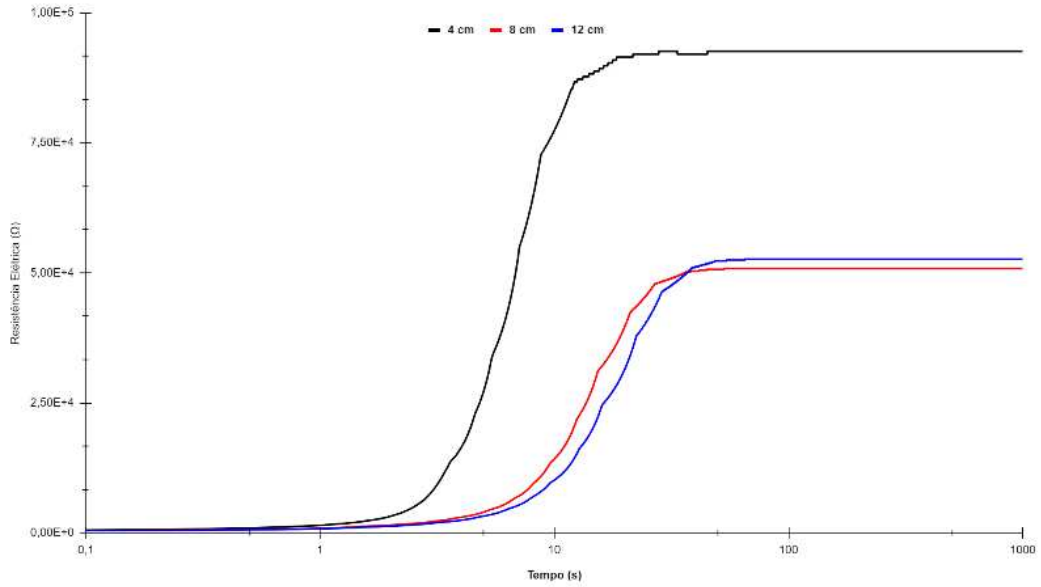
Para o dia de análise, 14 dias, vê-se a magnitude da corrente elétrica maior para as amostras com teores de 1,5% e 2% em eletrodos espaçados em 4 cm, condição essa devido ao material cimentício possuir um maior acréscimo de teor de nanotubos de carbono de paredes múltiplas. Com isso, à medida que aumenta o espaçamento dos eletrodos, nota-se uma diminuição na corrente elétrica, o que é esperado, pois um maior espaçamento oferece maior resistência à passagem da corrente elétrica.

Visualiza-se também um valor de corrente ligeiramente maior no teor de 1,5% de nanotubos de carbono de paredes múltiplas, fato esse que pode estar associado à sua relação com o limiar de percolação. É possível que a concentração de 1,5% seja suficiente para atingir ou superar o limiar de percolação, enquanto a concentração de 2% pode estar além desse ponto crítico. Nesse contexto, concentrações mais elevadas podem resultar em uma diminuição na eficiência da condução elétrica devido a fenômenos como aglomeração.

Ademais, os resultados da resistência elétrica ao longo do tempo foram obtidos a partir de experimentos realizados em amostras cimentícias dopadas com nanotubos de carbono de paredes múltiplas com espaçamentos entre os eletrodos de 4 cm, 8 cm e 12 cm. Esses dados experimentais foram retirados do trabalho de Mesquita *et al.* (2023) e, posteriormente, realizados simulações numéricas. Essa abordagem visa proporcionar uma análise referente as previsões numéricas derivadas das simulações, visando avaliar a eficácia do modelo numérico no contexto específico dos diferentes espaçamentos entre os eletrodos.

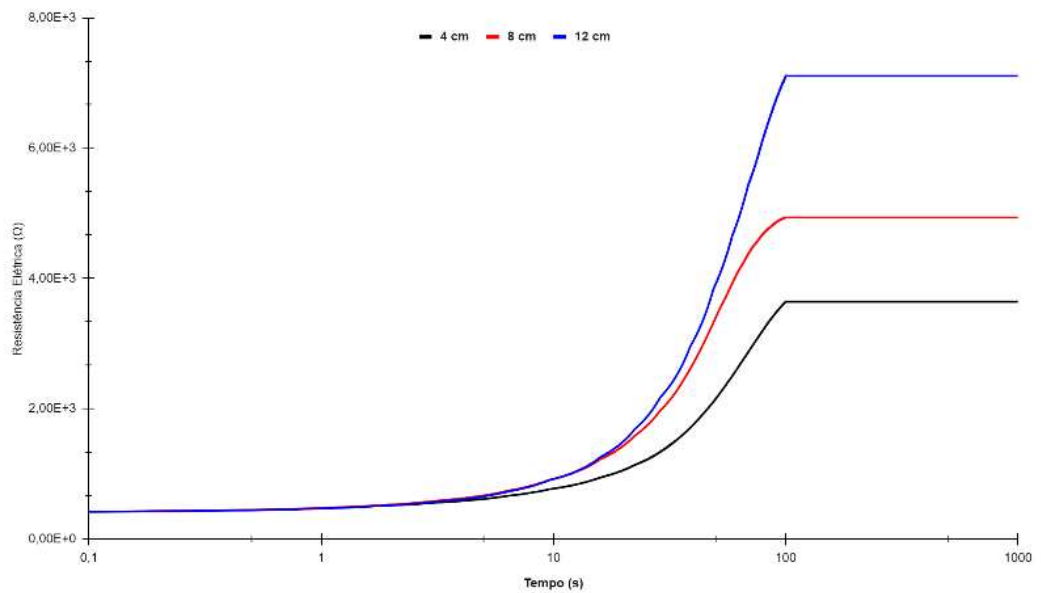
No contexto das grandezas de resistência elétrica, observa-se que o maior valor ocorreu para o corpo de prova com espaçamento de 8 e 12 cm, resultando em uma menor corrente elétrica no corpo de prova, conforme visualizado nas Fig. 32–35. Além disso, é evidente que quanto maior a distância entre os eletrodos, maior será a resistência elétrica, notados nos teores com acréscimo de nanotubos de carbono, 1 %, 1,5 % e 2%. Os materiais cimentícios sem MWCNT apresentam uma resistência elétrica extremamente alta, impedindo a passagem de corrente elétrica e, conseqüentemente, não exibem propriedades elétricas significativas, visualizado na Figura 32.

Figura 32 – Resistência elétrica ao longo do tempo após 14 dias de cura com teor de 0% em distâncias de 4, 8 e 12 cm.



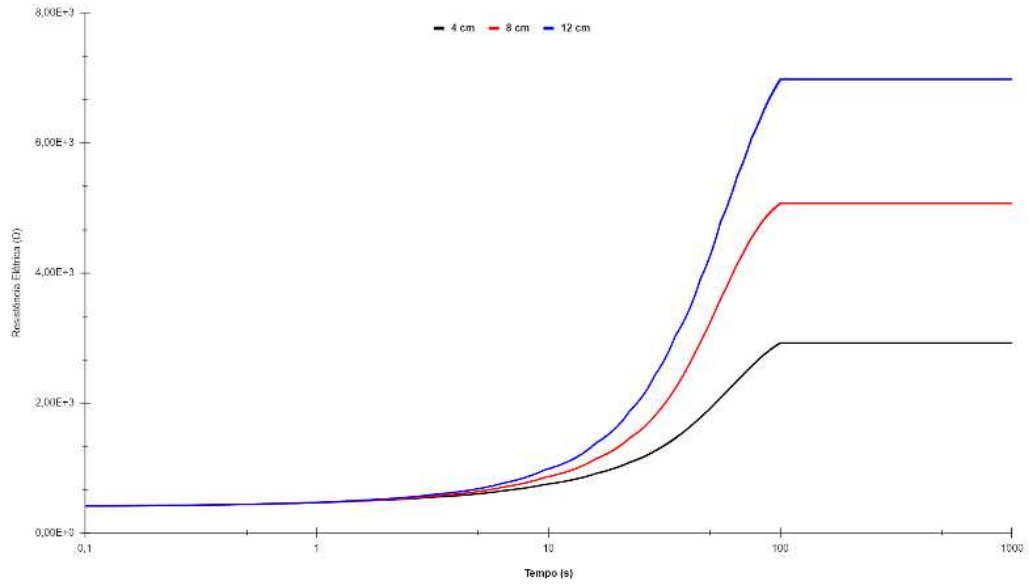
Fonte: Autor (2023).

Figura 22 – Resistência elétrica ao longo do tempo após 14 dias de cura com teor de 1% em distâncias de 4, 8 e 12 cm.



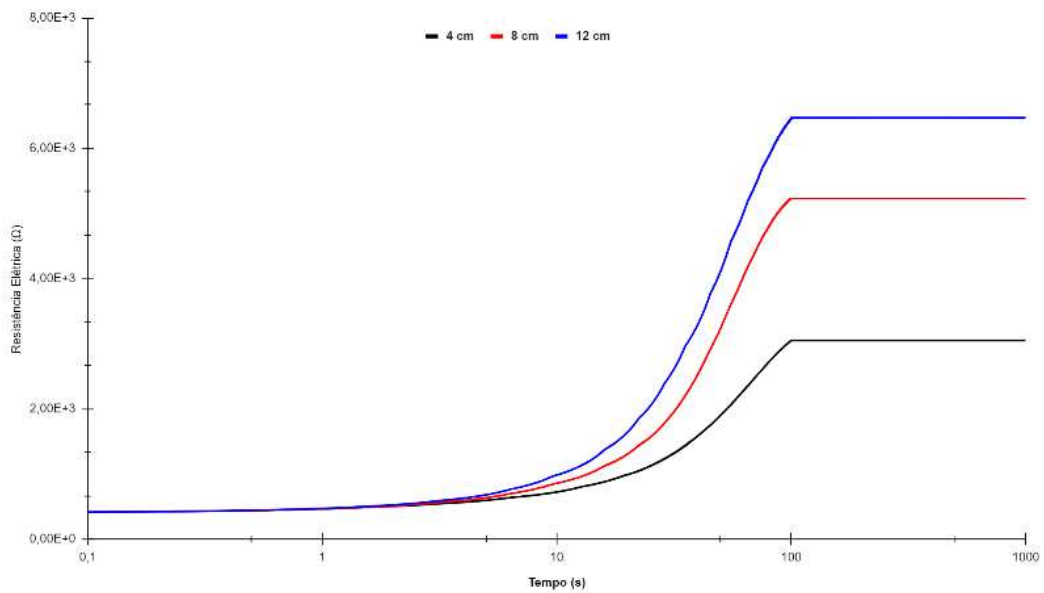
Fonte: Autor (2023).

Figura 23 – Resistência elétrica ao longo do tempo após 14 dias de cura com teor de 1,5% em distâncias de 4, 8 e 12 cm.



Fonte: Autor (2023).

Figura 24 – Resistência elétrica ao longo do tempo após 14 dias de cura com teor de 2% em distâncias de 4, 8 e 12 cm.



Fonte: Autor (2023).

5. CONCLUSÕES

Nesta pesquisa, um modelo numérico de elementos finitos foi desenvolvido para investigar o comportamento elétrico de corpos de prova cimentícios contendo nanotubos de carbono. Esse modelo, foi desenvolvido utilizando a ferramenta de simulação COMSOL *Multiphysics*®, representando uma contribuição significativa para o campo da engenharia de materiais e da pesquisa em nanotecnologia.

A validação do modelo numérico foi realizada de maneira abrangente, comparando os resultados das simulações com dados experimentais previamente obtidos por Mesquita *et al.* (2023). Especificamente, a corrente elétrica e a resistência elétrica foram os parâmetros-chave analisados. Os resultados dessa validação foram notavelmente consistentes, revelando uma forte correlação entre os resultados numéricos e experimentais. Essa congruência solidificou a confiança na precisão do modelo numérico, demonstrando que ele é uma ferramenta confiável para desvendar o comportamento elétrico complexo desses materiais avançados.

A importância dessa validação vai além da simples confirmação do modelo, ela tem implicações significativas, visto que condiciona a utilização do modelo durante a necessidade da ausência de um equipamento específico para que seja realizado algum ensaio experimental que demandam tempo e recurso financeiro elevado. Por exemplo, o modelo pode ser adaptado para analisar como as mudanças nas dimensões dos NTC afetam o comportamento elétrico dos corpos de prova cimentícios, ou como diferentes proporções de NTC impactam a condutividade elétrica. Essa flexibilidade abre portas para uma pesquisa mais ágil e abrangente.

Além disso, a pesquisa oferece uma contribuição adicional ao campo da engenharia de materiais, destacando que a metodologia de modelagem desenvolvida pode ser estendida para estudar a piezoresistividade de materiais cimentícios com NTC. Isso significa que, além da análise elétrica, o comportamento mecânico desses materiais pode ser avaliado em resposta a variações de carga, pressão ou deformação. Essa aplicação tem implicações notáveis no desenvolvimento de sensores avançados para monitoramento estrutural, abrindo caminho para uma melhor compreensão do comportamento desses materiais em condições do mundo real.

Portanto, esta pesquisa não apenas enfatizou a utilização do modelo, mas também forneceu uma metodologia versátil e poderosa que tem o potencial de transformar a pesquisa em materiais, nanotecnologia e monitoramento estrutural. Ela representa um marco importante na capacidade de explorar e compreender materiais cimentícios com nanotubos de carbono e suas aplicações em diversas áreas da engenharia.

5.1. Recomendações de estudos futuros

- Avaliar como diferentes composições da matriz de cimento afetam as propriedades elétricas do material pode ser uma área de interesse. A inclusão de outros aditivos ou modificadores na matriz pode ter impactos significativos;
- Este estudo se concentrou principalmente nas respostas elétricas do material. Estudos futuros podem investigar como o carregamento mecânico, como a aplicação de forças de tração ou compressão, influencia as propriedades elétricas e piezoresistivas do material;
- Explorar as aplicações práticas desses materiais com propriedades elétricas específicas, como sensores de tensão, monitoramento estrutural. Estudar como esses materiais se comportam em situações do mundo real é fundamental;
- Explorar como esses materiais podem ser integrados com outros materiais de construção, como concreto convencional, para obter propriedades elétricas desejadas em uma estrutura.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT, NBR. 16697: Cimento Portland-Requisitos**. Assoc. Bras. Normas Técnicas, v. 12, 2018.
- AVILÉS, F. et al. **Effect of carbon nanotube length on the piezoresistive response of poly (methyl methacrylate) nanocomposites**. *European Polymer Journal*, v. 110, p. 394-402, 2019.
- BAGGIO, Tamara et al. **Investigação das propriedades elétricas de compostos cimentícios dopados com nanotubos de carbono (NTC)**. In: Proceedings of the 57 Congresso Brasileiro do Concreto CBC, Bonito, Brazil. 2015. p. 27-30.
- BILLIG, Juliano Dagort. **Compósitos cimentícios reforçados com nanotubos de carbono: investigação das propriedades térmicas, elétricas e piezoresistivas**. 2013.
- COSTA, Mateus Silva. **Modelagem numérica de transdutores de Langevin para aplicações industriais**. 2022.
- CHEN, Jiayu et al. **Piezoelectric materials for sustainable building structures: Fundamentals and applications**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 101, p. 14-25, 2019.
- CHUNG, D. D. L. **A critical review of piezoresistivity and its application in electrical-resistance-based strain sensing**. *Journal of Materials Science*, v. 55, n. 32, p. 15367-15396, 2020.
- CURCI, Henrique Chiaradia Falcão. **Análise numérica do dano de materiais cimentícios aplicada a problemas termoelásticos e geometricamente não lineares**. 2021. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- D’ALESSANDRO, A.; UBERTINI, F.; MATERAZZI, AL **Nanocompósitos de concreto auto-sensíveis para estruturas inteligentes**. *Revista Internacional de Engenharia Civil e Ambiental*, v. 5, pág. 599-604, 2016.
- D’ALESSANDRO, Antonella et al. **Electromechanical modelling of a new class of nanocomposite cement-based sensors for structural health monitoring**. *Structural Health Monitoring*, v. 14, n. 2, p. 137-147, 2015.
- D’ALESSANDRO, Antonella; MATERAZZI, Annibale Luigi; UBERTINI, Filippo (Ed.). **Nanotecnologia na construção cimentícia**. Imprensa CRC, 2020.
- DUART, Marcelo Adriano et al. **Influência da incorporação de nanotubos de carbono na resistência à compressão de nanocompósito cimentício**. *Disciplinarum Scientia| Naturais e Tecnológicas*, v. 16, n. 2, p. 301-309, 2015.
- EN, British Standard. 197-1. **Cement–Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements**. London: European Committee For Standardisation, 2011.
- FIGUEIREDO, Antonio Domingues de. **Concreto reforçado com fibras**. 2011. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

GOPALAKRISHNAN, Kasthurirangan et al. (Ed.). **Nanotechnology in civil infrastructure: a paradigm shift**. Springer Science & Business Media, 2011.

HAN, Baoguo; YU, Xun; OU, Jinping. **Multifunctional and smart carbon nanotube reinforced cement-based materials**. In: Nanotechnology in Civil Infrastructure: a paradigm shift. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. p. 1-47.

HERBST, Marcelo Hawrylak; MACÊDO, Maria Iaponeide Fernandes; ROCCO, Ana Maria. **Tecnologia dos nanotubos de carbono: tendências e perspectivas de uma área multidisciplinar**. Química Nova, v. 27, p. 986-992, 2004.

IJIMA, Sumio. **Helical microtubules of graphitic carbon**. nature, v. 354, n. 6348, p. 56-58, 1991.

KHARE, R.; BOSE, S. **Carbon Nanotube Based Composites: a review**. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, v. 4, p. 31-46, 2005.

KHARE, Rupesh et al. **Compósitos baseados em nanotubos de carbono – uma revisão**. Revista de Caracterização e Engenharia de Minerais e Materiais, v. 01, pág. 31, 2005.

LI, Geng Ying. **Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO₂**. Cement and Concrete Research, n. 34, p. 1043-1049, 2004. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>.

MACLEOD, Alastair JN et al. **Enhancing fresh properties and strength of concrete with a pre-dispersed carbon nanotube liquid admixture**. Construction and Building Materials, v. 247, p. 118524, 2020.

MARCONDES, Carlos Gustavo Nastari. **Adição de nanotubos de carbono em concretos de cimento Portland- absorção, permeabilidade, penetração de cloretos e propriedades mecânicas**. 2012.

MATERAZZI, Annibale Luigi; UBERTINI, Filippo; D'ALESSANDRO, Antonella. **Carbon nanotube cement-based transducers for dynamic sensing of strain**. Cement and Concrete Composites, v. 37, p. 2-11, 2013.

MATOS, Ryan A. et al. **An electrical modeling approach for analysis of the behavior of carbon nanotubes cement-based composite**. Journal of Building Pathology and Rehabilitation, v. 8, n. 1, p. 53, 2023.

MELO, Valquiria Silva et al. **Nanotecnologia aplicada ao concreto: efeito da mistura física de nanotubos de carbono em matrizes de cimento Portland: efeito da mistura física de nanotubos de carbono em matrizes de cimento Portland**. 2009.

MESQUITA, Esequiel et al. **Investigation of the electrical sensing properties of cementitious composites produced with multi-wall carbon nanotubes dispersed in NaOH**. Journal of Building Engineering, v. 77, p. 107496, 2023.

NONATO, Raphael Basilio Pires. **Calibração de Modelo de Método dos Elementos Finitos por Comparação com o Método Experimental: Caso de Chapa com Furo no Centro.** Anais do Encontro Nacional de Pós-graduação, v. 6, n. 1, p. 105-110, 2022.

OLIVEIRA, B. L. **Síntese de Nanotubos de Carbono (NTC) por deposição química de vapor empregando Fe/CaCo₃ e Fe/NTC como catalisador.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.

ROA, D. B. **Nanofibras de carbono verticalmente alinhadas: estudo do crescimento por microscopia eletrônica de transmissão.** Dissertação (Mestrado em Ciências – Física) – Curso de Mestrado do Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

SAAFI, M. **Wireless and embedded carbon nanotube networks for damage detection in concrete structures.** Nanotechnology, v. 20, p. 395-502, 2009.

SIAHKOUHI, Mohammad et al. Utilization of carbon nanotubes (NTCs) in concrete for structural health monitoring (SHM) purposes: A review. Construction and Building Materials, v. 309, p. 125137, 2021.

SILVA, Everton Jose da et al. **Compósito cimentício com elevado teor de fibra de coco tratada: propriedades físicas e durabilidade.** Matéria (Rio de Janeiro), v. 23, 2018.

SILVESTRE, Jane Ianuchauskas. **Estudo das propriedades elétricas e dielétricas de um nanocompósito polimérico condutor a base de resina epóxi e nanotubos de carbono.** Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Faculdade de Engenharia e Ciências - Campus de Rosana, Universidade Estadual Paulista, Rosana - SP, 2022.

SOUZA FILHO, Antônio Gomes de; FAGAN, Solange Binotto. **Funcionalização de nanotubos de carbono.** Química nova, v. 30, pág. 1695-1703, 2007.

ZAMKOV, Mikhail et al. **Probing the intrinsic conductivity of multiwalled carbon nanotubes.** Applied physics letters, v. 89, n. 9, 2006.

ZARBIN, Aldo JG; OLIVEIRA, Marcela M. **Nanoestruturas de carbono (nanotubos, grafeno): Quo Vadis.** Química Nova, v. 36, pág. 1533-1539, 2013.