

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA  
SETOR DE ENGENHARIAS, CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

MATEUS IAGO ALVES

ANÁLISE DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA E TÉRMICA DE MATRIZES  
CIMENTÍCIAS COM ADIÇÃO DE ÓXIDO DE GRAFENO E NANOTUBOS DE  
CARBONO

PONTA GROSSA

2023

MATEUS IAGO ALVES

ANÁLISE DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA E TÉRMICA DE MATRIZES  
CIMENTÍCIAS COM ADIÇÃO DE ÓXIDO DE GRAFENO E NANOTUBOS DE  
CARBONO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
para obtenção do título de Bacharelado em  
Engenharia Civil, da Universidade Estadual de  
Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Pereira.

PONTA GROSSA

2023

MATEUS IAGO ALVES

ANÁLISE DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA E TÉRMICA DE MATRIZES  
CIMENTÍCIAS COM ADIÇÃO DE ÓXIDO DE GRAFENO E NANOTUBOS DE  
CARBONO

Este Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil pela Universidade Estadual de Ponta Grossa.

**BANCA EXAMINADORA:**

---

Prof. Dr. Eduardo Pereira

Departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Ponta Grossa

---

Prof. Ms. Marcelo Miranda Farias

Prefeitura do Campus Universitário – Universidade Estadual de Ponta Grossa

---

Prof. Ms. Mateus Edilson Gomes Dobrovolski

Departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Ponta Grossa, 26 de novembro de 2023

## RESUMO

Materiais constituídos por matrizes de cimento Portland são amplamente utilizados na indústria da construção civil, devido a suas características, como resistência mecânica e durabilidade, além da versatilidade. Para suprir a demanda por melhoria desses compósitos, cada vez mais pesquisas vêm sendo desenvolvidas, com foco em novas tecnologias e/ou aprimoramento de matrizes a base de cimento Portland, com o uso de adições e aditivos. Nesse sentido, o desenvolvimento de matrizes capazes de conduzir eletricidade e calor se torna uma oportunidade no uso em estruturas ou como materiais inteligentes. A utilização de nanomateriais a base de carbono, como o óxido de grafeno e nanotubos de carbono apresentam resultados promissores, por criarem uma rede de percolação elétrica e propagação de calor, dispersa ao longo da matriz cimentícia. Várias pesquisas obtiveram como resultado melhorias mecânicas e de hidratação em matrizes cimentícias com adições de carbono. Entretanto, há uma escassez de trabalhos relacionados à condutividade térmica e elétrica. A partir do pressuposto, o presente trabalho tem por objetivo observar as características mecânicas e físicas, focando nas propriedades de condutividade elétrica e térmica, além de observar a microestrutura formada em pasta de cimento com adição de nanotubos de carbono (NTC) e óxido de grafeno (OG), através de ensaios de MEV e DRX. Foram produzidas pastas de cimento Portland, com adição de 0,05%, 0,07% e 0,10% de OG e NTC. A relação a/c foi fixada em 0,40 e foi adicionado superplastificante à base policarboxilato a fim de promover a dispersão das adições na pasta. Foi avaliado a dispersão das adições com a presença do policarboxilato no meio aquoso através de microscopia ótica, onde foi possível observar a tendência de aglomeração das adições, conforme o aumento do teor das adições. Analisou-se, também, a trabalhabilidade das pastas produzidas, onde verificou-se a perda de fluidez com a adição de NTC. Como resultado, observou-se que as propriedades mecânicas apresentaram piora na presença das adições, que geraram pontos de fragilidade na matriz. A condutividade térmica também apresentou uma pequena diminuição. Contudo, a presença das adições promoveu aumento de condutividade elétrica, promovida pela movimentação de elétrons na pasta. As caracterizações microestruturais não apresentaram variação nos compostos formados pela presença das adições. Concluiu-se que houve um aumento de condutividade elétrica pela presença das adições na pasta, mas redução das outras características físicas e mecânicas. Isso foi potencializado, principalmente, pela dificuldade da dispersão do material na pasta.

Palavras-chave: grafeno, nanotubo de carbono, matriz cimentícia, condutividade elétrica, condutividade térmica.

## ABSTRACT

Materials composed of Portland cement matrices are widely used in the construction industry due to their characteristics, such as mechanical strength, durability, and versatility. To meet the demand for improving these composites, increasing research is being conducted, focusing on new technologies and/or enhancing Portland cement matrices using additives and admixtures. In this context, the development of matrices capable of conducting electricity and heat becomes an opportunity for use in structures or as smart materials. The use of carbon-based nanomaterials, such as graphene oxide and carbon nanotubes, shows promising results by creating a network of electrical percolation and heat propagation dispersed throughout the cementitious matrix. Several studies have shown improved mechanical and hydration properties in cement matrices with carbon additions. However, there is a shortage of research related to thermal and electrical conductivity. With this in mind, the present study aims to observe the mechanical and physical characteristics, focusing on electrical and thermal conductivity properties, as well as observing the microstructure formed in cement paste with the addition of carbon nanotubes (CNT) and graphene oxide (GO), through SEM and XRD tests. Portland cement pastes were produced with the addition of 0.05%, 0.07%, and 0.10% of GO and CNT. The water-to-cement ratio was fixed at 0.40, and polycarboxylate-based superplasticizer was added to promote the dispersion of additives in the paste. The dispersion of additives in the aqueous medium was evaluated through optical microscopy, where the tendency of aggregation of additives was observed with increasing additive content. The workability of the produced pastes was also assessed, revealing a loss of fluidity with the addition of CNT. As a result, it was observed that the mechanical properties deteriorated in the presence of additives, leading to points of fragility in the matrix. Thermal conductivity also showed a slight decrease. However, the presence of additives promoted an increase in electrical conductivity, driven by the movement of electrons in the paste. Microstructural characterizations showed no variation in the compounds formed by the presence of additives. It was concluded that there was an increase in electrical conductivity due to the presence of additives in the paste, but a reduction in other physical and mechanical characteristics. This was mainly exacerbated by the difficulty of material dispersion in the paste.

**Keywords:** graphene; carbon nanotubes, cement matrix; electric conductivity; thermal conductivity.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço ao meu orientador Eduardo, que me incentivou a desenvolver a pesquisa e me auxiliou em todo processo do trabalho, sendo compreensivo, paciente e atencioso. Acima de tudo, agradeço a todo conhecimento que me passou, não só durante a pesquisa, mas durante todo o curso, como professor e amigo.

Também agradeço a meu coorientador Jadiel, que me ajudou a sanar muitas dúvidas da pesquisa e de conhecimento científico e me ensinou os métodos laboratoriais, indispensáveis para metodologia do presente trabalho.

Agradeço, também, à minha família e especialmente meu pai, pelo incentivo durante toda a graduação. Agradeço, também, à Bruna, por estar do meu lado e por todo o amor e incentivo.

Por fim, agradeço a todos os meus amigos, dentro e fora do curso, especialmente meus amigos Josias e Rafaela, por todo apoio e companhia durante o curso e em todos os momentos bons ou difíceis da vida.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo esquemático das formas da água associada à estrutura do C-S-H.....	17
Figura 2 - Evolução do calor de hidratação do cimento Portland .....	18
Figura 3 - Estrutura de uma camada de grafeno (esquemático) .....	22
Figura 4 - Representação esquemática da estrutura de nanotubo de carbono de parede única	23
Figura 5 - Estrutura do óxido de grafeno.....	25
Figura 6 - Microscopia eletrônica de varredura de pontes de NTC em compósito cimentício aos 3 dias de idade .....	26
Figura 7 - Microscopia eletrônica de varredura de óxido de grafeno na matriz de cimento Portland.....	26
Figura 8 - Interação entre grupos de carboxilas e matriz cimentícia.....	27
Figura 9 - Fluxograma de planejamento experimental .....	32
Figura 10 - Molde para corpos de prova de cimento Portland com adição de carbono .....	32
Figura 11 - Molde para confecção de corpos de prova cilíndricos para ensaio de condutividade térmica .....	33
Figura 12 - Microscópio utilizado para a análise de dispersão.....	36
Figura 13 - Dispersor mecânico Ultra Turrax T18 – Ika .....	36
Figura 14 - Rompedor modelo AG-1 utilizado para os ensaios de compressão e tração .....	37
Figura 15 - Modelo esquemático do corpo de prova preparado para o ensaio de resistividade elétrica .....	38
Figura 16 - Aparato para ensaio de condutividade elétrica (a) e multímetro utilizado para o ensaio (b) .....	39
Figura 17 - Ensaio de condutividade térmica .....	40
Figura 18 - Posicionamento dos termopares no corpo de prova para ensaio de condutividade térmica .....	40
Figura 19 - Microscopia óptica com dispersão de óxido de grafeno, com teor de 0,05%.....	41
Figura 20 - Microscopia óptica com dispersão de óxido de grafeno, com teor de 0,07%.....	41
Figura 21 - Microscopia óptica com dispersão de óxido de grafeno, com teor de 0,10%.....	41
Figura 22 - Microscopia óptica com dispersão de nanotubos de carbono, com teor de 0,05%. .....	42
Figura 23 - Microscopia óptica com dispersão de nanotubos de carbono, com teor de 0,07%. .....	42
Figura 24 - Microscopia óptica com dispersão de nanotubos de carbono, com teor de 0,10%. .....	42

Figura 25 - Suspensão de nanotubo de carbono (a) e suspensão de óxido de grafeno (b). .....	43
Figura 26 - Espalhamento de flow table das pastas.....	44
Figura 27 - Corpos de prova cilíndricos com adição óxido de grafeno e referência (a) e corpo de prova com adição de 0,10% de nanotubos de carbono (b) .....	45
Figura 28 - Imagens de MEV com zoom de 20kx, referente as amostras de óxido de grafeno com idade de 28 dias .....	49
Figura 29 - Imagens de MEV com zoom de 10kx, referente as amostras de nanotubos de carbono com idade de 28 dias.....	49
Figura 30 - Imagem de MEV com zoom de 20kx, referente as amostras de referência, com idade de 28 dias .....	49
Figura 31 - Imagens de MEV com zoom de 20kx, referente as amostras de óxido de grafeno com idade de 90 dias .....	50
Figura 32 - Imagens de MEV com zoom de 20kx, referente as amostras de nanotubos de carbono com idade de 90 dias.....	50
Figura 33 - Imagem de MEV com zoom de 10kx, referente as amostras de referência, com idade de 90 dias .....	50



## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Índice de vazios obtidos das amostras com 7 dias de cura .....	47
Gráfico 2 - Índice de vazios obtidos das amostras com 28 dias de cura .....	47
Gráfico 3 - Índice de vazios obtidos das amostras com 90 dias de cura .....	48
Gráfico 4 - Caracterização de DRX para traço de referência aos 90 dias de cura.....	51
Gráfico 5 - Caracterização de DRX para teor de 0,05% de OG aos 90 dias de cura. ....	51
Gráfico 6 - Caracterização de DRX para teor de 0,07% de OG aos 90 dias de cura. ....	52
Gráfico 7 - Caracterização de DRX para teor de 0,10% de OG aos 90 dias de cura. ....	52
Gráfico 8 - Caracterização de DRX para teor de 0,05% de NTC aos 90 dias de cura. ....	53
Gráfico 9 - Caracterização de DRX para teor de 0,07% de NTC aos 90 dias de cura. ....	53
Gráfico 10 - Caracterização de DRX para teor de 0,10% de NTC aos 90 dias de cura. ....	54
Gráfico 11 - Caracterização de DRX para traço de referência aos 28 dias de cura.....	54
Gráfico 12 - Caracterização de DRX para teor de 0,05% de OG aos 28 dias de cura. ....	55
Gráfico 13 - Caracterização de DRX para teor de 0,07% de OG aos 28 dias de cura. ....	55
Gráfico 14 - Caracterização de DRX para teor de 0,10% de OG aos 28 dias de cura. ....	56
Gráfico 15 - Caracterização de DRX para teor de 0,05% de NTC aos 28 dias de cura. ....	56
Gráfico 16 - Caracterização de DRX para teor de 0,07% de NTC aos 28 dias de cura. ....	57
Gráfico 17 - Caracterização de DRX para teor de 0,10% de NTC aos 28 dias de cura. ....	57
Gráfico 18 - Caracterização de DRX para traço de referência aos 7 dias de cura.....	58
Gráfico 19 - Caracterização de DRX para teor de 0,05% de OG aos 7 dias de cura. ....	58
Gráfico 20 - Caracterização de DRX para teor de 0,07% de OG aos 7 dias de cura. ....	59
Gráfico 21 - Caracterização de DRX para teor de 0,10% de OG aos 7 dias de cura. ....	59
Gráfico 22 - Caracterização de DRX para teor de 0,05% de NTC aos 7 dias de cura. ....	60
Gráfico 23 - Caracterização de DRX para teor de 0,07% de NTC aos 7 dias de cura. ....	60
Gráfico 24 - Caracterização de DRX para teor de 0,10% de NTC aos 7 dias de cura. ....	61
Gráfico 25 - Resistência a compressão média para amostras de 7 dias de cura.....	61
Gráfico 26 - Resistência a compressão média para amostras de 28 dias de cura.....	62
Gráfico 27 - Resistência a compressão média para amostras de 90 dias de cura.....	62
Gráfico 28 - Resistência a tração média para amostras de 7 dias de cura.....	63
Gráfico 29 - Resistência a tração média para amostras de 28 dias de cura.....	63
Gráfico 30 - Resistência a tração média para amostras de 90 dias de cura.....	63
Gráfico 31 - Tensão x Corrente aos 7 dias de cura.....	65
Gráfico 32 - Tensão x Corrente aos 28 dias de cura.....	65
Gráfico 33 - Tensão x Corrente aos 90 dias de cura.....	66

Gráfico 34 - Corrente máxima passante com tensão de 50V .....	66
Gráfico 35 - Condutividade elétrica máxima por idade analisada.....	67
Gráfico 36 - Relação entre tensão e temperatura dos termopares .....	68
Gráfico 37 - Variação de temperatura para traço de referência para 7 dias de cura .....	68
Gráfico 38 - Variação de temperatura para teor de 0,05% de OG para 7 dias de cura .....	69
Gráfico 39 - Variação de temperatura para teor de 0,07% de OG para 7 dias de cura .....	69
Gráfico 40 - Variação de temperatura para teor de 0,10% de OG para 7 dias de cura .....	70
Gráfico 41 - Variação de temperatura para teor de 0,05% de NTC para 7 dias de cura .....	70
Gráfico 42 - Variação de temperatura para teor de 0,07% de NTC para 7 dias de cura.....	71
Gráfico 43 - Variação de temperatura para teor de 0,10% de NTC para 7 dias de cura.....	71
Gráfico 44 - Condutividade térmica de amostras com 7 dias de cura. ....	72

## LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1 - Materiais resultantes do processo de calcinação para a fabricação do Cimento Portland.....	15
Quadro 2 - Designação normalizada, sigla e classe do cimento Portland .....	19
Quadro 3 - Limites de composição do cimento Portland (porcentagem de massa) .....	20
Tabela 1 - Abreviações de óxidos presentes no clínquer e compostos formados .....	16
Tabela 2 - Características químicas e físicas do cimento Portland CP II-F.....	34
Tabela 3 - Quantitativo de materiais usados para respectivos teores de adição .....	34
Tabela 4 - Quantitativo de corpos de prova a serem utilizados para cada ensaio de caracterização .....	35
Tabela 5 - Resultados do ensaio de flow table para idades de 90 dias e 28 dias, em cm .....	43
Tabela 6 - Média com índices de absorção e vazios e pesos específicos para amostras de 7 dias de cura.....	45
Tabela 7 - Média com índices de absorção e vazios e pesos específicos para amostras de 28 dias de cura .....	46
Tabela 8 - Média com índices de absorção e vazios e pesos específicos para amostras de 90 dias de cura .....	46
Tabela 9 - Calibração de termopares para medição de temperatura .....	67

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
1.1	OBJETIVOS .....	13
1.1.1	Objetivo geral .....	13
1.1.2	Objetivo específico .....	13
1.2	JUSTIFICATIVA .....	13
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>15</b>
2.1	CIMENTO PORTLAND .....	15
2.2	ADIÇÕES EM MATRIZ DE CIMENTO PORTLAND.....	19
2.2.1	Pozolana.....	21
2.2.2	Cimentante .....	21
2.2.3	Adições Inertes .....	21
2.3	ADIÇÕES DE NANOTUBOS DE CARBONO E ÓXIDO DE GRAFENO EM MATRIZ DE CIMENTO PORTLAND.....	22
2.4	INTERAÇÃO DAS ADIÇÕES DE CARBONO NA MATRIZ CIMENTÍCIA .....	24
2.4.1	Condutividade Térmica E Elétrica Em Matriz Cimentícia Com Adições De Carbono 27	
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>31</b>
3.1	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	31
3.2	MATERIAIS .....	33
3.3	MÉTODOS .....	34
3.3.1	Caracterização No Estado Fresco .....	36
3.3.2	Caracterização Microestrutural E Químicas .....	36
3.3.3	Caracterizações Mecânicas e Físicas .....	37
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>41</b>
4.1	MICROSCOPIA ÓPTICA DAS DISPERSÕES.....	41
4.2	COMPORTAMENTO NO ESTADO ENDURECIDO E MICROESTRUTURA ....	44
4.3	CONDUTIVIDADE ELÉTRICA E TÉRMICA.....	64
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>73</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O concreto é um dos principais materiais utilizados na construção civil, chegando a ser o segundo mais usado do planeta, atrás somente da água (SANTOS, 2019). Um dos principais insumos que constitui os concretos convencionais é o cimento Portland, produto pelo qual sua produção é responsável pelas maiores emissões de CO<sub>2</sub> na atmosfera. De acordo com o Sindicato Nacional de Cimento Portland (SNIC), em 2020, o consumo de cimento Portland no Brasil foi mais de 60 mil toneladas, com uma tendência de aumento desde o ano de 2018.

Os concretos são constituídos principalmente por água, agregado miúdo, agregado graúdo e cimento Portland. Para suprir a demanda por melhoria de qualidade e desempenho do material, as misturas de aglomerante envolvendo o cimento Portland vêm sendo aperfeiçoadas para atender requisitos e particularidades da Engenharia. Muitas pesquisas têm por objetivo soluções de composição de concreto com propriedades aprimoradas, para obter um melhor desempenho para cada situação, proporcionando novas aplicações das pastas cimentícias no mercado, além de procurar maneiras de diminuir o impacto ambiental gerado pela produção de cimento (GOBBI, 2014).

Para melhorar o desempenho de misturas aglomerantes, tem sido utilizado a composição de cimento Portland com adições minerais como as pozolanas e o filer (ABNT, 2014). Dentre as adições que vem ganhando espaço nos ambientes de pesquisa, destacam-se os nanomateriais de carbono, como o grafite, óxido de grafeno (OG) e os nanotubos de carbono (NTC).

De acordo com Gomes *et al.* (2013), o carbono é um dos materiais mais versáteis da natureza, podendo apresentar várias configurações e em escala nanométrica. Pesquisas desenvolvidas anteriormente buscam compreender e apresentar o desempenho desse material nas pastas cimentícias (BATISTON *et al.*, 2021; BATISTON, 2012; MARCONDES, 2012; MEDEIROS *et al.*, 2015; MELO, 2009; ROCHA *et al.*, 2021). Essas pesquisas têm demonstrado que a aplicação desse material forma pastas cimentícias mais densas, com menor porosidade, gerando assim, a possibilidade de um concreto mais resistente.

O trabalho de Pan *et al.* (2015) utilizou óxido de grafeno como adição em pastas de cimento Portland e atribui um aumento de produção de C-S-H (principal responsável pela resistência do concreto) com a elevada superfície específica da adição. Entretanto, Rocha *et al.* (2021) afirma que a elevada superfície específica desses materiais, gera uma demanda maior da água livre. Isso influencia na trabalhabilidade do material, diminuindo a fluidez.

Outra característica interessante que os nanomateriais de carbono apresentam é condutividade térmica e elétrica (CALLISTER; RETHWISCH, 2014). Conforme cita Almeida (2021), os estudos indicam a condutividade elétrica em matrizes de cimento Portland como algo negativo, pois relacionam a redução da resistividade elétrica com a redução da durabilidade do concreto. Entretanto, a condutividade elétrica dos nanomateriais a base de carbono é eletrônica e não iônica. Esta característica precisa ser investigada e pode ser um diferencial tanto em critérios de utilização quanto durabilidade do material.

Baseado no exposto, neste trabalho busca-se analisar as reações geradas pela adição de nanotubos de carbono e óxido de grafeno, bem como o comportamento das pastas cimentícias, devido a influência dessas adições. E, também, analisar a microestrutura resultante da pasta cimentícia, dando ênfase no comportamento da condutividade elétrica e térmica do material produzido.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral neste trabalho é investigar a influência das adições de óxido de grafeno e nanotubos de carbono em pastas de cimento Portland, com foco nas alterações das propriedades térmicas e elétricas.

### 1.1.2 Objetivo específico

Como objetivos específicos, estão:

- Investigar a qualidade da dispersão da mistura das adições de óxido de grafeno e nanotubos de carbono em água através de análise visual por meio de micrografia e a qualidade da dispersão desta adição na matriz de cimento Portland;
- Avaliar as alterações da matriz cimentícia por meio de técnicas de caracterização microestrutural, como DRX e MEV.
- Comparar a condutividade elétrica e térmica da mistura cimentícia, com a adição de nanotubos de carbono e óxido de grafeno, com a mistura cimentícia sem a adição desses materiais, através de ensaios de condutividade.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

As adições do tipo pozolana, fíler e cimentante são materiais suplementares a serem adicionados em matriz cimentícia e que possuem relativa consolidação no meio técnico. Adições a base de carbono, como grafite, grafeno e nanotubos de carbono são recentes no

mercado e os estudos disponíveis focam principalmente na viabilidade da incorporação desses materiais em matriz cimentícia sobre a perspectiva de trabalhabilidade e melhoria das propriedades mecânicas.

Grande parte dos estudos relacionados à adições de carbono em matrizes de cimento Portland estão voltados para a busca de uma maior resistência e durabilidade do concreto, dando ênfase nas propriedades mecânicas do material, como o aumento da resistência a tração, e apresentando os impactos da adição no processo de hidratação, além de soluções para a dispersão dos nanomateriais de carbono na pasta (MARCONDES, 2012; MEDEIROS *et al.*, 2015; ROCHA *et al.*, 2021). O conhecimento sobre a durabilidade destes compósitos é ainda escasso e a avaliação sobre a capacidade de condutividade térmica e elétrica mostra-se como uma oportunidade.

Os nanomateriais a base de carbono como grafite, grafeno e nanotubos de carbono possuem uma boa condutividade térmica e elétrica, o que pode ser transferido para a pasta cimentícia baseada na implementação destes materiais. Assim, a adição de nanomateriais de carbono podem produzir pastas cimentícias com melhor capacidade de conduzir eletricidade ou transmitir calor. Isso pode proporcionar configurações de materiais cimentícios com maior versatilidade e desenvolvimento de estruturas com funções aprimoradas, como melhoria em aterramentos estruturais ou pavimentos e peças funcionais, com respostas piezoelétricas ou aquecidas.

Estes tipos de adições são recentes, não havendo muitos estudos sobre o comportamento desses materiais nas matrizes cimentícias. A carência do conhecimento dessas adições impede o desenvolvimento. Entretanto, o principal problema para a aplicação dos nanomateriais de carbono são seu elevado custo. Isso é resultado da complexidade e dificuldade dos processos químicos que envolvem a produção desses materiais. Isso dificulta a popularização do mesmo e a viabilidade econômica dessa solução. Contudo, encontra-se cada vez mais estudos e técnicas voltados para a produção dos nanomateriais (ZARBIN; OLIVEIRA, 2013). Logo, a implementação dos nanomateriais a base de carbono em matrizes cimentícias se mostra promissora, baseado no desenvolvimento da adição e os benefícios que pode oferecer à essas matrizes.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 CIMENTO PORTLAND

De acordo com a NBR 16697 (2018), o cimento Portland é definido como o material aglomerante hidráulico obtido a partir da moagem do clínquer, adicionando-se sulfato de cálcio e adições minerais, durante sua fabricação. O cimento Portland é definido como um aglomerante hidráulico, por apresentar interação com a água, ocorrendo as reações de hidratação e endurecendo o material, além de formar um produto resistente à água (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Para a fabricação do clínquer, a matéria prima usada se baseia principalmente em materiais que contenham cálcio e sílica. Por isso, materiais naturais, como calcário, são usados como fonte de cálcio, enquanto argilas são usadas como fonte de sílica e alumina. O processo consiste na mistura e moagem desses materiais, até o tratamento térmico (calcinação) do produto em grandes fornos rotativos, em temperaturas próximas de 1400°C. O resultado desse processo é o clínquer. O produto obtido é novamente misturado com uma quantidade de sulfato de cálcio e moído novamente, até se tornar um pó fino, com partículas entre 10 e 15 µm. A presença de alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e íons de ferro e magnésio facilitam a formação de silicato de cálcio, a temperaturas mais baixas. Isso diminui a energia necessária no processo de calcinação (MEHTA; MONTEIRO, 2008; NEVILLE; BROOKS, 2010).

Durante o processo de calcinação, o calcário e a argila, juntamente com as adições, se recombina e formam as fases presentes no cimento, tais sendo o silicato dicálcico, silicato tricálcico, aluminato de cálcio e ferrita ou ferroaluminato de cálcio, conforme é demonstrado no Quadro 1 (BATISTON, 2012; MEHTA; MONTEIRO, 2008; TAYLOR, 2004):

Quadro 1 - Materiais resultantes do processo de calcinação para a fabricação do Cimento Portland

<i>Calcário</i>	$\rightarrow CaO + CO_2$
<i>Argila</i>	$\rightarrow SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$
<i>Principais compósitos do cimento Portland</i>	$\left\{ \begin{array}{l} 2CaO.SiO_2 \\ 3CaO.SiO_2 \\ 3CaO.Al_2O_3 \\ 4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3 \end{array} \right.$

Fonte: Adaptado de Mehta; Monteiro (2008).

Conforme cita Mehta e Monteiro (2008), é padrão usar abreviaturas para alguns óxidos, conforme mostra a Tabela 1, que apresenta também as abreviações de alguns compostos formados a partir dos óxidos. Conforme citado anteriormente, o cimento Portland interage com a água, promovendo reações de hidratação, formando um material sólido e



resistente. As reações de hidratação formam várias fases, sendo as principais: o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), principal responsável pela resistência do concreto; o hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>), conhecido como portlandita; o sulfoaluminato de cálcio hidratado (C-A-S-H), conhecido como etringita; além de outros aluminatos hidratados.

Tabela 1 - Abreviações de óxidos presentes no clínquer e compostos formados

Óxido	Abreviação	Composto	Abreviação
CaO	C	3CaO.SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S
SiO <sub>2</sub>	S	2CaO.SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	A	3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F	CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O	C $\bar{S}$ H <sub>2</sub>
MgO	M	4CaO.AlO <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> AF
SO <sub>3</sub>	$\bar{S}$	4CaO.3Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .SO <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> A <sub>3</sub> $\bar{S}$
H <sub>2</sub> O	H	3CaO.2SiO <sub>2</sub> .3H <sub>2</sub> O	C <sub>3</sub> S <sub>2</sub> H <sub>3</sub>

Fonte: Adaptado de Mehta *et al.* (2008).

A hidratação do cimento Portland é gerada por dois mecanismos propostos: A *dissolução-precipitação*, onde envolve a dissolução dos anidros e formação dos hidratos na solução ou o processo *topoquímico*, que propõe a hidratação das partículas de cimento de fora para dentro. De acordo com Mehta e Monteiro (2008), o mecanismo de *dissolução-precipitação* ocorre nos estágios iniciais de hidratação, enquanto o processo *topoquímico* ocorre ao longo de todas as idades.

Os silicatos de cálcio (C<sub>3</sub>S e C<sub>2</sub>S) são os principais compostos cimentícios do cimento. As reações de hidratação são demonstradas nas Equações 1 e 2 (NEVILLE; BROOKS, 2010):

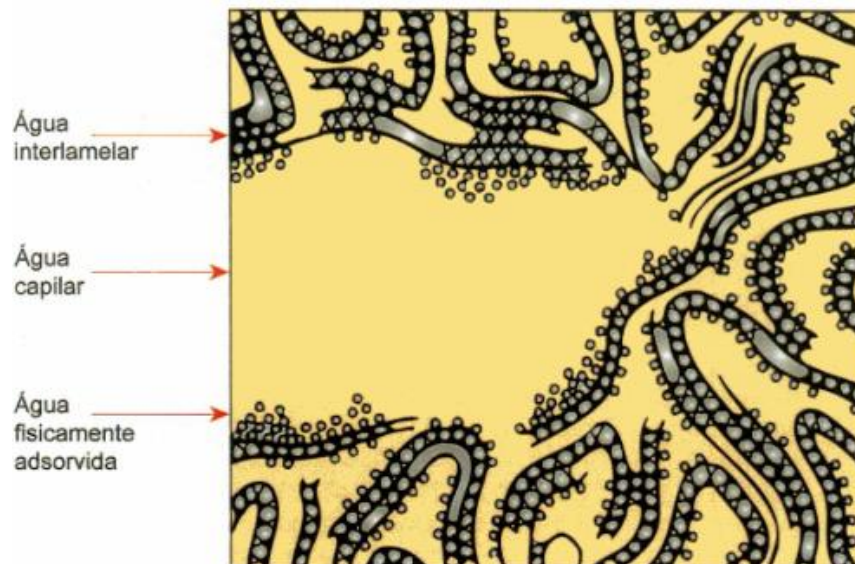


O produto de hidratação é composto pelo C-S-H e pela portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). As equações mostram que o silicato tricálcico ( $\text{C}_3\text{S}$ ) promove uma produção muito maior de portlandita ( $3\text{Ca}(\text{OH})_2$ ).

Por outro lado, o aluminato de cálcio ( $\text{C}_3\text{A}$ ), geralmente presente em baixas quantidades na maioria dos cimentos, é o responsável pela *pega instantânea*, o que é mitigada pela adição de sulfato de cálcio (gipsita) no clínquer. A reação desse composto é mais rápida que a dos silicatos de cálcio (NEVILLE; BROOKS, 2010). A presença dessa fase favorece a formação de sulfoaluminato de cálcio (etringita). Quando há presença de sulfato, o alumínio reage com o sulfato gerando etringita, o que retarda a pega.

A estrutura do C-S-H se assemelha a fibras, até formações reticulares. É uma estrutura que proporciona elevada área superficial. De acordo com o modelo de *Feldman-Sereda*, é uma estrutura com várias camadas com disposição aleatória, com espaços interlamelares entre elas. Essa fase é a principal responsável pela resistência mecânica do material hidratado e isso é atribuído por forças de Van de Waals entre as camadas (MEHTA; MONTEIRO, 2008). A Figura 1 apresenta o modelo de *Feldman-Sereda*, com as formas que a água pode estar associada à estrutura do C-S-H.

Figura 1 - Modelo esquemático das formas da água associada à estrutura do C-S-H



Fonte: MEHTA *et al.* (2008)

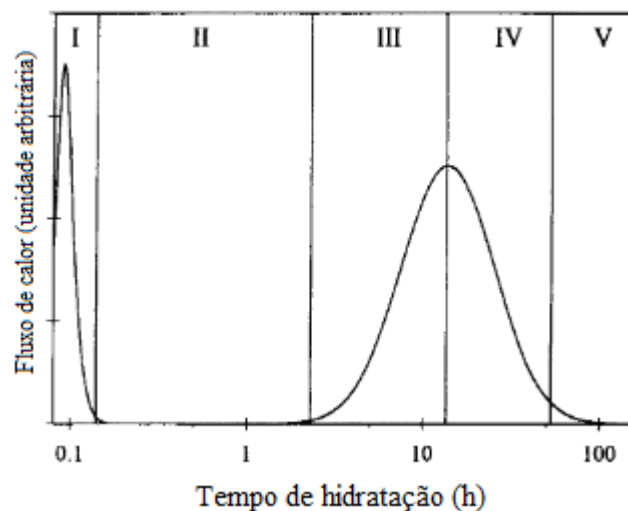
O modelo propõe três formas de associação da água: A água interlamelar se refere a parcela associada à estrutura do C-S-H. A água fisicamente absorvida se dá por ligações de pontes de hidrogênio entre as lamelas de C-S-H, enquanto a água capilar é entendida como a

água livre, presente nos vazios da estrutura. Há também a presença de H<sub>2</sub>O combinada na própria estrutura do C-S-H.

As reações que ocorrem com o cimento Portland são exotérmicas. Cerca de  $\frac{3}{4}$  do calor é liberado nos primeiros dias de hidratação e 90% em aproximadamente 6 meses (NEVILLE; BROOKS, 2010). Esse calor de hidratação depende, entretanto, da composição do cimento. A

Figura 2 mostra a evolução do calor de hidratação gerado pelas reações, em função do tempo de hidratação (BATISTON, 2012; JOLICOEUR; SIMARD, 1998).

Figura 2 - Evolução do calor de hidratação do cimento Portland



Fonte: Jolicoeur, Simard (1998)

Nos primeiros minutos de hidratação, há uma grande quantidade de calor gerado principalmente pela hidratação dos aluminatos e sulfatos, que reagem quase imediatamente ao contato com a água. Esse pico de calor caracteriza o primeiro estágio de hidratação do cimento (I).

Após esse estágio, a hidratação passa por um período de dormência (II), onde os grãos de cimento continuam sendo hidratados, mas de forma lenta. Isso caracteriza o ganho de trabalhabilidade da pasta, que pode durar algumas horas.

Passado esse período, as reações voltam a acelerar e a hidratação do C<sub>2</sub>S e C<sub>3</sub>S se acentua, além da formação de etringita, o que caracteriza o início da *pega* do cimento e a curva de calor ascendente da hidratação (III). O calor gerado se dá principalmente pela

formação do C-S-H até chegar a um pico, caracterizando conforme cita muitos autores, como o fim da *pega*.

Após esse período, as fases já hidratadas do cimento dificultam a hidratação dos anidros, o que desacelera as reações, diminuindo o calor de hidratação. Nessa fase (IV), inicia-se o endurecimento da pasta e ganho de resistência.

Então, as reações de hidratação continuam acontecendo, mas de forma mais lenta. Nessa fase (V), as reações de hidratação passam a ser *topoquímicas*, com grãos maiores tendo mais dificuldade em se hidratar devido a presença de hidratos já formados na superfície. Nesse momento, implica-se a importância da cura da peça, já que isso contribui para que as reações continuem acontecendo, garantindo o ganho de resistência.

## 2.2 ADIÇÕES EM MATRIZ DE CIMENTO PORTLAND

O cimento Portland, por si só, não satisfaz as necessidades da indústria da construção civil. Cada vez mais se vê a necessidade de aprimorar suas propriedades de maneira que atenda às necessidades específicas da indústria. Logo, há uma variedade de cimentos comerciais disponíveis no mercado. O tipo de cimento varia conforme sua composição, características químicas e presença de adições minerais. A NBR 16697 (2018) dispõe os requisitos dos tipos de cimentos Portland comerciais encontrados no Brasil. O Quadro 2 apresenta a classificação do cimento Portland.

Quadro 2 - Designação normalizada, sigla e classe do cimento Portland

Designação normativa (tipo)	Subtipo	Sigla	Classe de resistência	Sufixo	
Cimento Portland comum	Sem adição	CP I	25, 32 ou 40 <sup>c</sup>	RS <sup>a</sup> ou BC <sub>b</sub>	
	Com adição	CP I-S			
Cimento Portland composto	Com escória granulada de alto forno	CP II-E			
	Com material carbonático	CP II-F			
	Com material pozolânico	CP 2-Z			
Cimento Portland de alto-forno		CP III			
Cimento Portland pozolânico		CP IV			
Cimento Portland de alta resistência inicial		CP V			ARI <sup>d</sup>
Cimento Portland branco	Estrutural	CPB			25, 32 ou 40 <sup>c</sup>
	Não estrutural	CPB			-

Fonte: ABNT (2018)

As adições minerais no cimento Portland são usadas para aperfeiçoar essas características específicas do cimento ou adicionar propriedades que melhorem o comportamento do material.

Gobbi (2014) afirma que as adições minerais têm desempenhado um papel importante na produção de concretos de alto desempenho. A solução dessas adições se dá pela modificação da microestrutura do composto, a partir de reações químicas que favorecem a formação dos hidratos que proporcionam a resistência do concreto. Dentre as adições disponíveis no mercado, destacam-se a Pozolana, as adições cimentantes e as adições inertes.

Mehta e Monteiro (2008) afirmam que as adições são adicionadas ao cimento em quantidades relativamente grandes, variando de 20 a 70% por massa do material cimentício. Esses materiais derivam, principalmente de usinas de energia elétrica e da indústria metalúrgica, onde para essas entidades, o material seria descartado, mas o mesmo apresenta elevado potencial para a construção civil. A NBR 16697 impõe os limites de massa dessas adições presente nos cimentos comerciais, conforme mostra o Quadro 3.

Quadro 3 - Limites de composição do cimento Portland (porcentagem de massa)

Sigla	Classe de resistência	Sufixo	Clínquer + sulfatos de cálcio	Escória granilada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático
CPI	25, 32 ou 40	RS ou BC	95 – 100	0 – 5		
CP I-S			90 – 94	0	0	6 – 10
CP II-E			51 – 94	6 – 34	0	0 – 15
CP II-Z			71 – 94	0	6 – 14	0 – 15
CP II-F			75 – 94	0	0	11 – 25
CP III			25 – 65	35 – 75	0	0 – 10
CP IV			45 – 85	0	15 – 50	0 – 10
CP V <sup>a</sup>	ARI		90 – 100	0	0	0 - 10
CPB	Estrutural		75 – 100	-	-	0 – 25
	Não estrutural	-	50 – 74	-	-	26 – 50

<sup>a</sup> No caso de cimento Portland de alta resistência inicial resistente a sulfatos (CP V-ARI RS), podem ser adicionadas escórias granuladas de alto-forno ou materiais pozolânicos.

Fonte: ABNT (2018).

### 2.2.1 Pozolana

A NBR 12653 (2014) define a pozolana como um material silicoso ou sílico aluminoso que, em si, possui pouca ou nenhuma propriedade ligante, mas irá reagir quimicamente, na presença de água, com o hidróxido de cálcio em temperaturas normais para formar compostos com propriedades ligantes.

A partir dessas reações, Mehta e Monteiro (2008) descreve alguns dos benefícios que se obtém com a adição das pozolanas nos compostos de cimento, como melhor resistência à fissuração, devido ao baixo calor de hidratação; aumento da resistência final e impermeabilidade devido ao fortalecimento da zona de transição e ao refinamento dos poros, densificando o material; maior durabilidade em relação a ataque por sulfato e à expansão pela reação álcali-agregado.

Além das propriedades no estado endurecido, os materiais pozolânicos também promovem a melhoria da trabalhabilidade, no estado fresco, pela redução de tamanho e volume de vazios. Entretanto, observa-se que o uso dessas adições, muitas vezes, aumenta a demanda de água, para manter determinada consistência.

Pode-se classificar as adições pozolânicas quanto a sua origem, como naturais (cinza vulcânica) ou artificiais (cinza volante, metacaulim, sílica ativa, nanosílica, cinza da casca de arroz). Os cimentos comerciais disponíveis contendo Pozolana são o CP II-Z e CP IV.

### 2.2.2 Cimentante

As adições cimentantes são materiais constituídos em sua maior parte de silicatos e aluminossilicatos de cálcio. Entretanto, o material não reage sozinho, pois depende de uma situação de alcalinidade do meio. A reação química se baseia na combinação do cimentante com a água, formando C-S-H.

Entre as adições cimentantes, destaca-se a escória de alto-forno: material não-processado, provindo da produção de ferro fundido. Esse material apresenta elevados teores de silicatos e aluminossilicatos, de cálcio e magnésio, na forma vítrea, devido ao rápido resfriamento que ocorre nas siderúrgicas (MEHTA; MONTEIRO, 2008; TAYLOR, 2004). A NBR 16697 (2018) apresenta os cimentos CP II-E e CP III contendo esse tipo de adição.

### 2.2.3 Adições Inertes

As adições minerais inertes não causam atividade química significativa, como as pozolanas e os cimentantes. O uso dessas adições se dá pela melhora do empacotamento granulométrico (GOBBI, 2014). O exemplo mais comum de adição “inerte” é o filer calcário.

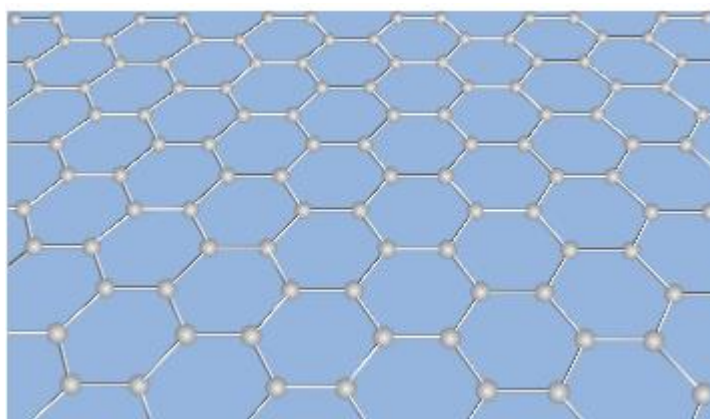
Taylor (2004), no entanto, afirma que o fíler calcário, comumente adicionado ao processo de moagem do cimento, devido a sua menor finura, contribui para a melhor reatividade química da matriz cimentícia. Além disso, ocorre um efeito físico na hidratação, onde o fíler, além da melhora do empacotamento, funciona como ponto de nucleação para as reações químicas do cimento. Quimicamente, é estabelecido a formação de monocarbonato.

### 2.3 ADIÇÕES DE NANOTUBOS DE CARBONO E ÓXIDO DE GRAFENO EM MATRIZ DE CIMENTO PORTLAND

Uma classe de adições que vem ganhando destaque no desenvolvimento de argamassas e concreto são as adições a base de carbono. Vários outros estudos abordam as adições de carbono com intuito da melhoria, por exemplo, do comportamento mecânico dos compósitos.

O grafeno consiste em uma camada atômica única de grafita, composta por átomos de carbono hexagonalmente ligados por ligações  $sp^2$ . A Figura 3 apresenta a estrutura do grafeno, esquematicamente. Essas ligações são extremamente resistentes e flexíveis. Das excepcionais características desse material, destaca-se a natureza dos elétrons não ligados: a uma temperatura ambiente, os elétrons se movem muito mais rapidamente que na condução de metais, o que torna o material um excelente condutor elétrico. É o material mais resistente conhecido ( $\sim 130$  GPa) e o melhor condutor térmico ( $\sim 5000$  W/m.K) e elétrico ( $10^{-8}$   $\Omega$ .m) (CALLISTER; RETHWISCH, 2014).

Figura 3 - Estrutura de uma camada de grafeno (esquemático)



Fonte: Callister, Rethwisch (2014).

O grafeno pode ser obtido a partir de vários processos, como esfoliação em fase líquida, método de deposição química da fase vapor (CVD), esfoliação micromecânica ou crescimento de grafeno epitaxial em carbeno de silício (SiC).

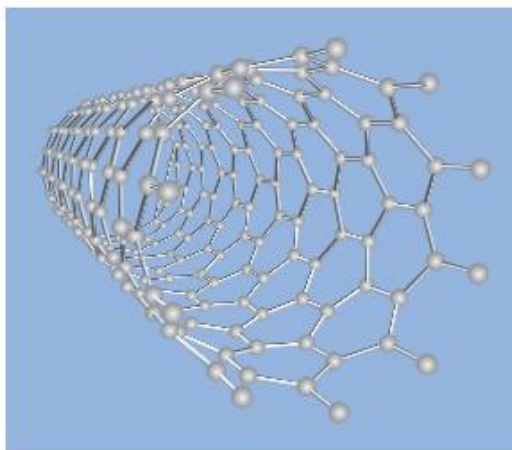
A esfoliação em fase líquida consiste em quebrar as interações  $\pi$ - $\pi$  entre as camadas do grafeno. Já o método CVD consiste na obtenção de grafeno através da deposição química na fase de vapor em substratos de cobre. A esfoliação micromecânica consiste em aplicar uma fita adesiva em um grafite, retirar a fita contendo o grafite e colocar em cima de um substrato de óxido de silício. A folha de grafeno se adere ao substrato por ter maior afinidade do que o próprio grafeno (BARCELOS, 2011; QUINTANA; TAPIA; PRATO, 2014; SOLDANO; MAHMOOD; DUJARDIN, 2010).

Os nanotubos de carbono (NTC), por sua vez, foram observados por Iijima, em (1991) e consistem em uma lâmina de grafite (grafeno), estruturada na forma de tubo, apresentada esquematicamente na Figura 4.

Essa estrutura pode apresentar uma (nanotubos de carbono com parede única) ou múltiplas paredes na sua estrutura. Suas dimensões são em escala nanométrica, variando de 1 a 50 nm de diâmetro, enquanto seu comprimento pode variar de 100 a 1000 nm (CALLISTER; RETHWISCH, 2014; IJIMA, 1991; MELO, 2009).

Semelhante ao grafeno, os NTCs são extremamente resistentes, além de dúcteis, o que são características muito interessantes para várias aplicações. Além disso, os NTCs apresentam massas específicas relativamente baixas, além de serem tanto condutores, quanto semicondutores, dependendo da orientação do plano hexagonal (paredes) em relação ao eixo do tubo (CALLISTER; RETHWISCH, 2014).

Figura 4 - Representação esquemática da estrutura de nanotubo de carbono de parede única



Fonte: Callister; Rethwisch (2014).



Devido a configuração da estrutura do nanotubos, cujo átomos possuem hibridação  $sp^2$ , esse material apresenta alta estabilidade química. As extremidades do tubo, por outro lado, podem apresentar reatividade, já que os anéis não são tão estáveis. Podem existir, também, regiões defeituosas no corpo do NTC, o que também pode gerar certa reatividade do material.

## 2.4 INTERAÇÃO DAS ADIÇÕES DE CARBONO NA MATRIZ CIMENTÍCIA

Estudos feitos por (BABAK *et al.*, 2014; KANG *et al.*, 2019; MOHAMMED *et al.*, 2015), constataram que as adições de carbono apresentam um efeito de densificação da matriz cimentícia, diminuindo o tamanho médio dos poros. Uma explicação para o fenômeno é que essas adições funcionam como pontos de nucleação para a formação de C-S-H. Isso mostra não só o potencial mecânico dessas adições na matriz, mas também um fator que contribui com a hidratação do cimento.

Um grande fator que influencia na qualidade da interação entre os compostos de cimento Portland e as adições é a presença de grupos funcionais como carboxila (-COOH), hidroxila (-OH) e óxidos (-O-), tornando o grafeno um material hidrofílico. A Figura 5 apresenta a representação da estrutura molecular do óxido de grafeno com a presença destes grupos funcionais.

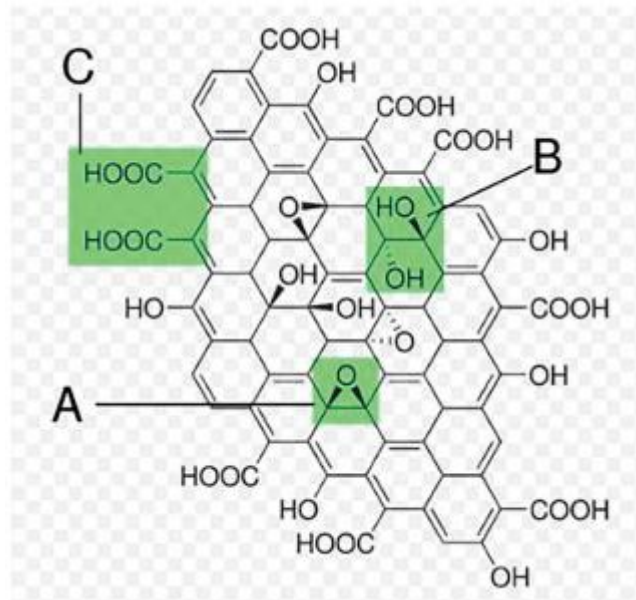
Esses grupos funcionais tendem a atrair os íons diluídos dos silicatos ( $C_2S$  e  $C_3S$ ) nos estágios iniciais da diluição do cimento e, por consequência, conforme as reações avançam, ocorre uma elevada concentração de silicatos de cálcio em volta das partículas de carbono, sendo uma região propícia para a formação de C-S-H. Esse comportamento é similar ao que ocorre com as adições inertes, como o fíler calcário (BABAK *et al.*, 2014).

Horta *et al.* (2022) afirmam que devido à elevada superfície específica desses nanomateriais, a cinética das reações de hidratação da matriz é alterada, requerindo uma maior quantidade de água no processo de preparo das pastas, influenciando diretamente na velocidades de hidratação e no calor total gerado. Outro fator que pode influenciar nas reações é a condutividade térmica das adições de carbono, que pode promover uma melhor dispersão do calor gerado no processo de hidratação.

Estudos feitos por Batiston (2012) mostram os ganhos de propriedades de pastas de cimento com adição de nanotubos de carbono (NTC), como a difusividade térmica em aumento de até 20 vezes. Isso mostra o potencial da presença da adição para aplicações onde se procura o aumento da condutividade térmica de materiais cimentícios. Já Medeiros *et al.* (2015) produziu testes com compósitos de cimento Portland com a adição de NTC e obtiveram

resultados que indicam um aumento de 27% na resistência a compressão, com teores de 0,40 %. Esse estudo também concluiu que, quanto maior o teor da adição, mais consistente será o compósito, exigindo teores menores para garantir a fluidez no estado fresco.

Figura 5 - Estrutura do óxido de grafeno

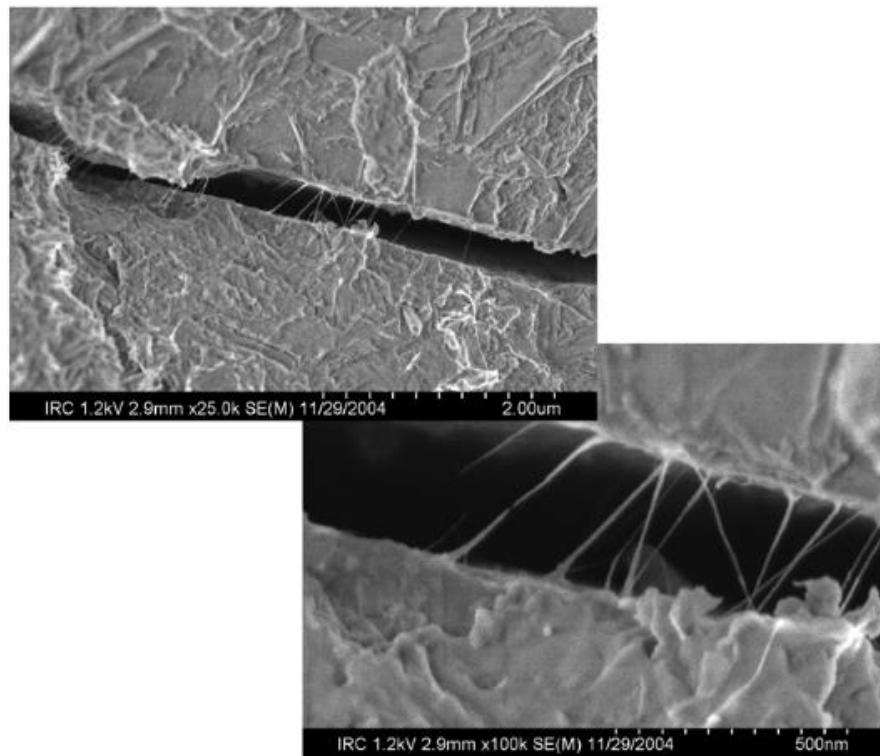


Fonte: Mehta *et al.* (2008)

Makar *et al.* (2005) identificaram pontes de NTC nos compósitos cimentícios, indicando um comportamento de reforço clássico. Além disso, seus estudos identificaram uma maior taxa de hidratação com a adição. A Figura 6 apresenta as imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) produzidas pelo estudo, que mostra as pontes de NTC presente na fratura do compósito.

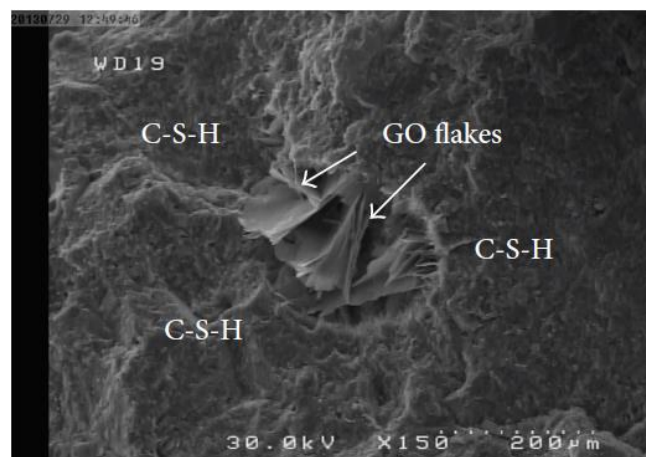
Por outro lado, Babak *et al.* (2014) estudaram o desempenho do óxido de grafeno (OG) na melhoria de propriedades mecânicas em compósitos de cimento, verificando que a resistência a tração da argamassa produzida, com teores de até 1,5%, obteve-se um aumento de resistência a tração de 48%. As observações revelaram uma boa ligação entre as superfícies do OG e a matriz de cimento. Além disso, análises de difração - DRX mostraram um aumento da produção de tobermorita (estrutura semelhante ao C-S-H) em relação a referência. A Figura 7 apresenta a imagem produzida por microscopia eletrônica de varredura (MEV) onde é possível observar a interação de OG com a pasta, apresentando o efeito de ponto de nucleação.

Figura 6 - Microscopia eletrônica de varredura de pontes de NTC em compósito cimentício aos 3 dias de idade



Fonte: Makar *et al.* (2005).

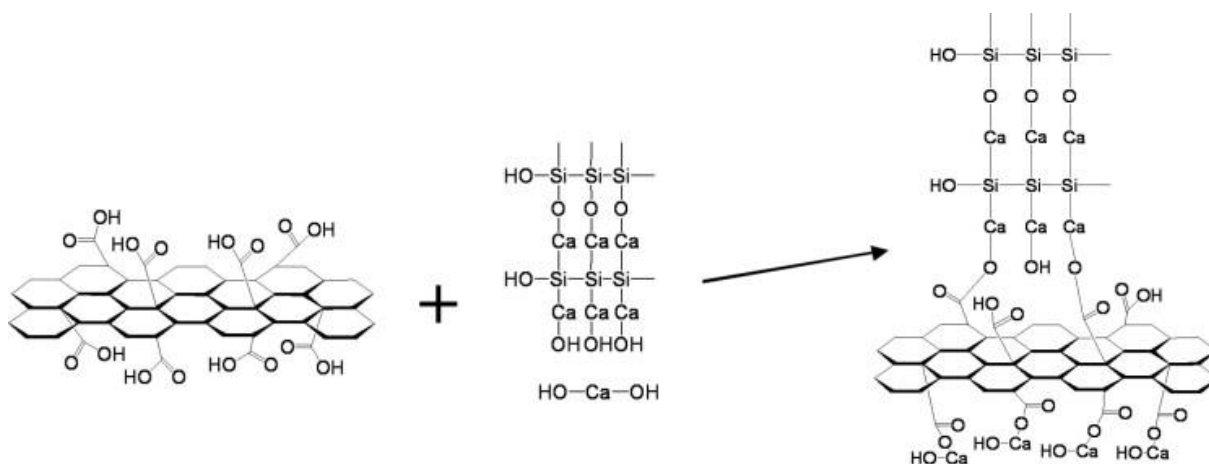
Figura 7 - Microscopia eletrônica de varredura de óxido de grafeno na matriz de cimento Portland



Fonte: Babak *et al.* (2014).

Pan *et al.* (2015) explica que o reforço mecânico obtido pela adição do óxido de grafeno é atribuído pela interação entre a nanopartícula e a matriz cimentícia, através das reação entre os grupos de carboxilas da superfície da adição, com o C-S-H ou o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . A interação pode formar uma forte ligação covalente entre a interface do óxido de grafeno e a matriz cimentícia, conforme ilustra a Figura 8.

Figura 8 - Interação entre grupos de carboxilas e matriz cimentícia



Fonte: Pan *et al.* (2015).

Entretanto, as características do NTC e do óxido de grafeno apresentam potencial para outras aplicações, beneficiando-se da alta condutividade térmica e elétrica dessas adições.

#### 2.4.1 Condutividade Térmica E Elétrica Em Matriz Cimentícia Com Adições De Carbono

A resistividade elétrica é uma das principais propriedades para a avaliação do comportamento elétrico de materiais cimentícios. O controle microestrutural do concreto, influenciado pela relação água/aglomerante, tipo de cimento utilizado, agregados e uso de aditivos e adições, influencia essa propriedade. O uso de adições contribui para o aumento da resistividade elétrica, principalmente pelo refinamento de poros, diminuindo a permeabilidade, e pela densificação da matriz, devido a formação de mais C-S-H (ALMEIDA, 2021; SANTOS, 2006).

Os processos de degradação de matrizes cimentícias são diretamente influenciados pela condutividade elétrica do material. Em materiais cimentícios, a condutividade elétrica geralmente ocorre por meio de íons dissolvidos na água presente nos poros do concreto, como o  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  e  $\text{OH}^-$ . Essa condutividade, no entanto, é considerada prejudicial na utilização de concreto armado, pois a difusão dos íons estimula mecanismos de degradação do concreto e de corrosão da armadura (ALMEIDA, 2021; CALLISTER; RETHWISCH, 2014; MEHTA; MONTEIRO, 2008; TAYLOR, 2004). Portanto, o aumento da durabilidade de matrizes cimentícias com a adição de carbono pode ser atribuída justamente pela densificação do material, pelos pontos de nucleação de C-S-H.

O mecanismo de condutividade elétrica, no entanto, atribuído à matriz cimentícia com adição de carbono é por condutividade eletrônica, que esses materiais apresentam. Dessa

forma, a pasta de cimento hidratada adquire a capacidade de conduzir eletricidade devido ao transporte de elétrons livres pelas partículas de adições presentes no meio, que formam uma rede de percolação elétrica.

A lei de Ohm relaciona a tensão (U) aplicada a um meio à corrente (I) e à resistência (R) do meio de conduzir essa corrente. Assim, a resistência elétrica é dada pela Equação 3.

$$R = \frac{U}{I} \quad (3)$$

A resistividade elétrica ( $\rho$ ), por sua vez, depende da geometria do material. Logo, conhecendo a resistência, é possível determinar a resistividade do material, através da Equação 4.

$$\rho = \frac{RA}{l} \quad (4)$$

Onde:

l = comprimento do corpo;

A = área da seção transversal perpendicular a direção da corrente.

A condutividade elétrica ( $\sigma$ ) é definida pelo inverso da resistividade elétrica. Assim, pode ser calculada pela Equação 5.

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (5)$$

A condutividade térmica (k) se dá pelo fluxo de calor (q) transmitido por unidade de área, dada uma variação de temperatura. O fluxo de calor, em um regime estacionário, isto é, quando o fluxo de calor não varia ao longo do tempo, pode ser calculado pela Equação 6.

$$q = -k \frac{dT}{dx} \quad (6)$$

A condutividade térmica, para matrizes cimentícias, depende de vários fatores, devido à natureza heterogênea do meio. Asadi *et al.* (2018) cita alguns desses fatores, incluindo:

- Teor de umidade: a condição de saturação potencializa a condutividade térmica;
- Temperatura do corpo: quanto maior a temperatura, menor será a condutividade do meio;
- Composição mineralógica: a origem e composição de agregados e adições presentes em concretos influenciam na condutividade térmica;
- Densidade: a densificação da matriz tende a aumentar a condutividade térmica.

Nesse sentido, adições que potencializem a densificação da matriz cimentícia e, ao mesmo tempo, que possuem características de alta condutividade, podem gerar matrizes com maior condutividade térmica.

A condução térmica é o fenômeno onde o calor em um certo meio é transportado de uma região com altas temperaturas para regiões de menor temperatura. Assim, pode-se definir que a condutividade térmica é a facilidade de um certo material de transferir essa energia. Já a condutividade elétrica é a facilidade de o material transportar corrente elétrica. Essas propriedades são relacionadas, já que a condução de elétrons por um meio, gera vibrações sobre as regiões de interação com esses elétrons. Portanto, pode-se dizer que um material de alta condutividade elétrica é também um bom condutor térmico (CALLISTER; RETHWISCH, 2014)

Estudos feitos por Jang *et al.* (2017) apresentaram resultados de aumento da condutividade elétrica da pasta de cimento Portland com adições de NTC de paredes múltiplas, onde, devido a uma rede de percolação formado por esse material, promoveu-se o transporte de carga elétrica no meio. O estudo levantou teores que variam de 0,09% a 1,69%, com uma relação água/aglomerante de 0,5, constatando a diminuição da resistividade elétrica das matrizes formadas.

A partir desses estudos, consta-se que pequenos teores de adição são suficientes para uma grande alteração da condutividade elétrica, formando uma rede de percolação que promoverá o transporte de elétrons. Entretanto, teores elevados comprometem a dispersão das adições, o que pode causar aglomerações e, assim, podendo reduzir as resistências mecânicas da pasta. Além disso, com teores maiores, não haverá ganho significativo de condutividade elétrica, por existir uma rede de percolação bem estabelecida. Isso implica que o controle do teor das adições é de extrema importância, para aproveitar o máximo das propriedades que a adição pode proporcionar às matrizes de cimento (ALMEIDA, 2021; JANG *et al.*, 2017; LE; DU; PANG, 2014).

Makar *et al.* (2005) propuseram dois procedimentos para melhorar a dispersão de NTC na matriz cimentícia. O primeiro se baseia na agitação dos NTCs em água com a presença de um superplastificante. O segundo foi a utilização de uma solução de NTC disperso em etanol, na qual foi acrescentada certa quantidade de cimento seguido por agitação da mistura.

Batiston *et al.* (2021) estudaram a relação de aspecto dos nanotubos de carbono na reologia, condutividade térmica e desempenho mecânico de pastas de cimento Portland. Seu estudo demonstrou que, quanto maior a relação entre o comprimento e a largura da estrutura

(relação de aspecto) e o teor de NTC, maior será a condutividade térmica esperada. No entanto, uma relação de aspecto elevada pode prejudicar a dispersão adequada da adição na matriz, prejudicando a trabalhabilidade e resistência mecânica do compósito. O estudo se baseou em teores de 0,05% e 0,10%, com relações de aspecto que variam de 35 a 3500. O estudo também concluiu que existe uma relação de aspecto intermediária (~250) mais eficaz para melhorar a condutividade térmica da pasta de cimento.

Há uma escassez de estudos que visam a condutividade térmica das pastas de cimento com adições de carbono, geralmente havendo mais estudos relacionados ao calor de hidratação gerado nas matrizes com as adições. O presente trabalho, portanto, optou-se pela utilização de adições de carbono, visando produzir matrizes cimentícias condutoras, se apoiando no mecanismo de condução elétrica via elétrons livres das adições. Além disso, o trabalho também visa a produção de matrizes cimentícias com maior condutividade térmica, se aprofundando nos efeitos da microestrutura das matrizes geradas.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

As adições a base de carbono vêm ganhando cada vez mais notoriedade no meio técnico e científico. As interações entre essas adições e o cimento Portland são objetos de estudo que podem proporcionar várias aplicações. Assim, o presente trabalho busca entender as relações microestruturais de pastas de cimento Portland com a adição de óxido de grafeno e nanotubos de carbono, dando ênfase ao potencial de condutividade elétrica e térmica das pastas produzidas.

A metodologia foi desenvolvida em parceria com Almeida (2021), onde os estudos que envolvem principalmente a condutividade elétrica das matrizes com essas adições está sendo trabalhados em sua dissertação. A metodologia adotada para o ensaio de condutividade térmica se baseia no trabalho de Gonçalves (2020) e Vilela(2017).

#### 3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

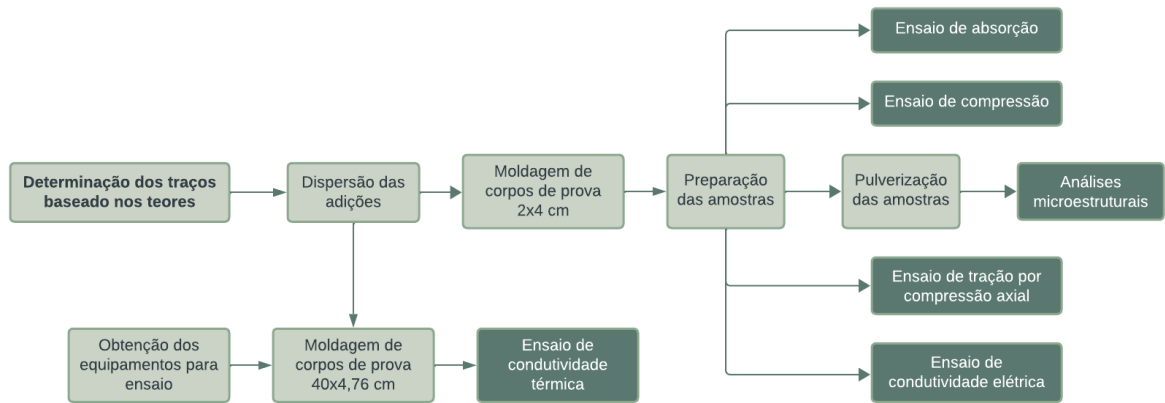
Para desenvolvimento da pesquisa foram produzidas pastas de cimento com adição de 0,0; 0,05; 0,07 e 0,10% de NTC e OG, como substituição parcial do cimento, dando continuidade ao trabalho de Almeida (2021), estendendo a faixa de teores viáveis para as adições.

A relação água/aglomerante foi fixada em 0,4%, se baseando nos estudos de Jang *et al.* (2017), onde o fator a/c menor potencializou o aumento da condutividade elétrica devido a menor porosidade apresentada. A dispersão da adição de NTC e OG foi realizada em água por um dispersor mecânico Utra Turrax T18 da marca Ika. Procurando garantir a dispersão adequada das adições em suspensão, foi utilizado um aditivo superplastificante de policarboxilato, baseados nos estudos de Zhao *et al* (2016), onde o superplastificante se mostrou o mais eficaz. A quantidade de superplastificante adicionada corresponde à 50% da massa de adição. O planejamento experimental seguiu conforme o fluxograma apresentado na Figura 9.

As condições estabelecidas para as caracterizações microestruturais e físicas de cimento de referência e com as adições serão em seu estado fresco e três idades de cura, sendo de 7, 28 e 90 dias. No estado endurecido das pastas, foram avaliadas a absorção, resistividade elétrica, condutividade térmica, compressão e tração. Os ensaios de tração foram realizados por compressão diametral. Para isto, foram moldados corpos de prova cilíndricos na dimensão de 2 cm de diâmetro e 4 cm de altura.



Figura 9 - Fluxograma de planejamento experimental



Fonte: o autor.

A Figura 10 mostra a moldagem dos corpos de prova, utilizando uma base de compensado e canos de PVC de 2 cm de diâmetro interno, cortados na direção longitudinal para facilitar a desmoldagem.

Figura 10 - Molde para corpos de prova de cimento Portland com adição de carbono



Fonte: O autor.

Para o ensaio de condutividade térmica, no entanto, seguiu-se a metodologia de Gonçalves (2020), adaptada de Vilela (2017), onde foram moldados corpos de prova cilíndricos de dimensão de 4,51 cm de diâmetro e aproximadamente 40 cm de comprimento, utilizando canos de PVC de 2 polegadas, cortados longitudinalmente para facilitar a desmoldagem. A Figura 11 apresenta um modelo de molde para os corpos de prova a serem utilizados. Cada corpo de prova foi moldado com um resistor cartucho no seu interior. Para isso, foram utilizados tampões de PVC, com furos semelhantes ao do diâmetro do resistor, a fim de garantir a boa localização no interior do corpo. O resistor foi revestido por pasta térmica, para a melhor dissipação do calor no interior do corpo. O molde ainda conta com

dois furos, um centralizado e outro a 9 cm do centro, onde foram colocados os termopares utilizados no ensaio.

Figura 11 - Molde para confecção de corpos de prova cilíndricos para ensaio de condutividade térmica



Fonte: o autor.

Para as caracterizações microestruturais das pastas de cimento, de referência e com as adições de carbono, foram realizadas análises por difração de raios X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) com o intuito de obtenção de imagens da microestrutura da pasta formada. Também foi feita a análise química por espectrometria de energia dispersiva (EDS).

Para tais caracterizações, foi realizado a moagem dos corpos de prova para a obtenção de um pó passante em uma peneira de malha 0,75mm. Os ensaios de caracterização química e microestruturais foram realizados majoritariamente no C-Labmu, no Campus da Universidade Estadual de Ponta Grossa.

### 3.2 MATERIAIS

O cimento Portland utilizado é do tipo CP II F (cimento composto com adição inerte de fíler calcário) da marca Itambé, visando minimizar possíveis interferências nas reações químicas da hidratação e por estar disponível comercialmente na região. A Tabela 2 apresenta as características químicas e físicas do cimento a ser utilizado.

A adição de óxido de grafeno a ser utilizado foi fornecida pela Amazonas Grafeno, presente no estado de Tocantins. Será utilizado o produto GP1 do catálogo da empresa.

A adição de nanotubos de carbono foi fornecida pela empresa belga Nanocyl. Será utilizado o produto NC 7000<sup>TM</sup> do catálogo da empresa, que consiste em um NTC de paredes múltiplas.

Tabela 2 - Características químicas e físicas do cimento Portland CP II-F

Ensaio											
Ensaio químico											
Perda ao fogo (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	CaO Livre (%)	Equiv. Alcalino (%)	Resíduo Insolúvel (%)		
6,84	4,29	18,41	2,81	59,87	2,49	2,62	1,70	0,66	1,37		
Ensaio físico											
Massa espec. (g/cm <sup>3</sup> )	Exp. quente (mm)	Início de pega (min)	Fim de pega (min)	Cons. Normal (%)	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	Retido #200 (%)	Retido #325 (%)	1 dia (MPa)	3 dias (MPa)	7 dias (MPa)	28 dias (MPa)
3,06	0,00	219	267	25,4	3,342	2,27	8,00	15,5	29,3	34,6	41,5

Fonte: Itambé (2023).

### 3.3 MÉTODOS

Foram produzidas dispersões das adições em água, com base na fração de adição em substituição de massa de cimento (0,05%; 0,07% e 0,10%) misturadas na água de amassamento, obtendo uma mistura para aplicação direta ao cimento.

A base produzida teve a adição de um superplastificante a base de policarboxilato em uma quantidade de 50% da massa da adição de carbono, para cada mistura. O superplastificante a base de policarboxilato foi substituído parcialmente na parcela da água. A Tabela 3 apresenta as massas para cada teor de adição considerado para a realização de todos os ensaios.

Tabela 3 - Quantitativo de materiais usados para respectivos teores de adição

Material	Ref;	Óxido de Grafeno			Nanotubo de carbono		
Teor	-	0,05%	0,07%	0,10%	0,05%	0,07%	0,10%
Cimento CII – F (g)	1000	999,5	999,3	999,0	999,5	999,3	999,0
Adição(g)	-	0,5	0,7	1,0	0,5	0,7	1,0
Água (g)	400	339,75	399,65	399,5	399,75	399,65	399,5
Aditivo (g)	-	0,25	0,35	0,50	0,25	0,35	0,50
TOTAL (g)	8400	1400	1400	1400	1400	1400	1400

Fonte: o autor.

As quantidades, em gramas, foram estipuladas considerando que cada corpo de prova exija 50g de pasta para sua confecção. Foi determinado, então, o número de corpos de prova a serem analisados ou utilizados para cada ensaio, conforme a Tabela 4.

Para os corpos de prova utilizados para o ensaio de condutividade térmica, os mesmos valores serão adotados, considerando que cada corpo de prova exija 1400g de pasta para sua confecção, a fim de evitar erros de dosagem em modelos diferentes de corpo de prova.

Tabela 4 - Quantitativo de corpos de prova a serem utilizados para cada ensaio de caracterização e cada idade analisada.

Análise	REF	Óxido de Grafeno			Nanotubo de carbono		
		Teor	0,05%	0,07%	0,10%	0,05%	0,07%
Compressão	5	5	5	5	5	5	5
Tração	5	5	5	5	5	5	5
Condutividade elétrica	3	3	3	3	3	3	3
EDS/MEV	1	1	1	1	1	1	1
DRX	1	1	1	1	1	1	1
Absorção	3	3	3	3	3	3	3
Extra	2	2	2	2	2	2	2
TOTAL	140	20	20	20	20	20	20

Fonte: O autor.

Para realizar a homogeneização das misturas foi utilizado um dispersor mecânico Ultra Turrax T18 da marca Ika com grau de agitação de 10.000 rotações por minuto, onde permaneceu por 10 minutos, totalizando 100.000 rotações. Para a análise das dispersões, foi utilizado um microscópio óptico do modelo SZ61 da marca Olympus, disponibilizado pelo LabMu, conforme mostra a Figura 12. A Figura 13 apresenta o dispersor utilizado durante a mistura.

O procedimento de moldagem das pastas de cimento seguiu o padrão pela NBR 7215, conforme a metodologia adotada por Almeida (2021), para a obtenção de corpos de prova cilíndricos nas dimensões de 2 cm de diâmetro por 4 cm de altura. Seguiu-se, também, a metodologia de Gonçalves (2020) para a obtenção de corpos de prova cilíndricos para o ensaio de condutividade elétrica.

Figura 12 - Microscópio utilizado para a análise de dispersão



Fonte: O autor.

Figura 13 - Dispersor mecânico Ultra Turrax T18 – Ika



Fonte: O autor.

### 3.3.1 Caracterização No Estado Fresco

Foi realizado o estudo de trabalhabilidade para as pastas de cimento de referência e com as adições de carbono, tendo como objetivo avaliar a influência de adições de OG e NTC na consistência das pastas de cimento. Para isso, foi realizado o ensaio de *flow table* com 30 golpes, a fim de determinar a consistência da pasta produzida.

### 3.3.2 Caracterização Microestrutural E Químicas

Foram aplicadas análises qualitativas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) a fim de investigar a morfologia das fases formadas e compostos químicos na pasta de cimento de referência e nas pastas com as adições de carbono.

Foi realizado a análise de difração de raios X (DRX) para a caracterização das pastas de cimento hidratadas de referência e nas pastas com as adições de carbono a fim de investigar a influência das adições nas fases cristalinas provindas da hidratação do cimento.

### 3.3.3 Caracterizações Mecânicas e Físicas

Para os ensaios mecânicos e físicos, foi necessário que os corpos de prova tivessem dimensões e superfícies limpas e retas. Para isso, optou-se pelo desbaste dos corpos de prova, para a máxima planicidade, evitando possíveis imperfeições provindas da moldagem. Para isso, utilizou-se uma serra mármore.

Foram realizados ensaios de resistência à compressão e a tração por compressão diametral para a verificação da influência das adições nessas propriedades. O ensaio foi adaptado para os corpos de prova de pasta de cimento, a partir da NBR 7215 (2019) e NBR 7222 (2011). Utilizou-se um rompedor do modelo AG-1 da marca Shimadzu, disponibilizado pelo laboratório de Engenharia de Materiais, conforme mostra a Figura 14.

Figura 14 - Rompedor modelo AG-1 utilizado para os ensaios de compressão e tração



Fonte: o autor.

Foi avaliado a influência das adições de carbono na porosidade das pastas de cimento, por meio de ensaios de absorção por imersão, adaptado a partir da NBR 9778 (2005).

Para os ensaios, foi determinado a massa de 3 amostras para cada teor de adição. Então, foi calculado a média e determinado para todos os valores:

- Massa seca ( $m_s$ );
- Massa saturada ( $m_{sat}$ );
- Massa imersa ( $m_i$ );
- Índice de absorção ( $A$ );
- Índice de vazios ( $I_v$ );
- Peso específico seco ( $\rho_s$ );

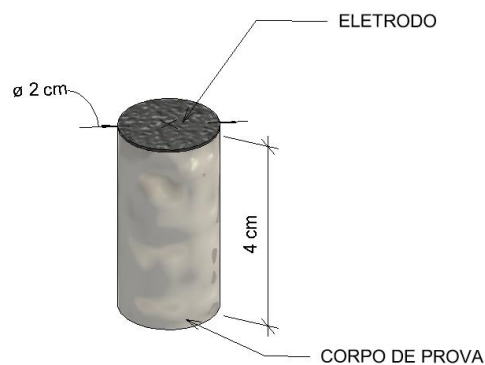
- Peso específico saturado ( $\rho_{\text{sat}}$ );
- Peso específico real ( $\rho_r$ ).

No ensaio, foi realizado o peso da massa seca, massa saturada aparente seca e massa submersa. Com isso, obteve-se os índices de absorção, de vazios e as massas específicas das amostras analisadas. As amostras foram armazenadas em uma estufa a 40°C, por 2 dias antes da medida da massa seca e, então, submersas em água por 2 dias, para a determinação das massas saturada aparente seca e submersa.

A análise de resistividade elétrica foi aplicada às pastas de referência e com as adições de carbono, com a metodologia realizado no trabalho de Jang *et al.* (2017). Foi aplicado uma tensão alternada e medindo o valor da corrente que atravessa o corpo de prova. Então, foi calculada a resistência equivalente (R) do material por meio da Lei de Ohm (ALMEIDA, 2021; CALLISTER; RETHWISCH, 2014).

A partir da resistência equivalente, foi possível calcular a resistividade elétrica e, a partir desta, é possível chegar à condutividade elétrica calculada a partir do inverso de da resistividade elétrica ( $1/\rho$ ). A montagem para o sistema se dá em uma aplicação de diferença de potencial e medição da resistividade para as amostras de pasta de cimento hidratado, conforme a Figura 15.

Figura 15 - Modelo esquemático do corpo de prova preparado para o ensaio de resistividade elétrica



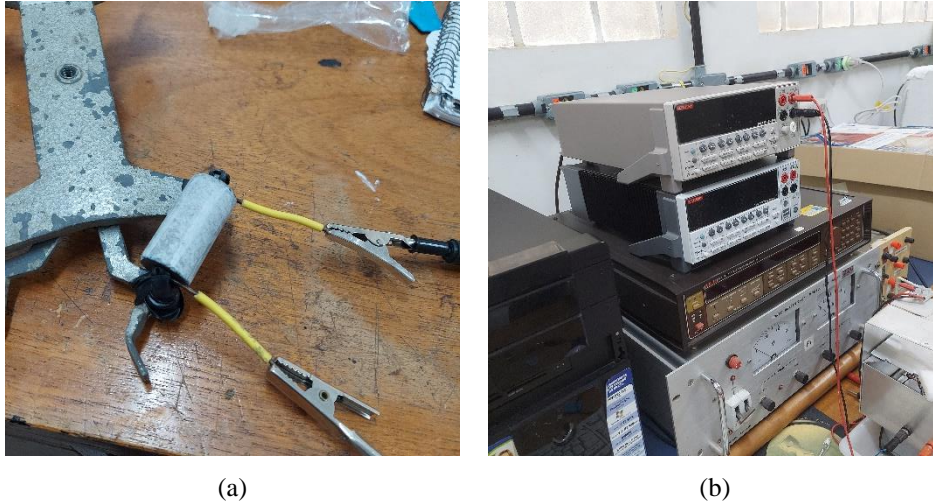
Fonte: O autor.

O mecanismo consiste na utilização de um eletrodo a base de grafite nas duas superfícies planas das amostras, maximizando o contato elétrico pelas possíveis irregularidades do corpo de prova e a distribuição da corrente sobre a superfície.

Os corpos de prova foram ligados à um multímetro de bancada do modelo 2410 SourceMeter da marca Keithley, para a obtenção da corrente passante, dada uma variação de

tensão de 0 a 50V. O aparato do ensaio (a) é apresentado na Figura 16, juntamente com o modelo do multímetro (b).

Figura 16 - Aparato para ensaio de condutividade elétrica (a) e multímetro utilizado para o ensaio (b)



Fonte: O autor.

As análises de condutividade térmica foi aplicada às pastas de referência e com as adições de carbono, seguindo a metodologia proposta por Gonçalves (2020), adaptada do trabalho de Vilela (2017). A Figura 17 apresenta a esquematização do ensaio de condutividade térmica. Foi posicionado 2 termopares nos furos previamente estabelecidos nos corpos de prova, conforme a Figura 18, a fim de determinar a temperatura no centro do corpo de prova e 2 termopares na superfície do corpo. As extremidades dos corpos de prova foram isoladas com lã de vidro, a fim de minimizar a transferência de calor longitudinal. As temperaturas foram medidas em intervalos de tempo de 5 em 5 minutos, até que não haja variações entre elas.

Os resistores foram nomeados, conforme a posição no corpo de prova (interior ou superfície) e a distância (1 – centro e 2 – periferia). O resistor escolhido foi fornecido pela empresa FogoForte, com 75W de potência e 127V de tensão e dimensões de 40 cm de comprimento e 9,53 mm de diâmetro. O corpo de prova, por sua vez, possui 40 cm de comprimento e 4,70 cm de diâmetro

A partir da variação de temperatura, é possível determinar a condutividade térmica, a partir da Equação 7 (GONÇALVES, 2020; VILELA, 2017).

$$k = \frac{q_r \cdot \ln(r_2/r_1)}{2\pi \cdot L \cdot \Delta T}$$

Onde:



$Q_r$  = potência do resistor (75W);

$R_1$  = raio do resistor (0,004765 m)

$R_2$  = raio do corpo de prova (0,02346 m)

$L$  = comprimento do corpo de prova (0,40 m)

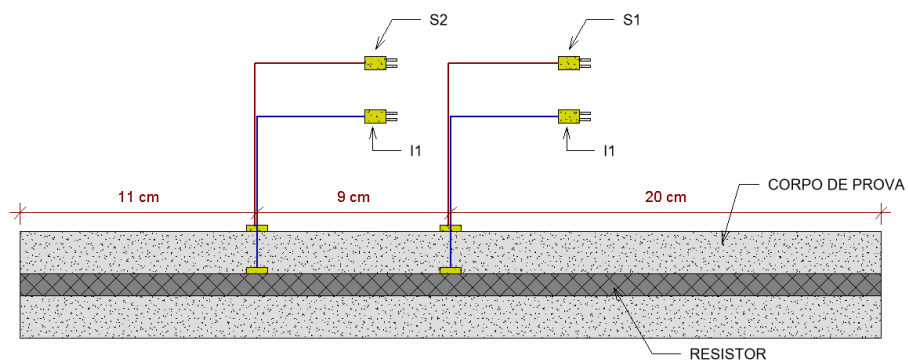
$\Delta T$  = variação de temperatura entre o centro e a superfície do corpo de prova (K).

Figura 17 - Ensaio de condutividade térmica



Fonte: O autor.

Figura 18 - Posicionamento dos termopares no corpo de prova para ensaio de condutividade térmica



Fonte: O autor.

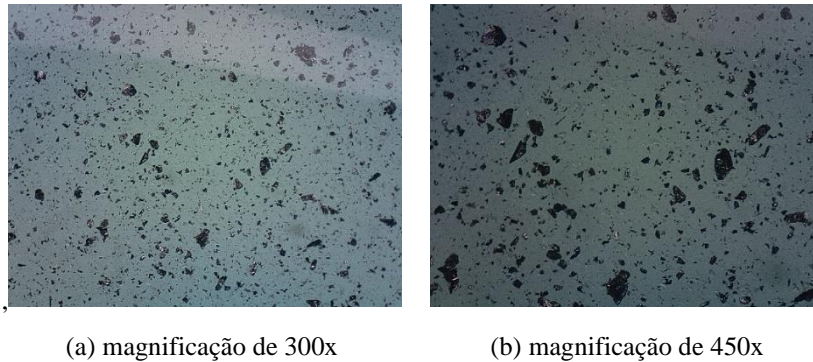
Devido à falta de equipamentos, para calcular a variação de temperatura, os termopares foram calibrados a partir de um multímetro, a fim de relacionar a tensão gerada a temperatura na ponta quente do termopar. Para a calibração, utilizou-se água fria, quente e em temperatura ambiente, com temperaturas determinadas com o auxílio de um termômetro.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 MICROSCOPIA ÓPTICA DAS DISPERSÕES

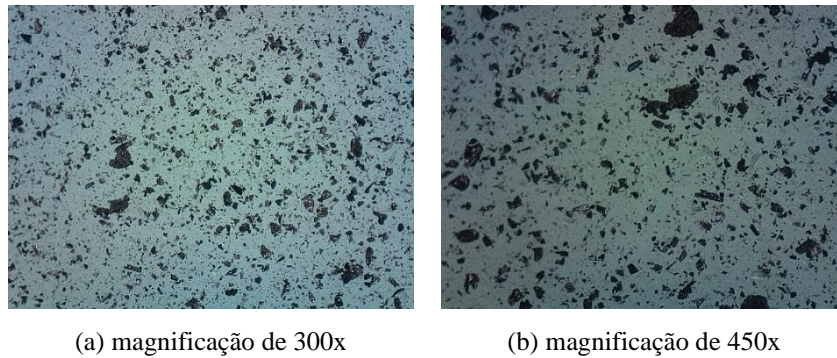
Após o início dos procedimentos laboratoriais, foi analisada a qualidade das dispersões das adições, com a presença de aditivo policarboxilato, conforme mostra as imagens da Figura 19 à Figura 24. A magnificação utilizada variou de 200x a 450x.

Figura 19 - Microscopia óptica com dispersão de óxido de grafeno, com teor de 0,05%.



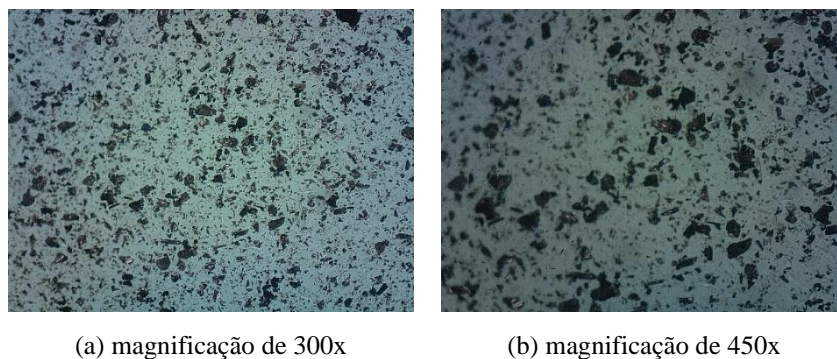
Fonte: O autor.

Figura 20 - Microscopia óptica com dispersão de óxido de grafeno, com teor de 0,07%.



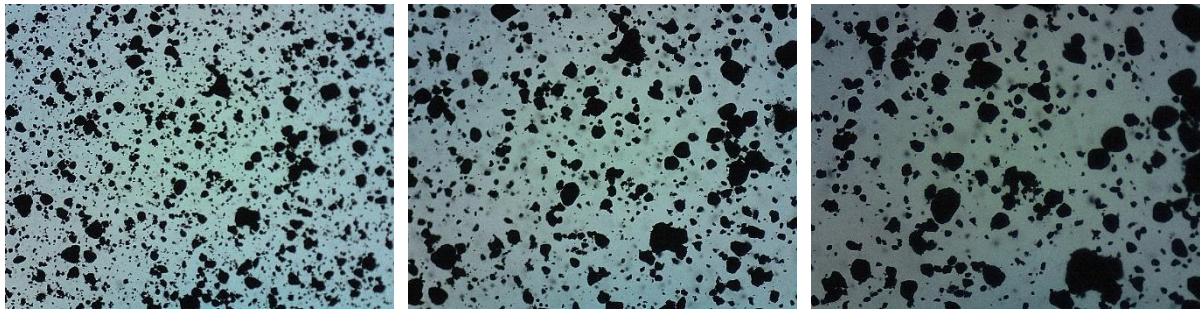
Fonte: O autor.

Figura 21 - Microscopia óptica com dispersão de óxido de grafeno, com teor de 0,10%.



Fonte: O autor.

Figura 22 - Microscopia óptica com dispersão de nanotubos de carbono, com teor de 0,05%.



(a) magnificação de 200x

(b) magnificação de 300x

(c) magnificação de 450x

Fonte: o autor.

Figura 23 - Microscopia óptica com dispersão de nanotubos de carbono, com teor de 0,07%.



(a) magnificação de 200x

(b) magnificação de 300x

(c) magnificação de 450x

Fonte: o autor.

Figura 24 - Microscopia óptica com dispersão de nanotubos de carbono, com teor de 0,10%.



(a) magnificação de 200x

(b) magnificação de 300x

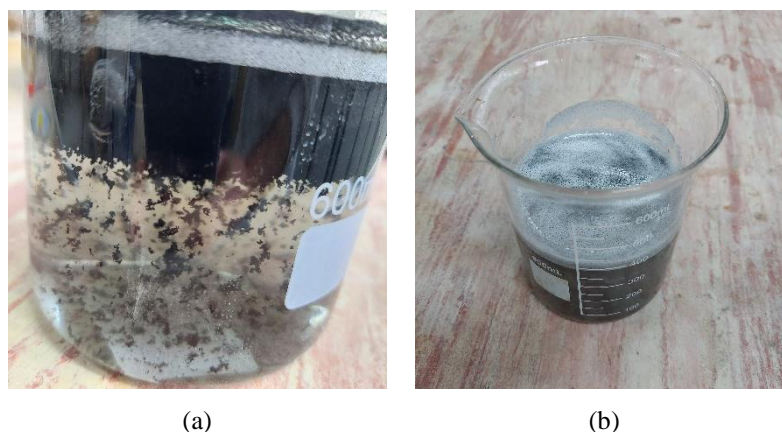
(c) magnificação de 450x

Fonte: o autor.

Conforme mostram as imagens obtidas, o óxido de grafeno apresenta uma configuração mais dispersa se comparada ao nanotubo de carbono. Isso pode ser explicado pelo volume da adição de nanotubos ser significativamente maior em comparação ao óxido de grafeno. No entanto, é perceptível, em ambos os casos, um aumento da quantidade de aglomerados formados, conforme o aumento dos teores.

Mesmo após a mistura das adições com água e superplastificante, as adições, tenderam a voltar a flocular ou formar aglomerados. Isso foi muito visível nas misturas com nanotubos de carbono, conforme a Figura 25(a). Já as misturas de óxido de grafeno apresentaram uma aparência mais homogênea, entretanto, com a tendência de formar uma “espuma” por cima do material, conforme mostra a Figura 25(b).

Figura 25 - Suspensão de nanotubo de carbono (a) e suspensão de óxido de grafeno (b).



Fonte: O autor.

Devido a essas características, foi necessário a imediata mistura ao cimento, logo após a dispersão mecânica, buscando evitar que a mistura se aglomerasse antes das moldagens. Durante a mistura da pasta, percebeu-se uma maior viscosidade nas misturas que continham as adições de nanotubos de carbono.

Após a mistura das pastas de cimento, aditivo e adições, foram executados os ensaios de espalhamento na mesa de consistência, durante a moldagem para todas as idades analisadas. O ensaio de flow table apresentou os valores, conforme a Tabela 5.

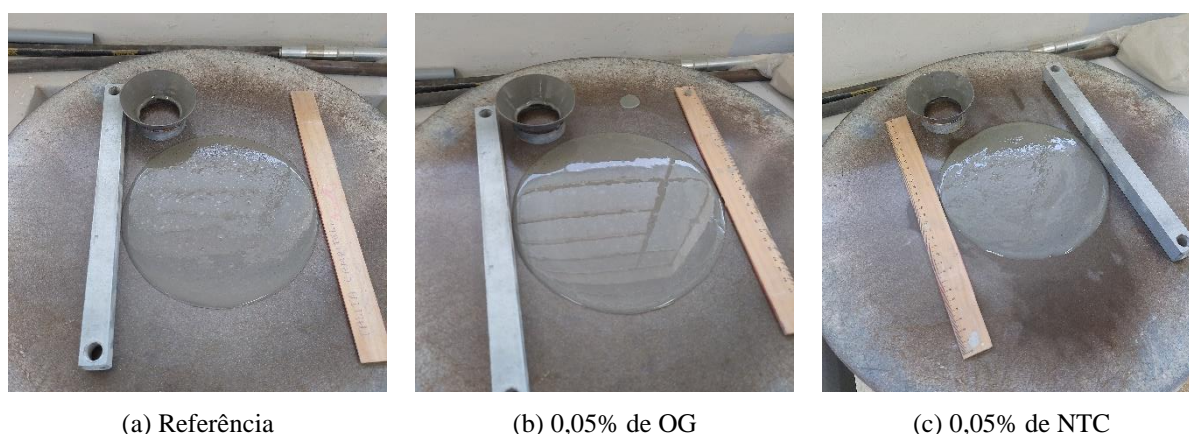
Tabela 5 - Resultados do ensaio de flow table durante a moldagem das amostras para as idades analisadas, em cm

Adição	Ref.	Óxido de Grafeno			Nanotubo de carbono		
		0,05%	0,07%	0,10%	0,05%	0,07%	0,10%
Teor	-	0,05%	0,07%	0,10%	0,05%	0,07%	0,10%
90 dias	20,2	20,9	21,2	22,3	20,6	19,9	19,6
28 dias	20	20,7	21,5	22,5	20,1	19,8	19,5
7 dias	20,3	21,1	22,4	21,9	20,1	20,3	19,8
<b>Média</b>	<b>20,2</b>	<b>20,9</b>	<b>21,7</b>	<b>22,2</b>	<b>20,3</b>	<b>20,0</b>	<b>19,6</b>

Fonte: o autor.

Através dos valores obtidos notou-se um pequeno aumento do espalhamento nos teores mais altos da adição do óxido de grafeno, se comparado ao traço de referência, indicando maior fluidez da pasta. Isso pode ser explicado pelo aumento da quantidade de superplastificante adicionado. Entretanto, com o aumento dos teores de nanotubos de carbono, houve uma diminuição do espalhamento da pasta. A Figura 26 apresenta a aparência das pastas durante o ensaio de flow table, onde é perceptível a diferença de textura entre elas.

Figura 26 - Espalhamento de flow table das pastas



(a) Referência

(b) 0,05% de OG

(c) 0,05% de NTC

Fonte: O autor.

Alguns autores apresentaram a mesma dificuldade de dispersão com as adições de NTC, com um aumento significativo da viscosidade e dificuldade ao escoamento (MA; QIAN; KAWASHIMA, 2018; MOHAMADIAN *et al.*, 2020). Foi perceptível o mesmo fato, no momento da moldagem dos corpos de prova, onde foi necessário, com o auxílio de uma haste de metal, a acomodação da pasta no molde, diminuindo as bolhas de ar formadas.

#### 4.2 COMPORTAMENTO NO ESTADO ENDURECIDO E MICROESTRUTURA

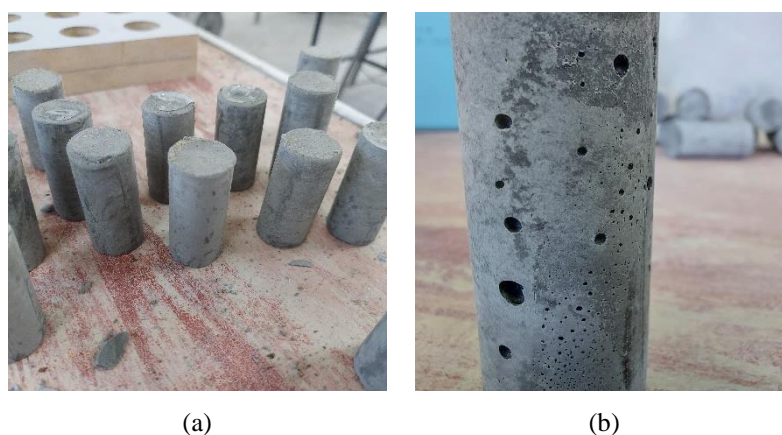
Analisando as fases formadas através dos ensaios de DRX, observou-se que não houve alteração significativa de compostos na microestrutura. Isso é explicado devido às adições utilizadas serem inertes. Também não foi possível identificar o composto de tobermorita (Cod. 34-2) nas fases formadas, cuja formação é citada por Babak *et al.* (2014) que relaciona com a de óxido de grafeno na pasta. O ângulo de difração do composto não apresentou semelhança com os picos formados nas amostras.

Os corpos de provas gerados durante a pesquisa apresentaram, no geral, uniformidade na superfície (Figura 27a). Entretanto, os corpos com adição de nanotubos de

carbono (Figura 27b) apresentaram muitos vazios na superfície, devido à dificuldade de acomodação da pasta nos moldes.

Entretanto, ao seccionar as amostras com serra de corte, estes vazios não foram encontrados no interior dos corpos de prova. Os resultados e imagens indicam a alteração de viscosidade e consistência das pastas com efeitos direto sobre a moldagem. Isso pode ser ocasionado devido a homogeneidade da pasta, já que não possui agregados que formem zonas de transição, onde seriam mais impactantes, principalmente para os comportamentos mecânicos do material.

Figura 27 - Corpos de prova cilíndricos com adição óxido de grafeno e referência (a) e corpo de prova com adição de 0,10% de nanotubos de carbono (b)



Fonte: O autor.

A hipótese para a formação das bolhas é que pela dificuldade de escoamento das pastas com a adição de NTC, o desmoldante utilizado durante a moldagem tenha se acumulado nas paredes do molde, formando os vazios aparentes na superfície do corpo de prova. Verifica-se, portanto, que os efeitos de alteração na consistência foram significativos para a moldagem dos corpos de prova, indicando cuidados adicionais quanto ao processo.

Na Tabela 6, Tabela 7 e Tabela 8 apresenta os valores médios dos dados obtidos através do ensaio de absorção, após o tratamento dos dados, por eliminação de espúrios, para cada adição.

Tabela 6 - Média com índices de absorção e vazios e pesos específicos para amostras de 7 dias de cura

(Continua)

	Teor	$m_s$ (g)	$m_{sat}$ (g)	$m_i$ (g)	A (%)	$I_v$ (%)	$\rho_s$	$\rho_{sat}$	$\rho_r$
Nanotubos de carbono	0,05%	32,09	34,70	17,36	8,12%	15,02%	1,85	2,00	2,18
	0,07%	29,93	32,36	16,41	8,15%	15,27%	1,88	2,03	2,21

Tabela 6 - Média com índices de absorção e vazios e pesos específicos para amostras de 7 dias de cura

(Conclusão)									
Nanotubos de carbono	0,10%	30,23	32,77	16,26	8,38%	15,34%	1,83	1,99	2,17
	0,05%	29,19	31,53	15,85	7,99%	14,87%	1,86	2,01	2,19
Óxido de grafeno	0,07%	30,79	33,48	16,69	8,72%	15,99%	1,84	1,99	2,18
	0,10%	31,17	33,82	16,85	8,50%	15,61%	1,84	1,99	2,18
Ref.	-	28,16	30,31	15,26	7,63%	14,27%	1,87	2,01	2,18

Fonte: O autor.

Tabela 7 - Média com índices de absorção e vazios e pesos específicos para amostras de 28 dias de cura

	Teor	$m_s$ (g)	$m_{sat}$ (g)	$m_i$ (g)	A (%)	$I_v$ (%)	$\rho_s$	$\rho_{sat}$	$\rho_r$
Nanotubos de carbono	0,05%	26,75	29,08	14,31	8,73%	15,71%	1,81	1,97	2,15
	0,07%	26,60	29,20	14,58	9,79%	17,81%	1,82	2,00	2,21
	0,10%	26,88	29,44	14,57	9,52%	17,22%	1,81	1,98	2,19
Óxido de grafeno	0,05%	28,95	31,46	15,80	8,67%	16,03%	1,85	2,01	2,20
	0,07%	29,32	31,85	15,95	8,65%	15,95%	1,84	2,00	2,19
	0,10%	28,88	31,55	15,77	9,24%	16,90%	1,83	2,00	2,20
Ref.	-	30,36	32,93	16,23	8,51%	15,42%	1,82	1,97	2,15

Fonte: O autor.

Tabela 8 - Média com índices de absorção e vazios e pesos específicos para amostras de 90 dias de cura

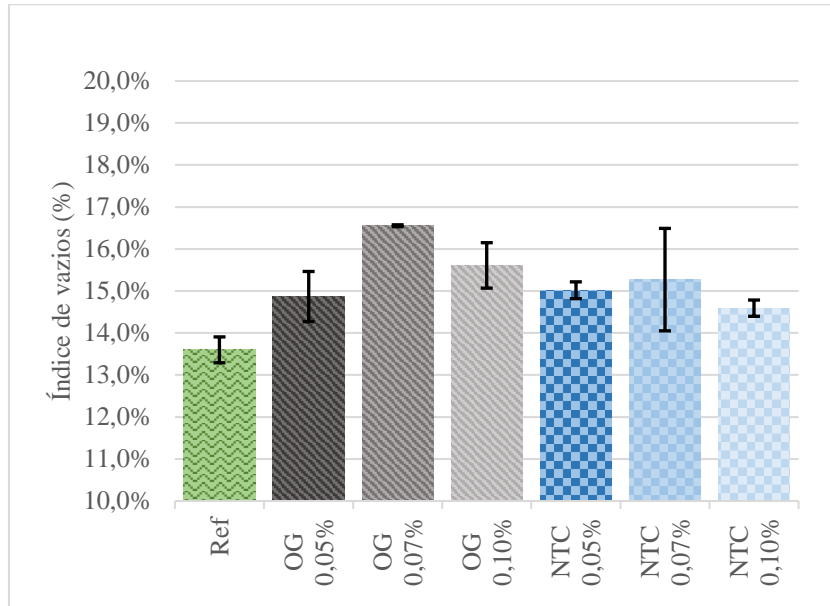
	Teor	$m_s$ (g)	$m_{sat}$ (g)	$m_i$ (g)	A (%)	$I_v$ (%)	$\rho_s$	$\rho_{sat}$	$\rho_r$
Nanotubos de carbono	0,05%	34,23	36,74	18,71	7,32%	13,87%	1,90	2,04	2,21
	0,07%	30,47	33,16	16,70	8,82%	16,33%	1,85	2,01	2,21
	0,10%	31,21	33,75	17,14	8,16%	15,26%	1,88	2,03	2,22
Óxido de grafeno	0,05%	26,93	29,09	14,91	8,03%	15,24%	1,90	2,05	2,24
	0,07%	30,47	33,03	16,00	8,39%	15,06%	1,79	1,94	2,11
	0,10%	26,98	29,57	15,35	9,62%	18,20%	1,90	2,08	2,32
Ref.	-	28,72	30,83	15,92	7,38%	14,14%	1,93	2,07	2,24

Fonte: O autor.

A partir dos valores obtidos, foi possível elaborar o Gráfico 1, Gráfico 2 e

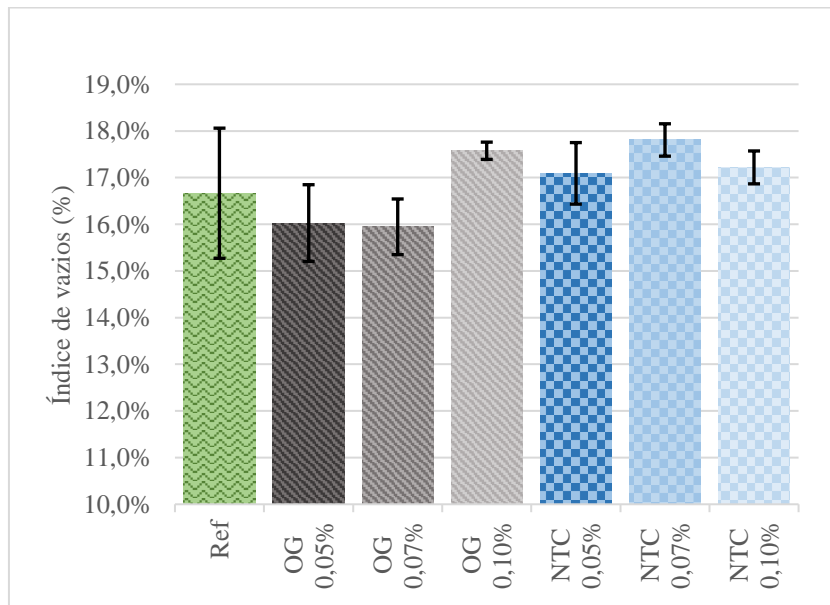
Gráfico 3.

Gráfico 1 - Índice de vazios obtidos das amostras com 7 dias de cura



Fonte: O autor.

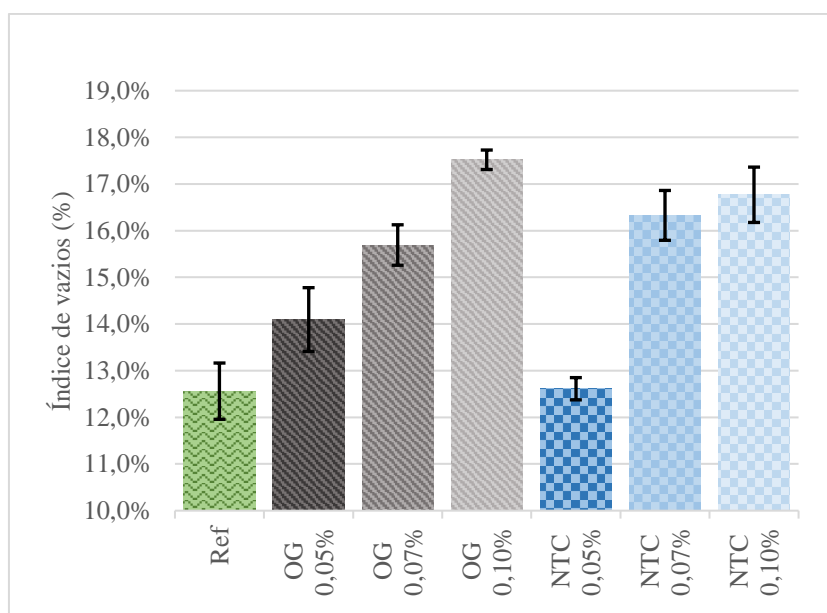
Gráfico 2 - Índice de vazios obtidos das amostras com 28 dias de cura



Fonte: O autor.



Gráfico 3 - Índice de vazios obtidos das amostras com 90 dias de cura



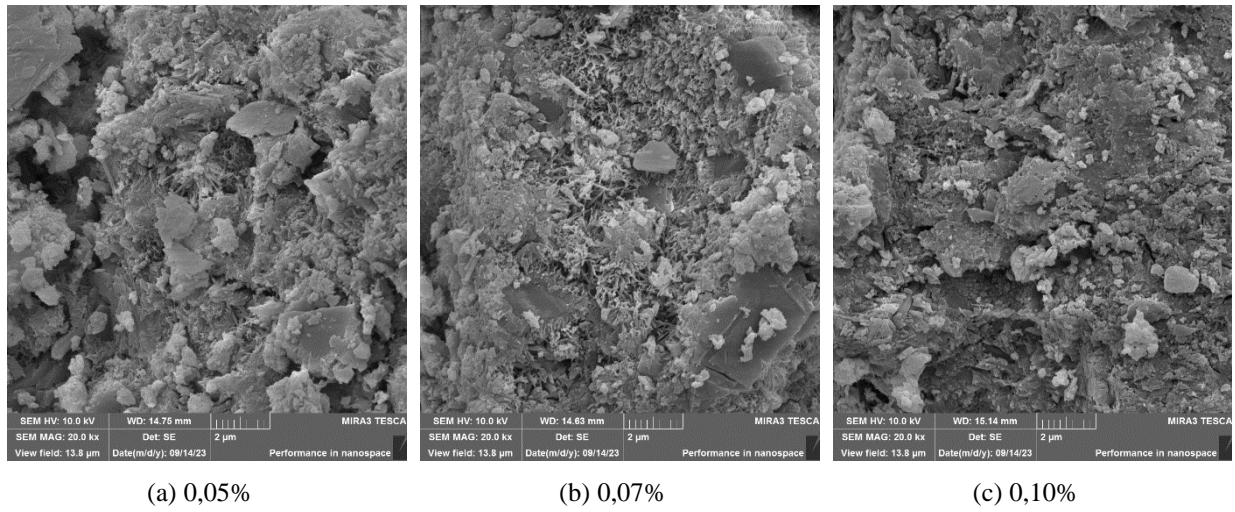
Fonte: O autor.

Observou-se uma variação de, no máximo, 2% no índice de vazios do traço de referência, em relação aos traços com as adições, nas primeiras idades, após o tratamento dos dados. Entretanto, os teores mais altos de adição apresentaram maior índice de vazios aos 90 dias. Isso pode ser ocasionado pela incorporação de ar durante o processo de cura.

Através das análises de MEV, obtiveram-se as imagens apresentadas da Figura 28 à Figura 33.

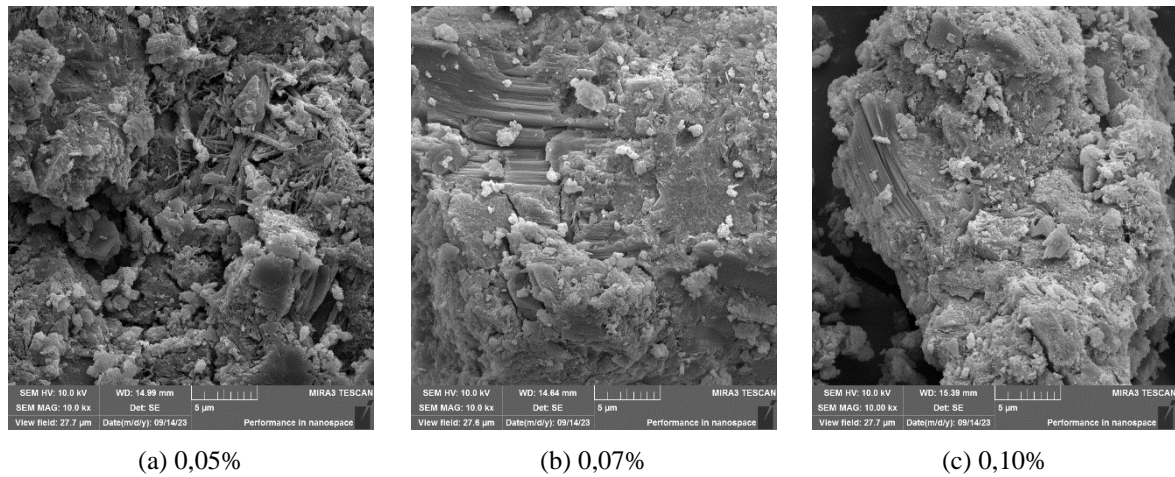
As análises de MEV aos 90 dias apontaram uma maior formação de material amorfo, provavelmente C-S-H, na amostra de referência (Figura 33), enquanto as outras amostras mostraram mais estruturas em placas (provavelmente etringita) e agulhas, além de formações rugosas que aparentam ser carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ). Contudo, para todas as amostras, não foi possível analisar as nanoadições devido a escala do microscópio utilizado.

Figura 28 - Imagens de MEV com zoom de 20kx, referente as amostras de óxido de grafeno com idade de 28 dias



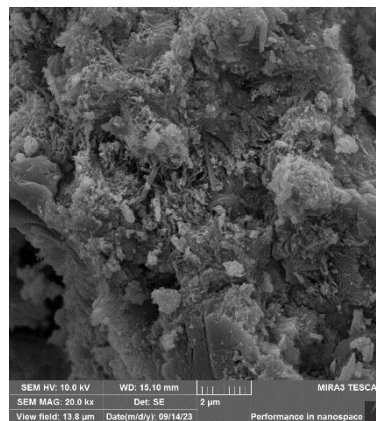
Fonte: O autor.

Figura 29 - Imagens de MEV com zoom de 10kx, referente as amostras de nanotubos de carbono com idade de 28 dias



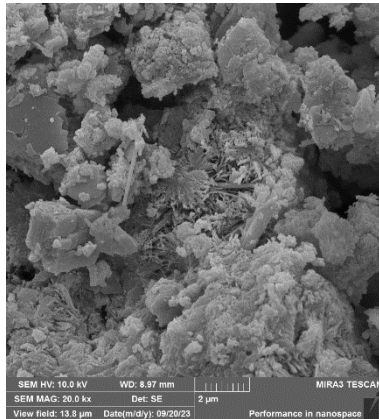
Fonte: O autor.

Figura 30 - Imagem de MEV com zoom de 20kx, referente as amostras de referência, com idade de 28 dias

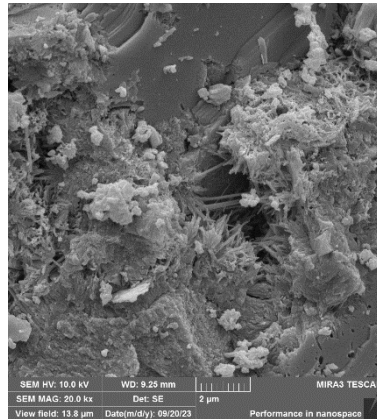


Fonte: O autor.

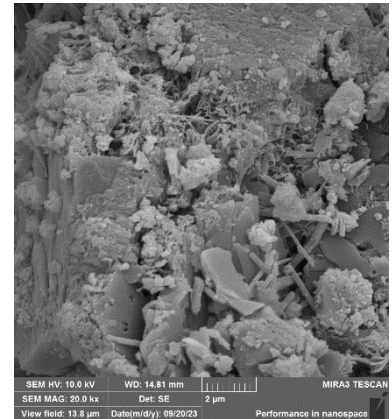
Figura 31 - Imagens de MEV com zoom de 20kx, referente as amostras de óxido de grafeno com idade de 90 dias



(a) 0,05%



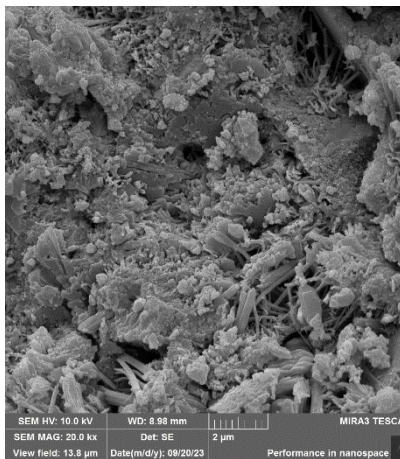
(b) 0,07%



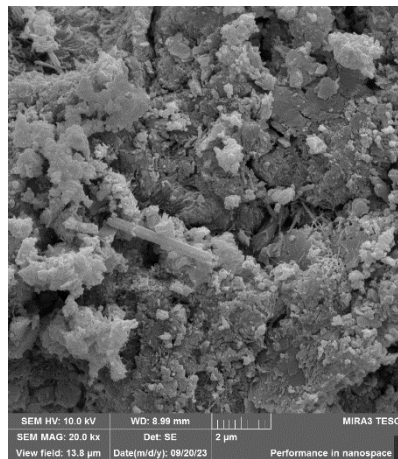
(c) 0,10%

Fonte: O autor.

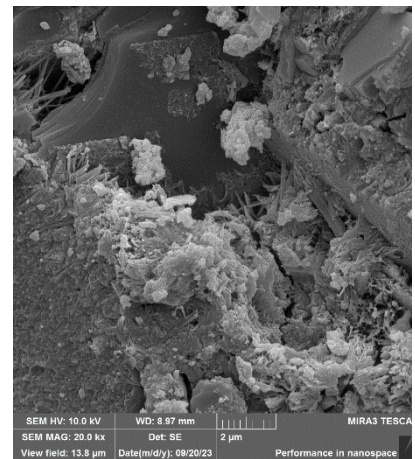
Figura 32 - Imagens de MEV com zoom de 20kx, referente as amostras de nanotubos de carbono com idade de 90 dias



(a) 0,05%



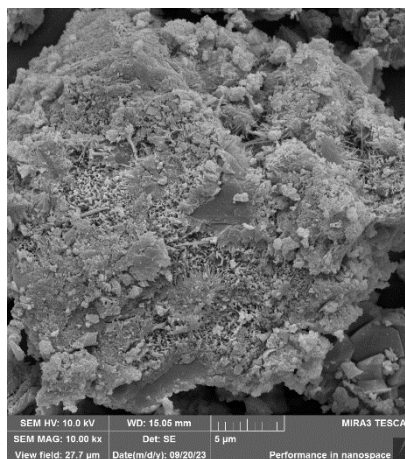
(b) 0,07%



(c) 0,10%

Fonte: O autor.

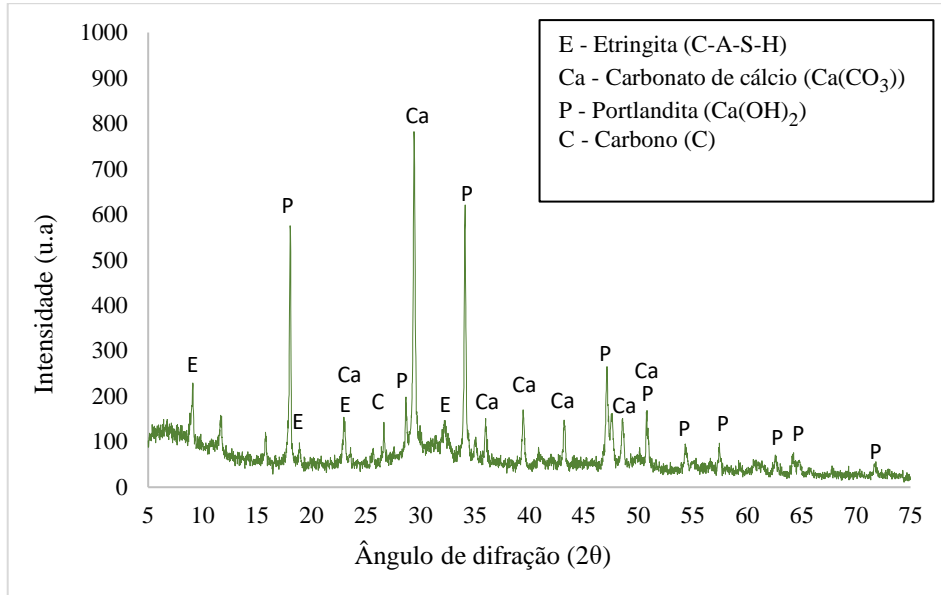
Figura 33 - Imagem de MEV com zoom de 10kx, referente as amostras de referência, com idade de 90 dias



Fonte: O autor.

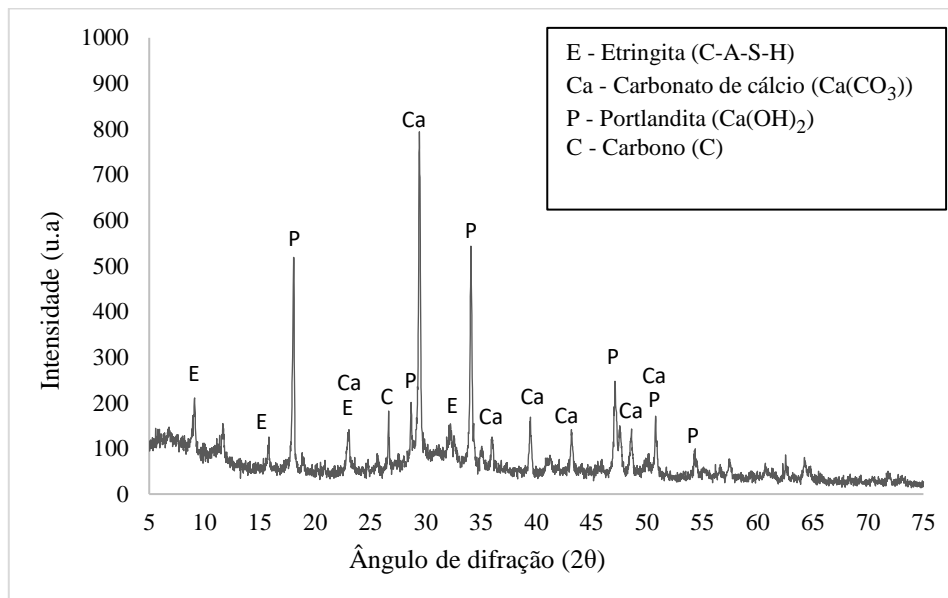
As caracterizações de DRX são apresentadas no Gráfico 4 ao Gráfico 24.

Gráfico 4 - Caracterização de DRX para traço de referência aos 90 dias de cura.



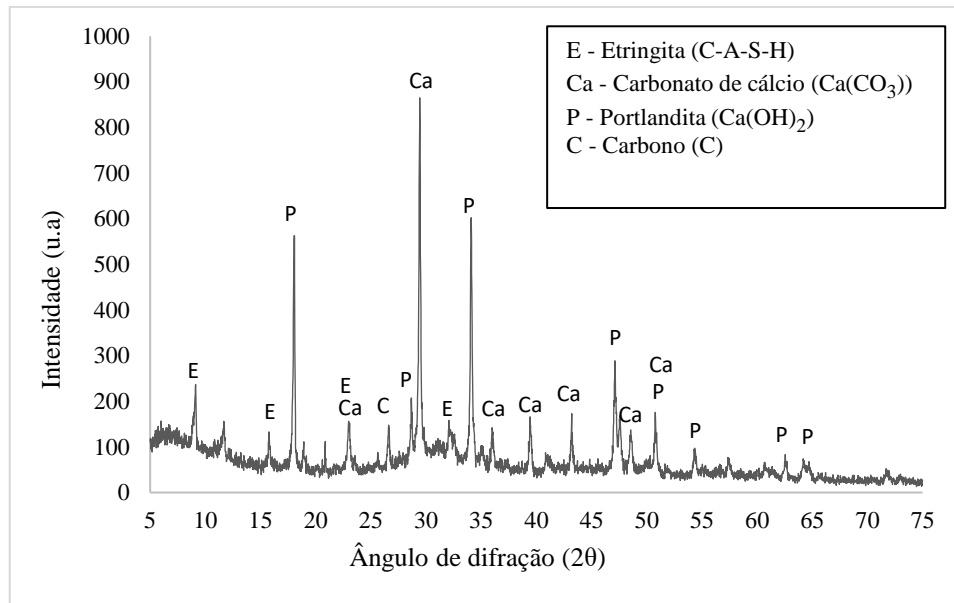
Fonte: o autor.

Gráfico 5 - Caracterização de DRX para teor de 0,05% de OG aos 90 dias de cura.



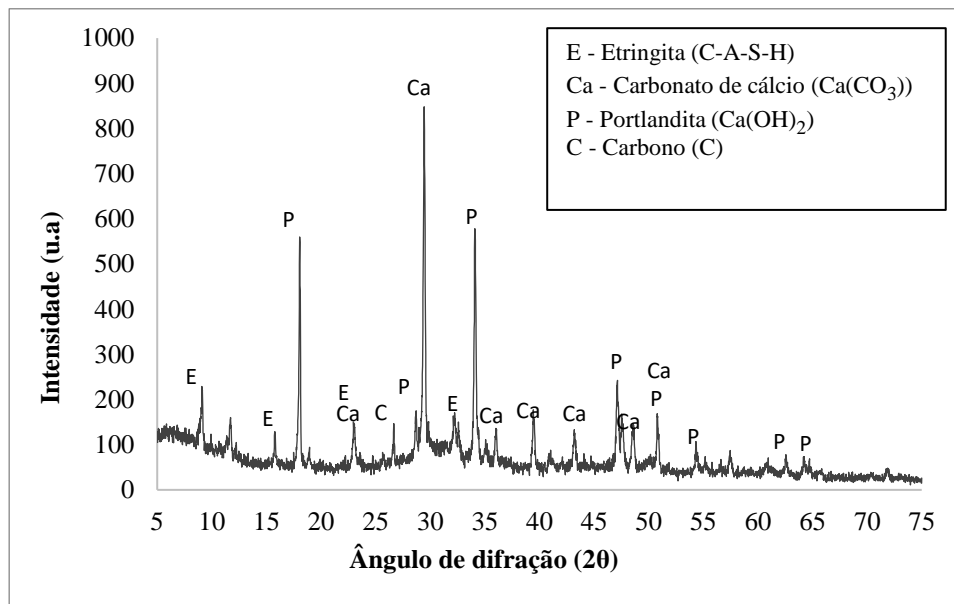
Fonte: o autor.

Gráfico 6 - Caracterização de DRX para teor de 0,07% de OG aos 90 dias de cura.



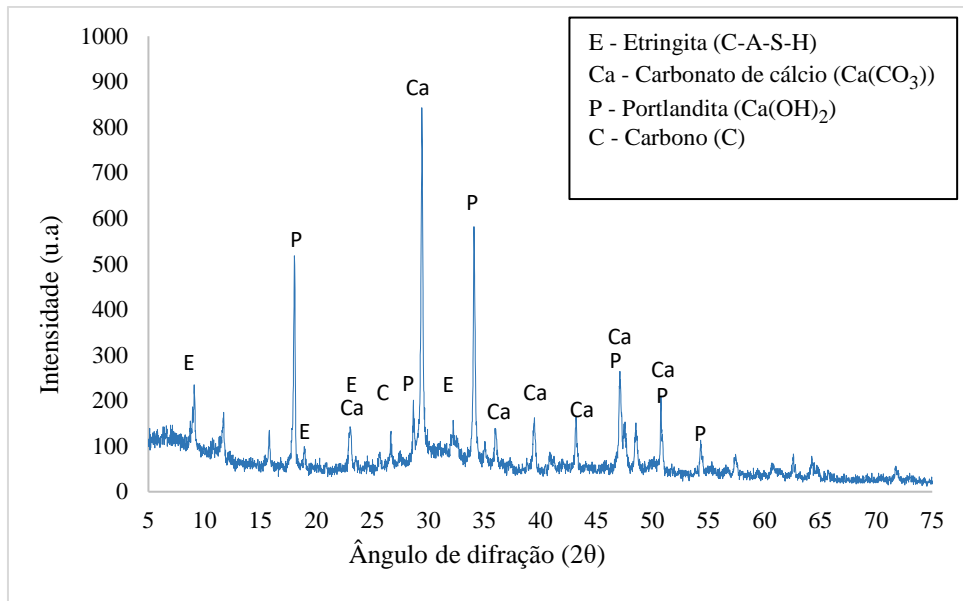
Fonte: o autor.

Gráfico 7 - Caracterização de DRX para teor de 0,10% de OG aos 90 dias de cura.



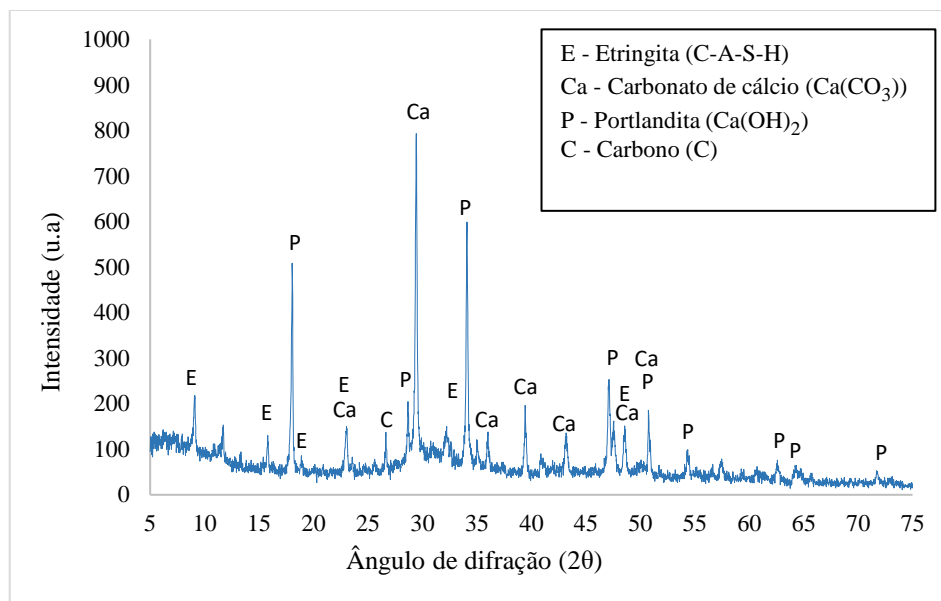
Fonte: o autor.

Gráfico 8 - Caracterização de DRX para teor de 0,05% de NTC aos 90 dias de cura.



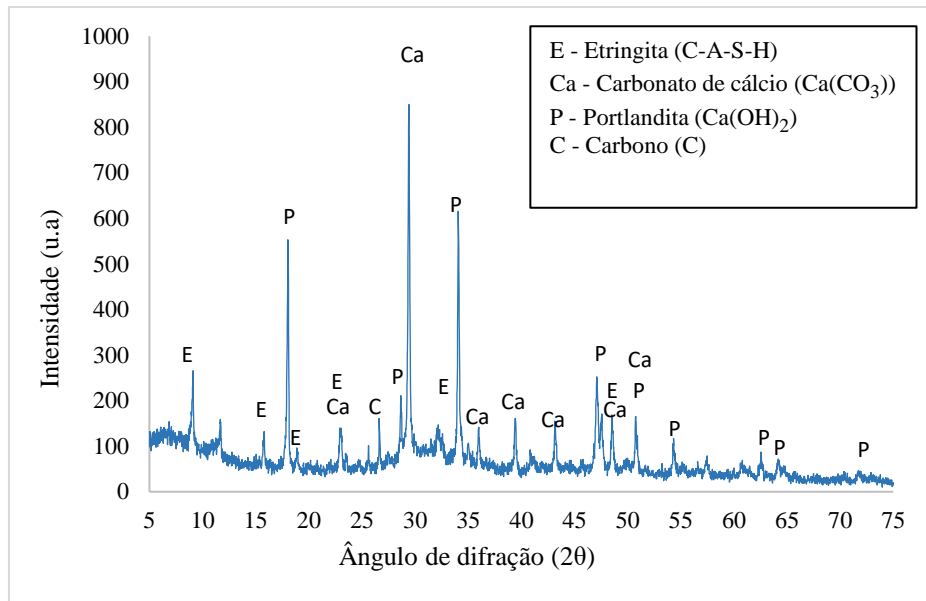
Fonte: o autor.

Gráfico 9 - Caracterização de DRX para teor de 0,07% de NTC aos 90 dias de cura.



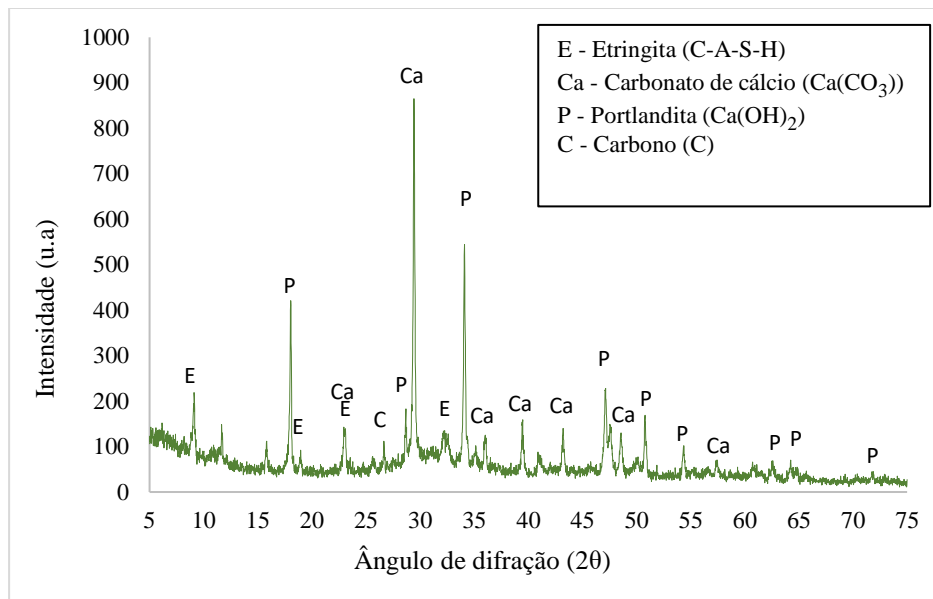
Fonte: o autor.

Gráfico 10 - Caracterização de DRX para teor de 0,10% de NTC aos 90 dias de cura.



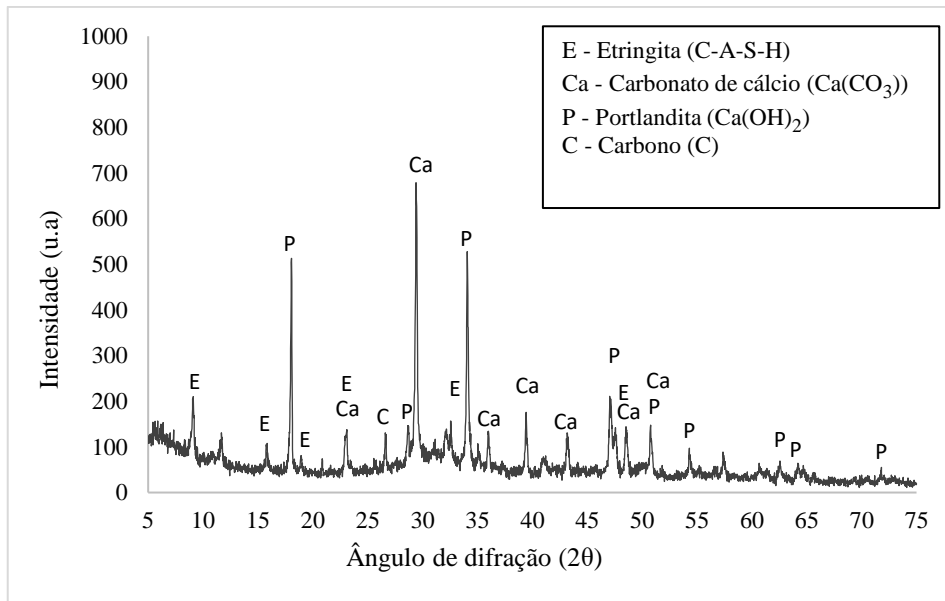
Fonte: o autor.

Gráfico 11 - Caracterização de DRX para traço de referência aos 28 dias de cura.



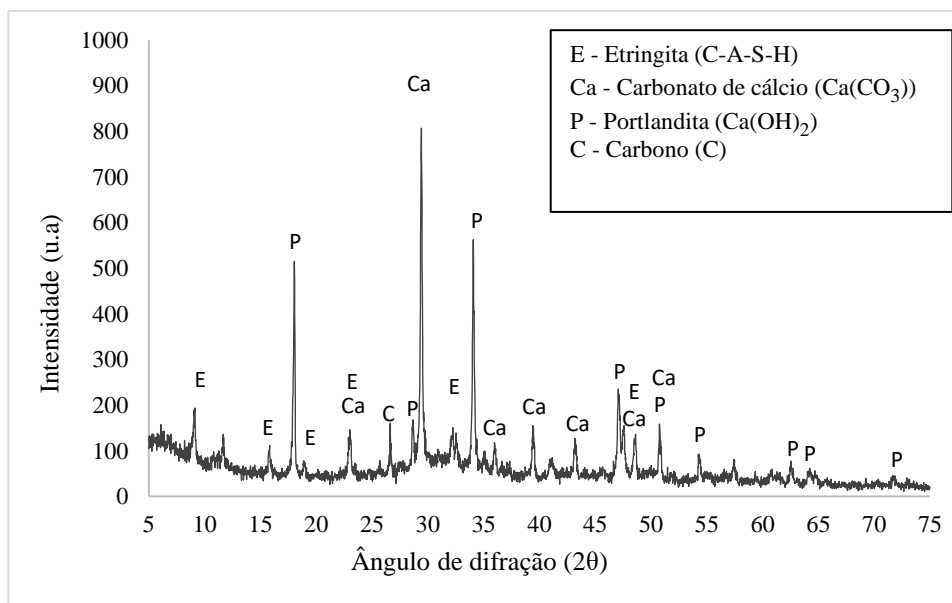
Fonte: o autor.

Gráfico 12 - Caracterização de DRX para teor de 0,05% de OG aos 28 dias de cura.



Fonte: o autor.

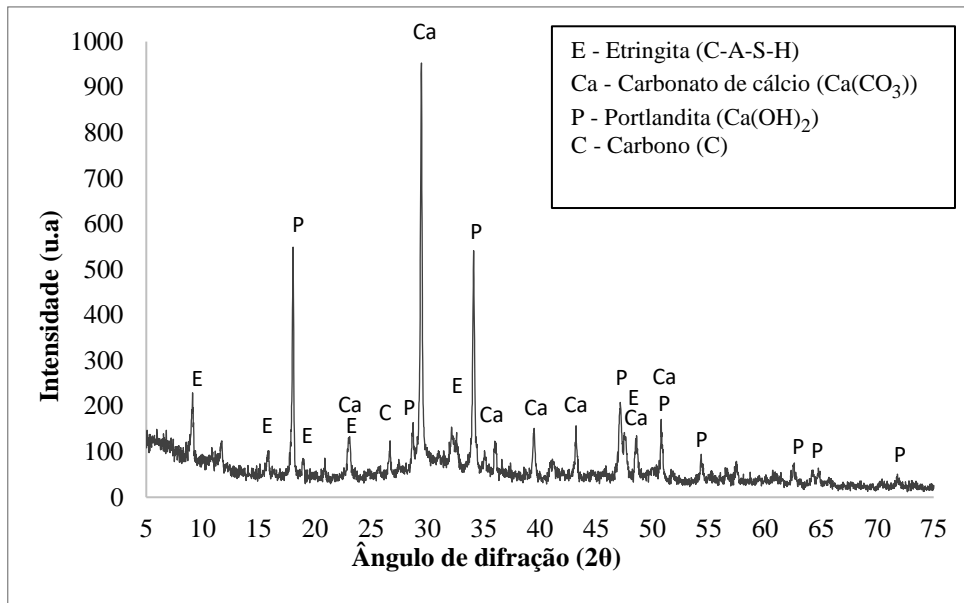
Gráfico 13 - Caracterização de DRX para teor de 0,07% de OG aos 28 dias de cura.



Fonte: o autor.

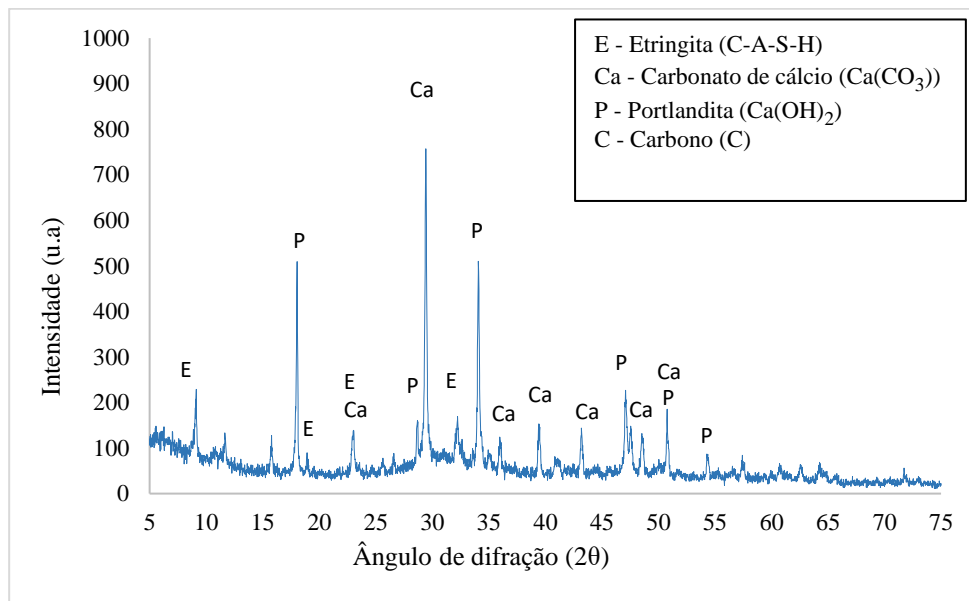


Gráfico 14 - Caracterização de DRX para teor de 0,10% de OG aos 28 dias de cura.



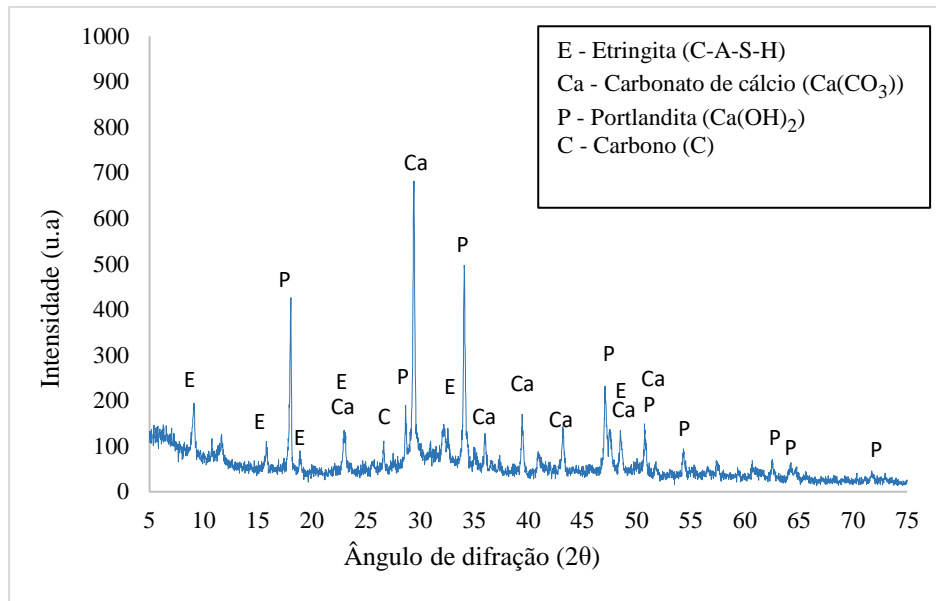
Fonte: o autor.

Gráfico 15 - Caracterização de DRX para teor de 0,05% de NTC aos 28 dias de cura.



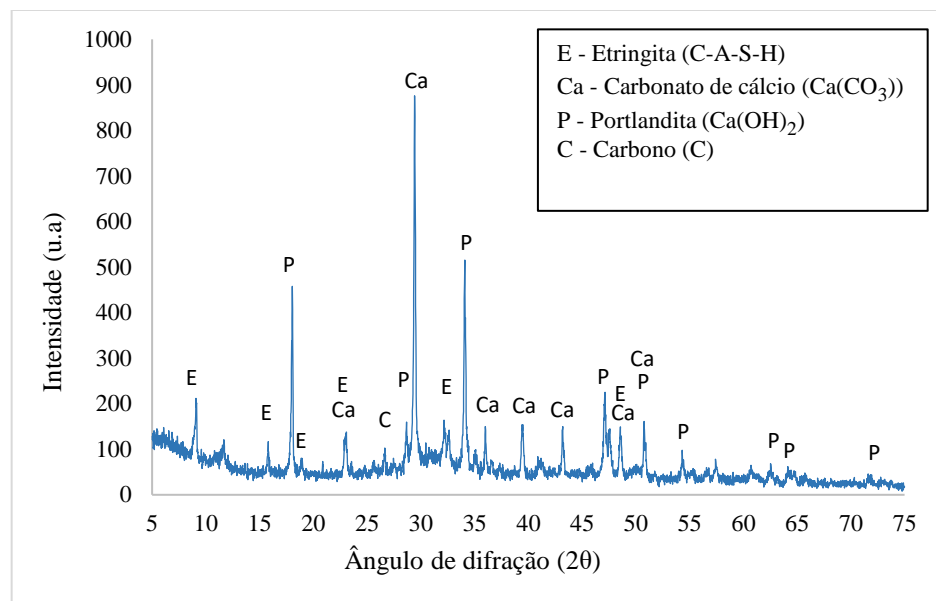
Fonte: o autor.

Gráfico 16 - Caracterização de DRX para teor de 0,07% de NTC aos 28 dias de cura.



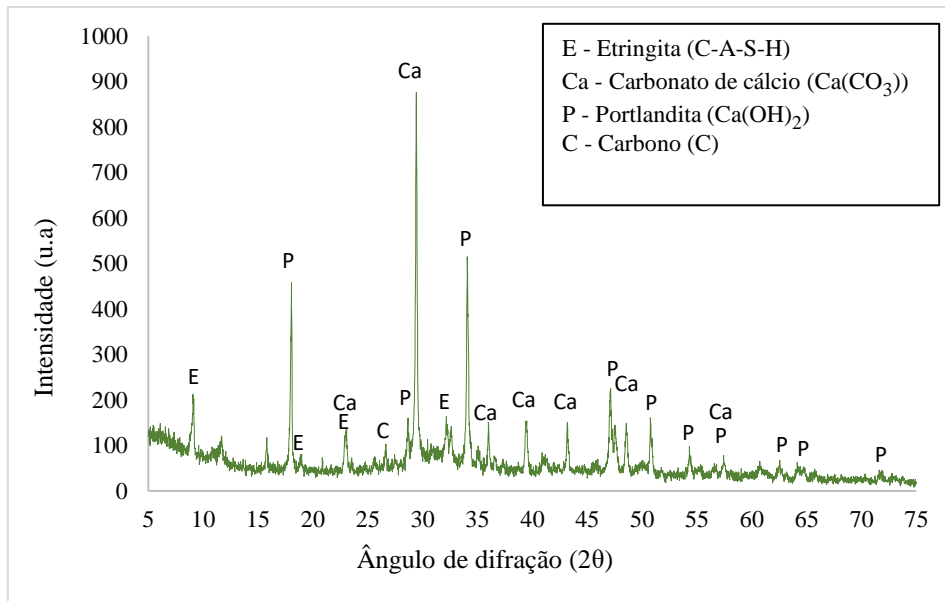
Fonte: o autor.

Gráfico 17 - Caracterização de DRX para teor de 0,10% de NTC aos 28 dias de cura.



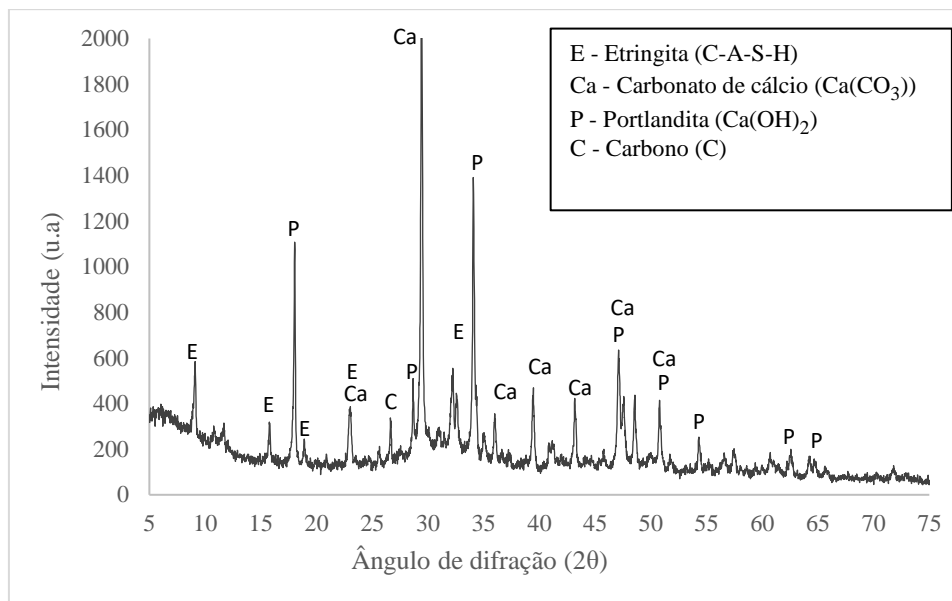
Fonte: o autor.

Gráfico 18 - Caracterização de DRX para traço de referência aos 7 dias de cura.



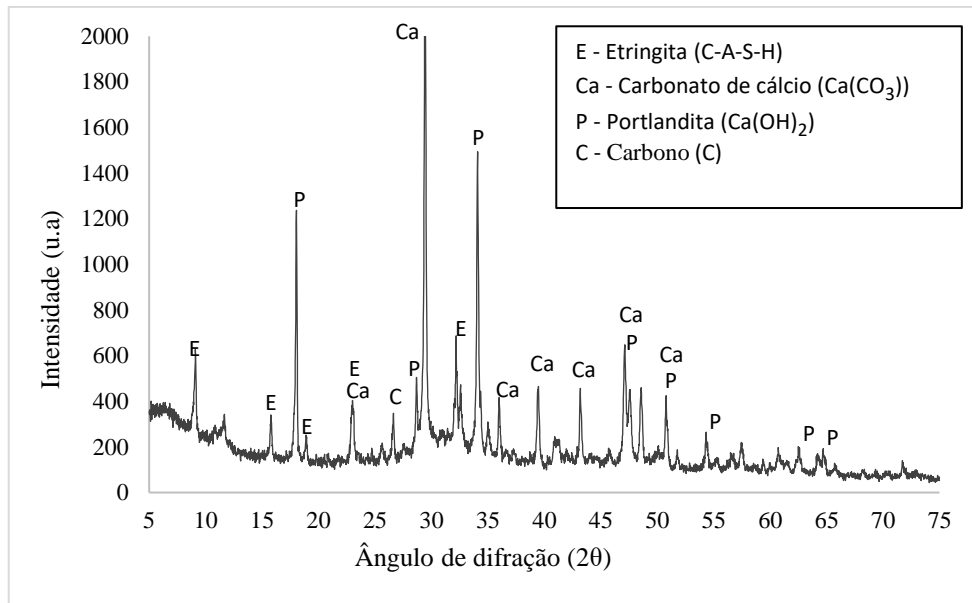
Fonte: o autor.

Gráfico 19 - Caracterização de DRX para teor de 0,05% de OG aos 7 dias de cura.



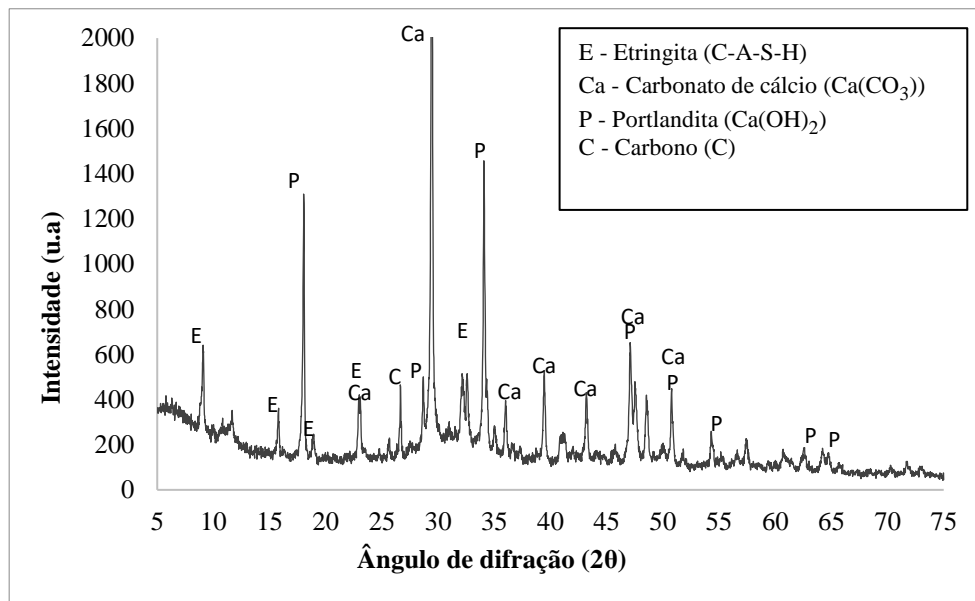
Fonte: o autor.

Gráfico 20 - Caracterização de DRX para teor de 0,07% de OG aos 7 dias de cura.



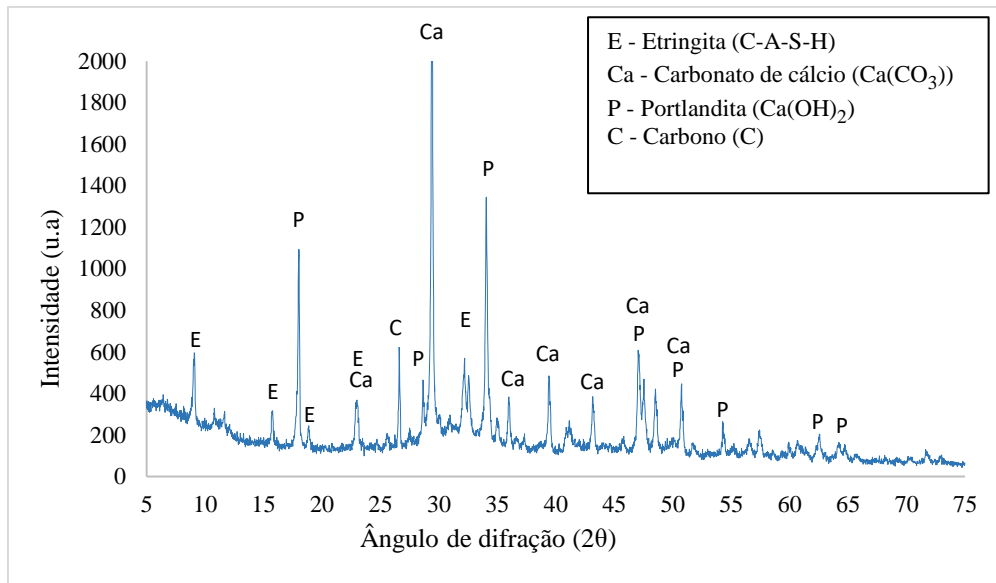
Fonte: o autor.

Gráfico 21 - Caracterização de DRX para teor de 0,10% de OG aos 7 dias de cura.



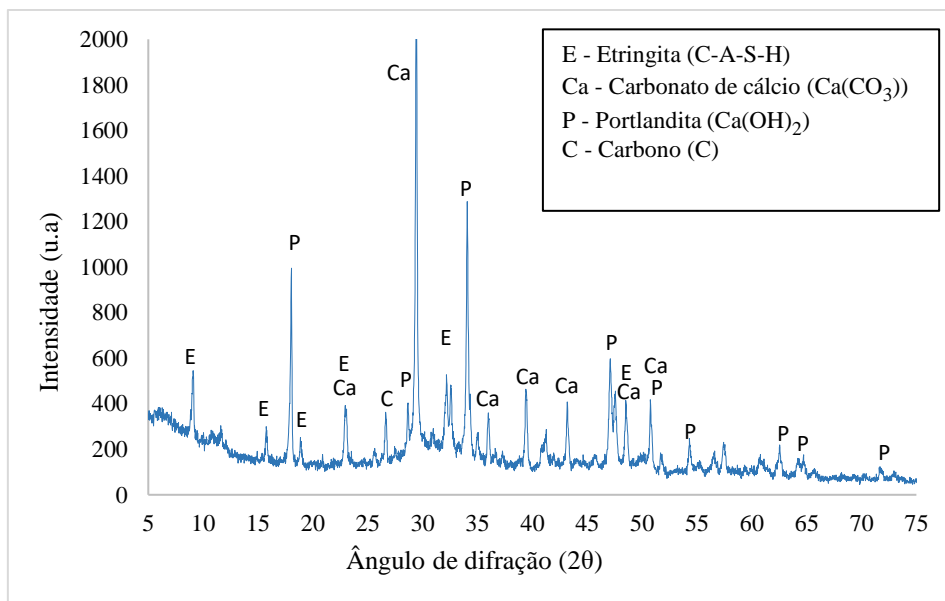
Fonte: o autor.

Gráfico 22 - Caracterização de DRX para teor de 0,05% de NTC aos 7 dias de cura.



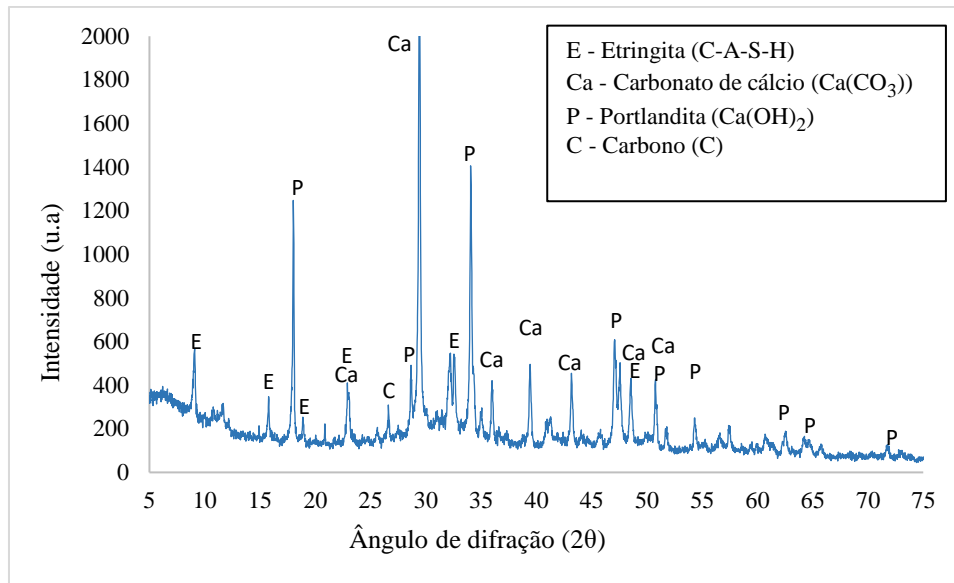
Fonte: o autor.

Gráfico 23 - Caracterização de DRX para teor de 0,07% de NTC aos 7 dias de cura.



Fonte: o autor.

Gráfico 24 - Caracterização de DRX para teor de 0,10% de NTC aos 7 dias de cura.

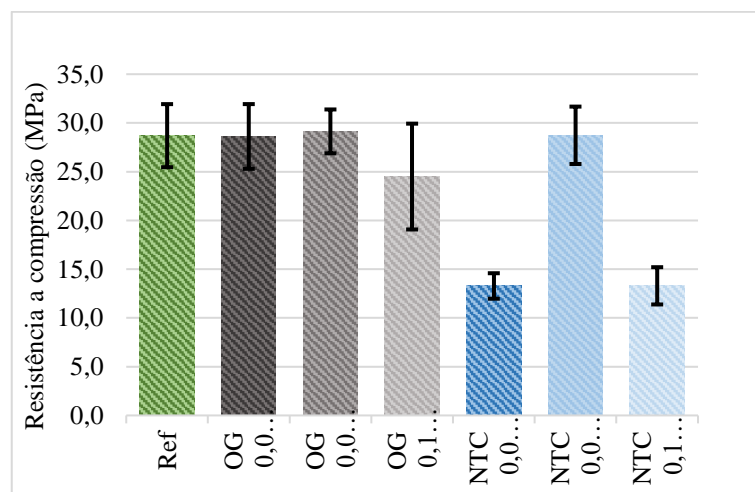


Fonte: o autor.

Através dos ensaios de compressão, obteve-se os valores das tensões dos corpos de prova de pasta. Para o tratamento de dados foi utilizado o critério de eliminação de espúrios considerando uma vez o desvio padrão. A partir dos valores, foi possível elaborar o Gráfico 25, Gráfico 26 e Gráfico 27 de resistência à compressão para cada idade analisada.

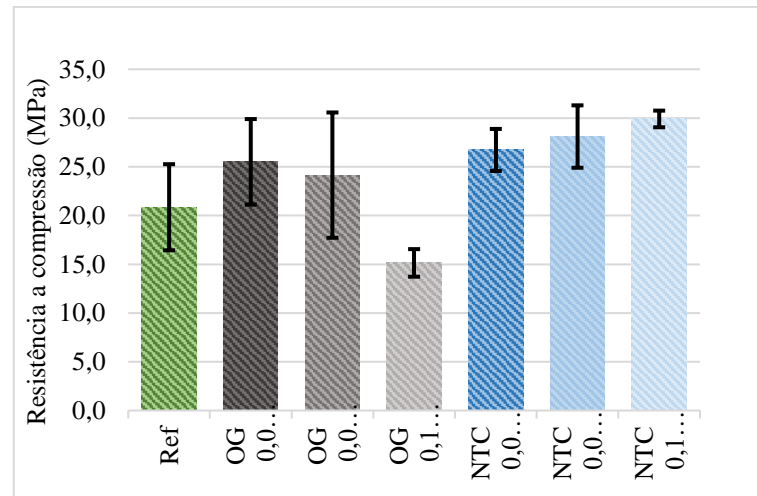
A análise de 90 dias apresentou uma significativa diminuição na resistência à compressão com as adições de nanotubos de carbono. Na idade de 28 dias, os valores não apresentaram variação significativa. Conforme o Gráfico 27, os valores de 7 dias também não apresentaram variação significativa das amostras, em relação a referência e, em alguns casos, havendo uma piora.

Gráfico 25 - Resistência a compressão média para amostras de 7 dias de cura.



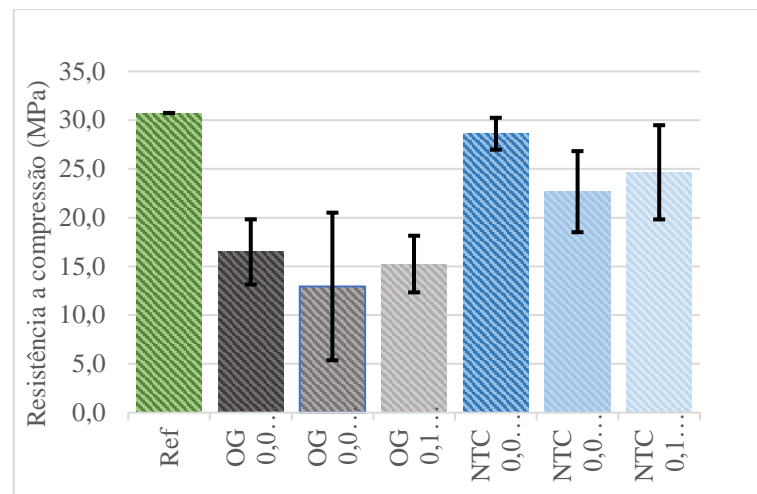
Fonte: O autor.

Gráfico 26 - Resistência a compressão média para amostras de 28 dias de cura.



Fonte: O autor.

Gráfico 27 - Resistência a compressão média para amostras de 90 dias de cura.

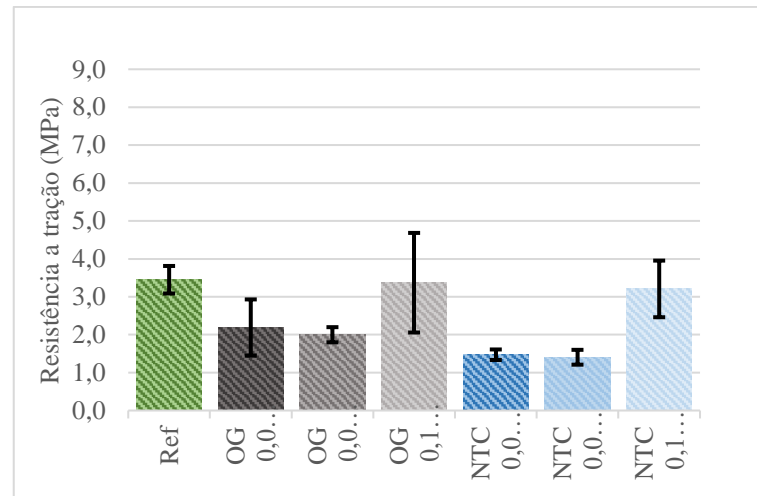


Fonte: O autor.

No geral, as adições não proporcionaram aumento de resistência a compressão. Isso é relacionado aos pontos de fragilidade que podem ocorrer devido aos aglomerados das adições (BATISTON, 2012). O trabalho de Batiston (2012) mostrou valores que ficaram muito próximos da referência e atribui isso à falta de interação entre a matriz de cimento Portland e os nanotubos.

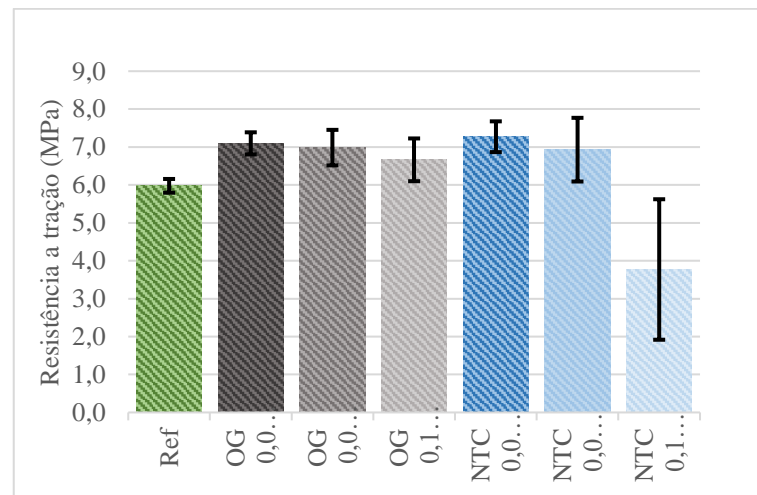
Através do ensaio de compressão diametral, foi determinado os valores de resistência à tração, seguindo a NBR 7222 (2011). A partir dos valores obtidos, foi feito o mesmo tratamento de dados, baseado nos desvios padrões do conjunto de amostras. Logo, foi possível elaborar o Gráfico 28, Gráfico 29 e Gráfico 30 de resistência a tração para cada idade analisada.

Gráfico 28 - Resistência a tração média para amostras de 7 dias de cura.



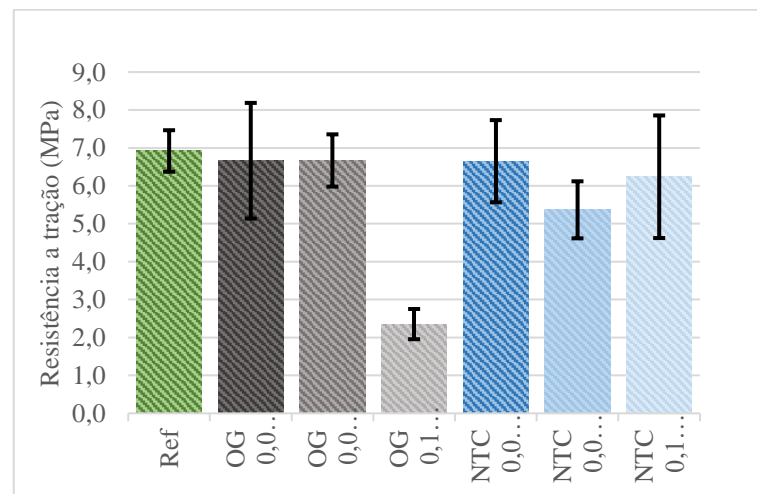
Fonte: O autor.

Gráfico 29 - Resistência a tração média para amostras de 28 dias de cura.



Fonte: O autor.

Gráfico 30 - Resistência a tração média para amostras de 90 dias de cura.



Fonte: O autor.



Como esperado, a resistência a tração aumentou com as maiores idades de cura e se manteve com certa constância a partir dos 28 dias. Entretanto, não houve ganhos significativos de resistência a tração. Portanto, não foi possível relacionar uma maior resistência a tração com a presença das adições, em relação à referência. Isso pode ter ocorrido da mesma forma que a resistência a compressão, onde a dificuldade da dispersão das partículas causou pontos de fragilidade e falta de interação entre a adição e a matriz cimentícia.

#### 4.3 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA E TÉRMICA

Através dos ensaios de condutividade elétrica, foi obtido a corrente passante em relação à tensão aplicada aos corpos de prova, com uma variação de 0 a 50V, determinados em 300 pontos de medição. Com isso, obteve-se o Gráfico 31, Gráfico 32 e Gráfico 33 com as médias de cada teor e idade analisados.

As análises mostraram que houve um aumento da condutividade elétrica, principalmente nas primeiras idades, devido à presença das adições. Isso mostra que as adições foram capazes de criar um caminho de percolação na matriz cimentícia.

Entretanto, a variação foi muito pequena na idade de 90 dias, houve uma variação muito menor, em relação ao traço de referência. No geral, houve uma queda de condutividade das amostras, conforme a idade, como mostra o Gráfico 34, onde apresenta o valor da corrente máxima obtida nos ensaios.

Gráfico 31 - Tensão x Corrente aos 7 dias de cura

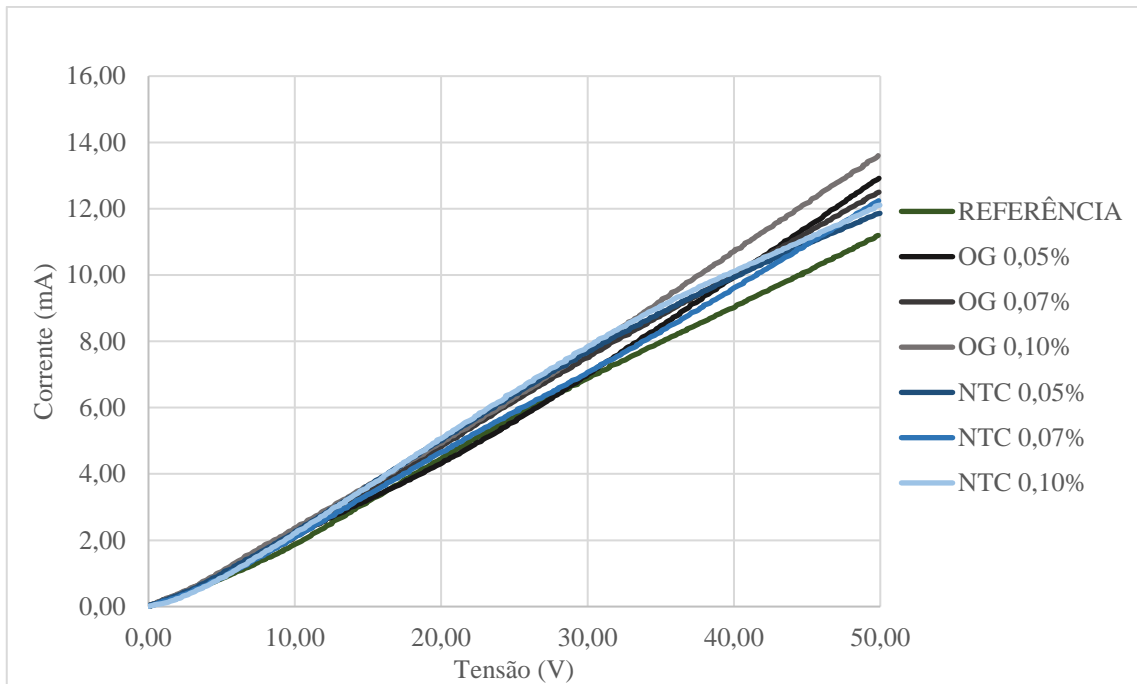


Gráfico 32 - Tensão x Corrente aos 28 dias de cura

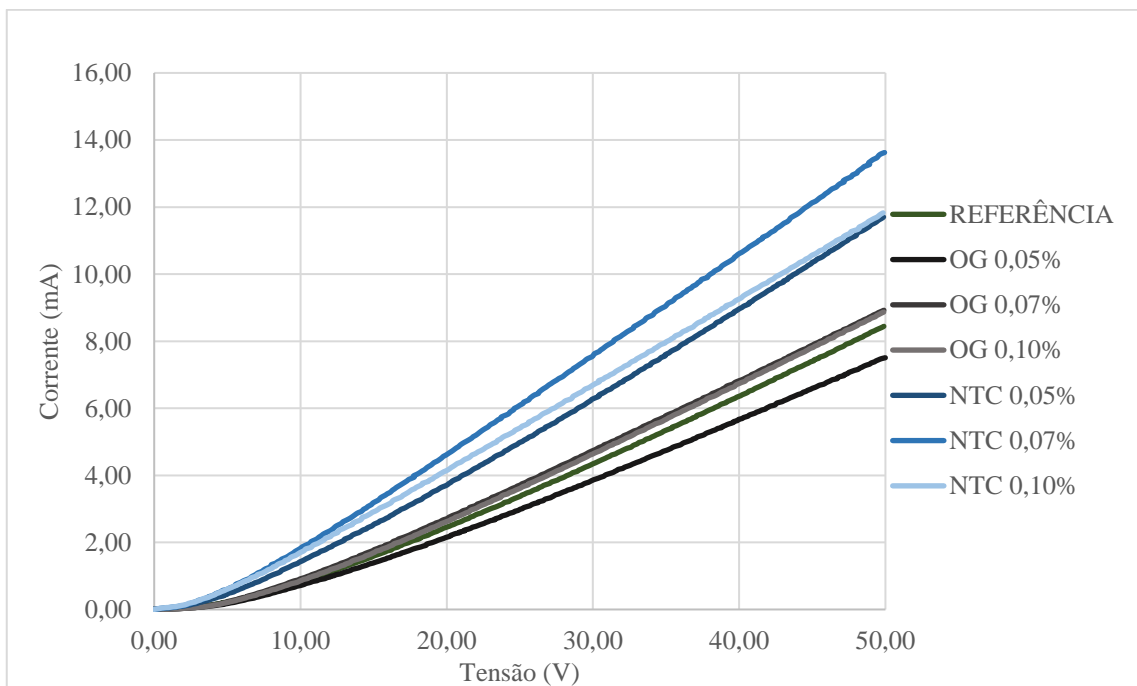
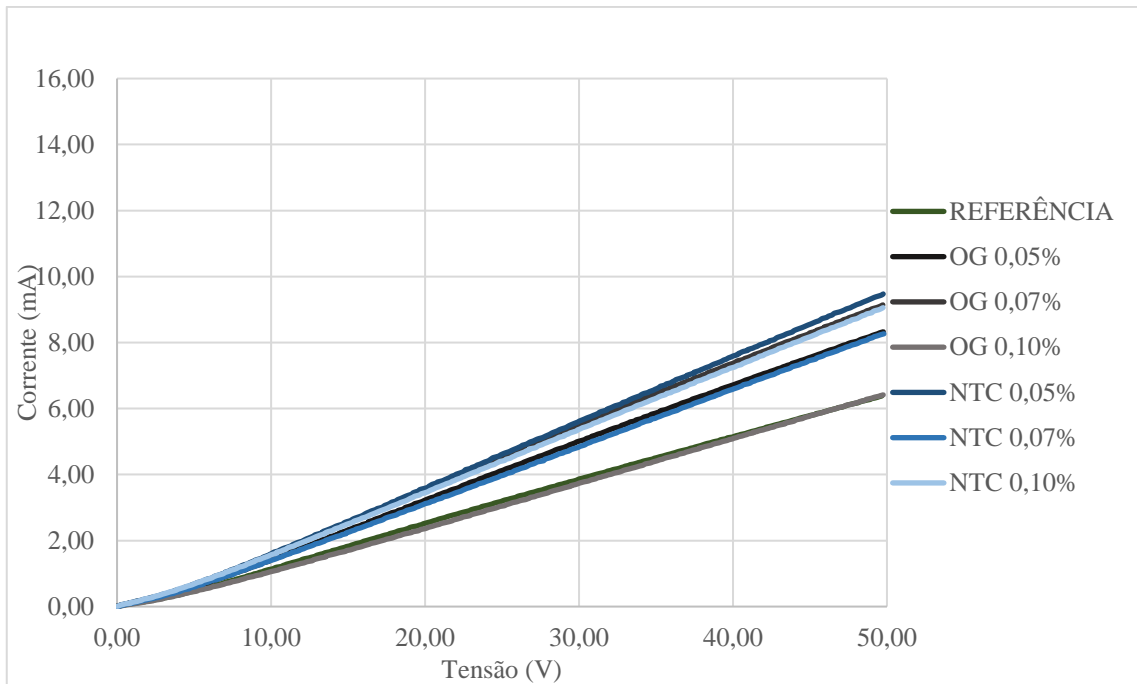
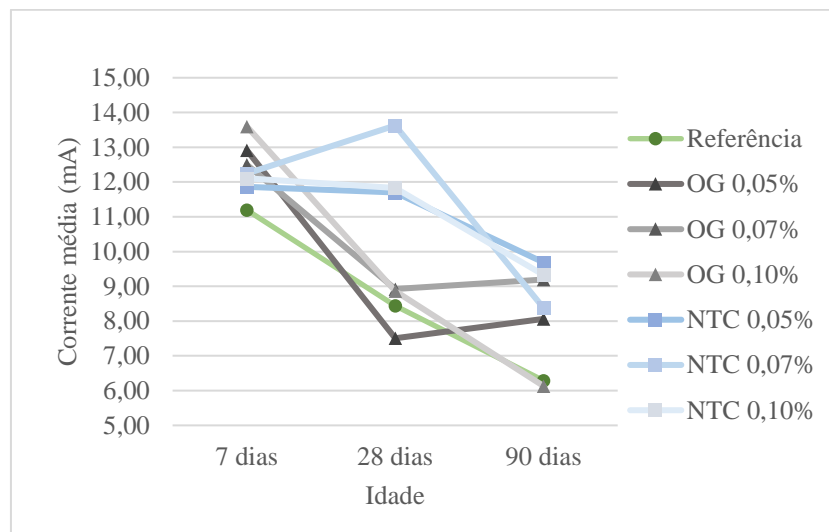


Gráfico 33 - Tensão x Corrente aos 90 dias de cura



Fonte: O autor.

Gráfico 34 - Corrente máxima passante com tensão de 50V



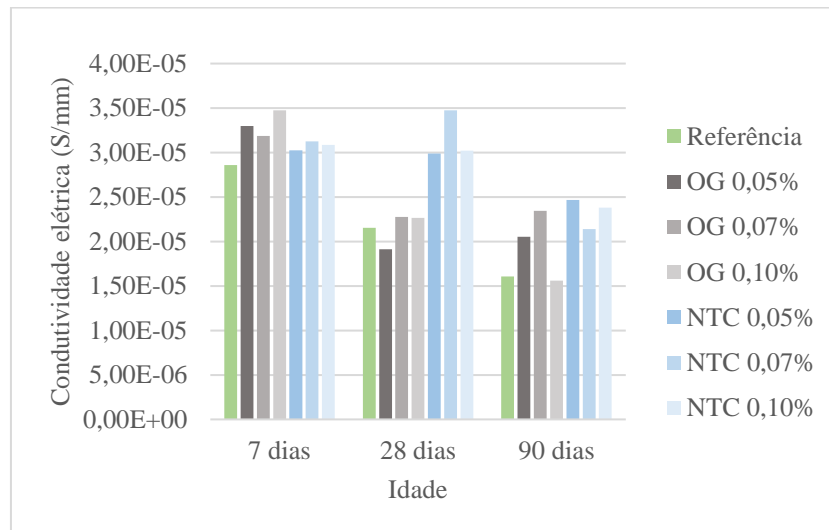
Fonte: O autor.

Com os valores obtidos, foi possível obter a condutividade elétrica das amostras, conforme apresentado no Gráfico 35.

Observou-se, através dos resultados, que houve um aumento de condutividade elétrica, principalmente com as adições de nanotubos de carbono, nas últimas idades. A presença do óxido de grafeno, entretanto, não alterou significativamente a condutividade, em

relação à referência, na idade de 28 dias. Outro fator que podem ter influenciado nos resultados é a pureza das adições de óxido de grafeno.

Gráfico 35 - Condutividade elétrica máxima por idade analisada



Fonte: O autor.

Na pasta de cimento existe tanto a condutividade elétrica iônica e eletrônica. Portanto, a diminuição da condutividade elétrica nas últimas idades pode ser relacionada à diminuição de íons livres nas amostras, devido à hidratação dos compostos na matriz e a densificação da matriz. A diferença restante pode ser atribuída, então, pelo transporte de elétrons livres devido a presença das adições.

Para a obtenção dos resultados do ensaio de condutividade térmica, foi necessário a calibração dos termopares utilizados durante o ensaio. Para isso, mergulhou-se a ponta quente dos termopares em água quente, fria e em temperatura ambiente, com temperaturas conhecidas e relacionar com a tensão gerada pelos termopares no multímetro. Logo, obteve-se os dados, conforme a Tabela 9:

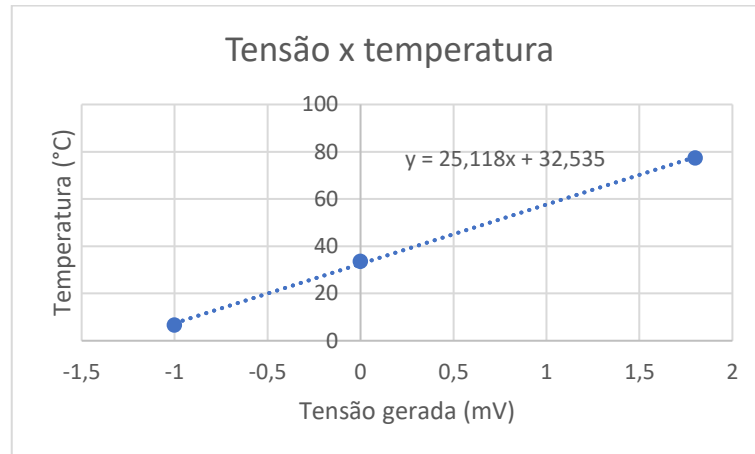
Tabela 9 - Calibração de termopares para medição de temperatura

Termopar	Quente	Ambiente	Fria
<b>S1 (mV)</b>	1,8	0	-1
<b>S2 (mV)</b>	1,8	0	-1
<b>I1 (mV)</b>	1,8	0	-1
<b>I2 (mV)</b>	1,8	0	-1
<b>Temperatura (°C)</b>	77,35	33,65	6,7

Fonte: O autor.

Assim, foi possível determinar uma relação entre a temperatura e a tensão dos termopares, através da equação de linha de tendência, apresentado no Gráfico 36.

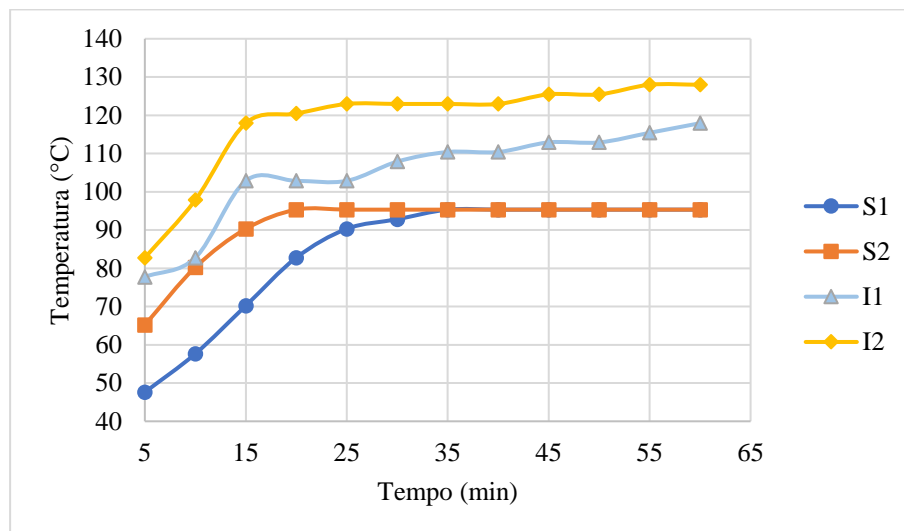
Gráfico 36 - Relação entre tensão e temperatura dos termopares



Fonte: O autor.

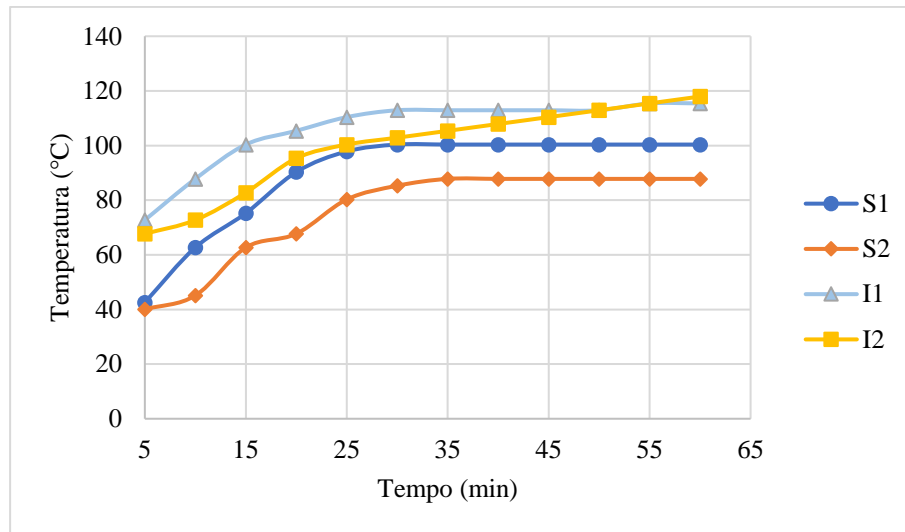
Foi executado, então, as medições de tensões para os teores analisados, somente com idade de 7 dias de cura, devido ao tempo necessário para cada ensaio. Logo, foi possível elaborar o Gráfico 37 ao Gráfico 43 com a variação de temperatura de cada ponto de medição.

Gráfico 37 - Variação de temperatura para traço de referência para 7 dias de cura



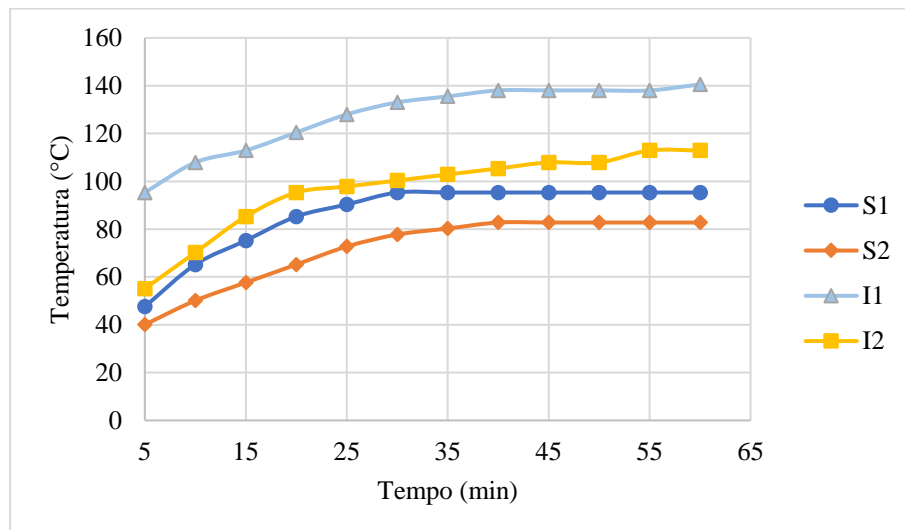
Fonte: O autor.

Gráfico 38 - Variação de temperatura para teor de 0,05% de OG para 7 dias de cura



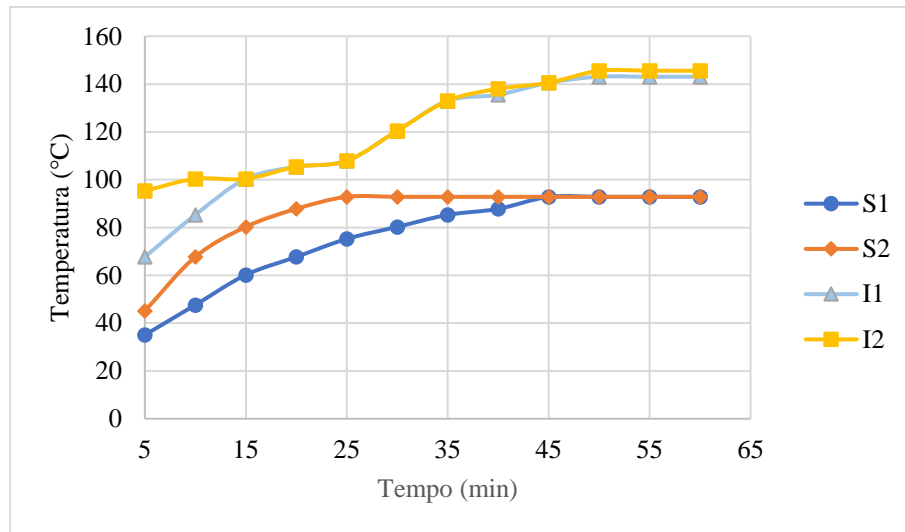
Fonte: O autor.

Gráfico 39 - Variação de temperatura para teor de 0,07% de OG para 7 dias de cura



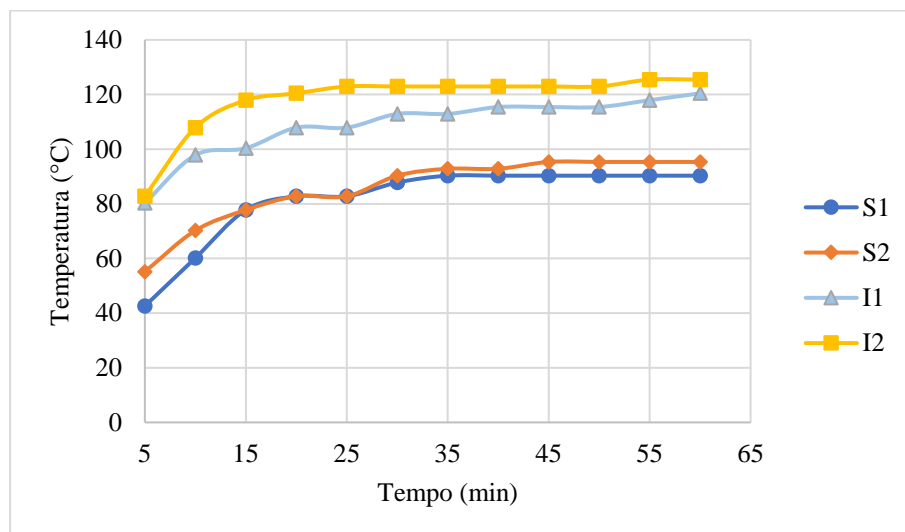
Fonte: O autor.

Gráfico 40 - Variação de temperatura para teor de 0,10% de OG para 7 dias de cura



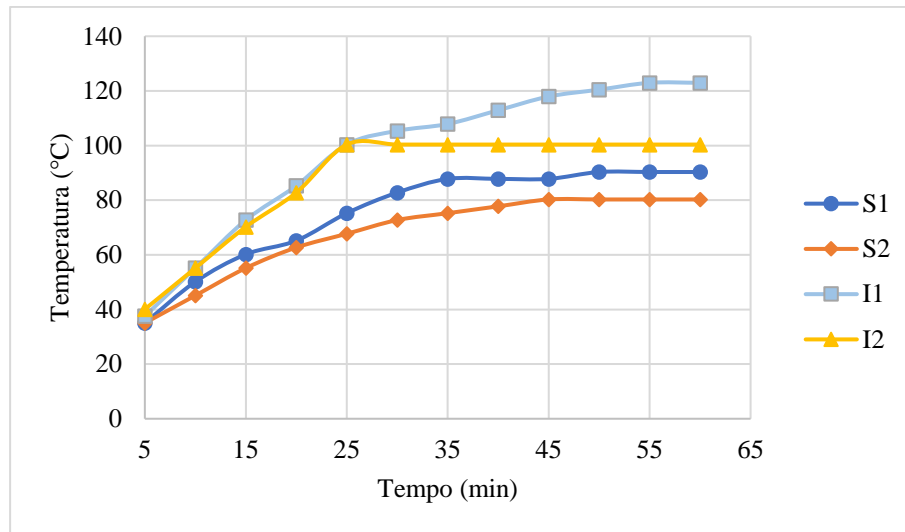
Fonte: O autor.

Gráfico 41 - Variação de temperatura para teor de 0,05% de NTC para 7 dias de cura



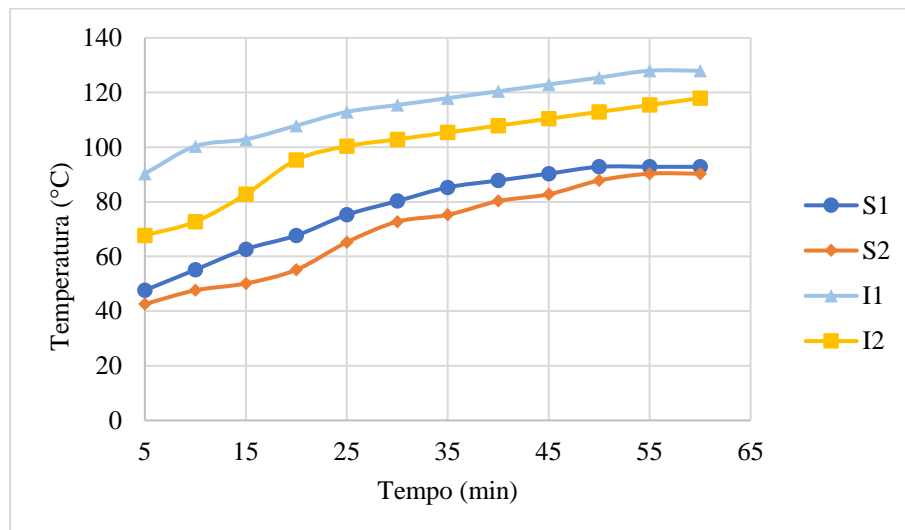
Fonte: O autor.

Gráfico 42 - Variação de temperatura para teor de 0,07% de NTC para 7 dias de cura



Fonte: O autor.

Gráfico 43 - Variação de temperatura para teor de 0,10% de NTC para 7 dias de cura



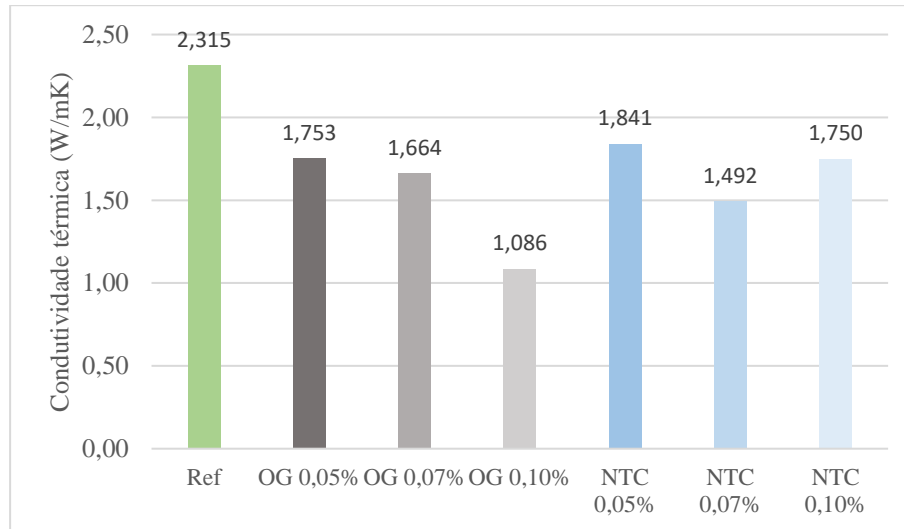
Fonte: O autor.

Observou-se que o calor gerado nos corpos de prova gerou, durante o ensaio, fissuras. Isso ocorreu, provavelmente, pela evaporação da água que ainda havia dentro do corpo de concreto, gerando tensões internas. Observou-se, também que a diferença de temperatura foi aumentando conforme o andamento do ensaio. Isso confirma as hipóteses de Asadi *et al.* (2018), que afirma que quanto maior a temperatura, menor é a condutividade térmica. O mesmo autor também afirma que a presença de umidade favorece a condutividade. Isso foi observado durante o ensaio, já que o início do ensaio, as amostras com maior umidade obtiveram mais trincas e um gradiente de calor mais rápido.



Observou-se, também, que as amostras apresentaram um limite de temperatura na superfície, com cerca de 90 a 100°C. A partir desse ponto, a temperatura do resistor continuou aumentando, mas sem a alteração da temperatura na superfície. A partir desse ponto de temperatura, calculou-se a média entre os gradientes da periferia do corpo de prova e determinado a condutividade térmica das amostras, conforme o Gráfico 44.

Gráfico 44 - Condutividade térmica de amostras com 7 dias de cura.



Fonte: O autor.

Os valores indicaram que a presença da adição não promoveu o aumento da condutividade. Neste caso, a condutividade pode ser relacionada à transmissão de calor pelo sólido. As adições não foram capazes de criar um caminho de percolação de calor no material. Pode-se relacionar os vazios formados na pasta com a propriedade, onde a variação do índice de vazios promoveu pontos de resistividade térmica.

## 5 CONCLUSÃO

Através dos resultados obtidos, observou-se, no geral, perda de propriedades mecânicas e físicas das pastas produzidas com a presença das adições de carbono. A dificuldade da dispersão do material foi o principal fator para as perdas mecânicas obtidas, já que criou pontos de fragilidade e gerou dificuldade de adensamento promovendo vazios nas amostras. Devido à natureza inerte das adições, a microestrutura não sofreu alterações aparentes. Os ensaios de MEV não foram suficientemente precisos para verificar a estrutura da adição na pasta.

A condutividade térmica da matriz foi afetada negativamente pela presença das adições, mas com pequenas variações. Contudo, ainda houve um aumento de condutividade eletrônica, promovido pela percolação de elétrons livres no meio.

Conclui-se, portanto, que as adições foram capazes de promover pastas cimentícias com maior condutividade elétrica, mostrando o potencial das adições de carbono. Por outro lado, deve-se desenvolver um método mais adequado de dispersão, para evitar a aglomeração do material que gerou as perdas mecânicas. Ainda deve-se avaliar a condutividade térmica em idades mais avançadas e a influência da dispersão nesta propriedade.

## REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR 9778 - Argamassa e concreto - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005.
- ABNT. **NBR 7222 - Concreto e argamassa - Determinação de resistência a tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2011.
- ABNT. **NBR 9779 - Cimento Portland - Determinação da absorção de água por capilaridade**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2012.
- ABNT. **NBR 5752 - Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014.
- ABNT. **NBR 16697 Cimento Portland - Requisitos**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2018.
- ABNT. **NBR 7215 - Cimento Portland - Determinação de resistência a compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019.
- ALMEIDA, J. M. D. **Caracterizações de pastas de cimento Portland com adições de grafite, óxido de grafeno e nanotubos de carbono**. 2021. Qualificação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2021.
- ASADI, I. *et al.* Thermal conductivity of concrete – A review. **Journal of Building Engineering**, v. 20, p. 81–93, nov. 2018.
- BABAK, F. *et al.* Preparation and Mechanical Properties of Graphene Oxide: Cement Nanocomposites. **The Scientific World Journal**, v. 2014, p. 1–10, 2014.
- BARCELOS, I. D. Crescimento de Grafeno por CVD em folhas de Cobre. 2011.
- BATISTON, E. *et al.* Effect of Carbon Nanotubes (CNTs) aspect ratio on the rheology, thermal conductivity and mechanical performance of Portland cement paste. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 14, n. 5, p. e14510, 2021.
- BATISTON, E. R. **Incorporação de nanotubos de carbono em matriz de cimento Portland**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials science and engineering: an introduction**. 9th edition ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2014.
- GOBBI, A. **Atividade pozolânica de adições minerais pelas NBR 5751/2012 e NBR 5752/2012: uma análise crítica a partir de métodos complementares**. 2014. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

GOMES, H. *et al.* Nanotubos e Grafeno: Os primos mais jovens na família do carbono! **Boletim da Sociedade Portuguesa de Química**, p. 21, 1 mar. 2013.

GONÇALVES, G. M. **Condutividade térmica de concretos com nanosílica**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020.

HORTA, R. A. DOS S.; DE PAULA, J. N.; CALIXTO, J. M. F. Avaliação do perfil térmico e calor de hidratação de pastas de cimento com adição de óxido de grafeno. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 27, n. 3, p. e20220151, 2022.

IJIMA, S. Helical microtubules of graphitic carbon. **Nature**, v. 354, n. 6348, p. 56–58, nov. 1991.

ITAMBÉ. **Cimento CP-2-F-32**. Balsa Nova: Itambé, 31 maio 2023. Disponível em: <[https://www.cimentoitambe.com.br/wp-content/themes/blade/\\_assets/pdf/relatorios/2023-4/CP-II-F-32.pdf](https://www.cimentoitambe.com.br/wp-content/themes/blade/_assets/pdf/relatorios/2023-4/CP-II-F-32.pdf)>. Acesso em: 16 jun. 2023.

JANG, S.-H. *et al.* Experiments and micromechanical modeling of electrical conductivity of carbon nanotube/cement composites with moisture. **Cement and Concrete Composites**, v. 77, p. 49–59, mar. 2017.

JOLICOEUR, C.; SIMARD, M.-A. Chemical admixture-cement interactions: Phenomenology and physico-chemical concepts. **Cement and Concrete Composites**, v. 20, n. 2–3, p. 87–101, jan. 1998.

KANG, X. *et al.* Effect of graphene oxide (GO) on hydration of tricalcium silicate (C3S). **Construction and Building Materials**, v. 203, p. 514–524, abr. 2019.

LE, J.-L.; DU, H.; PANG, S. D. Use of 2D Graphene Nanoplatelets (GNP) in cement composites for structural health evaluation. **Composites Part B: Engineering**, v. 67, p. 555–563, dez. 2014.

MA, S.; QIAN, Y.; KAWASHIMA, S. Performance-based study on the rheological and hardened properties of blended cement mortars incorporating palygorskite clays and carbon nanotubes. **Construction and Building Materials**, v. 171, p. 663–671, maio 2018.

MAKAR, J. M.; MARGESON, J. C.; LUH, J. Carbon nanotube/cement composites - early results and potential applications. *In: 3RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONSTRUCTION MATERIALS: PERFORMANCE, INNOVATION AND STRUCTURAL IMPLICATIONS*, 2005, Vancouver, B.C., Canada. Vancouver, B.C., Canada: 2005.

MARCONDES, C. G. N. **Adição de nanotubos de carbono em concretos de cimento Portland - absorção, permeabilidade, penetração de cloretos e propriedades mecânicas**. 2012. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

MEDEIROS, M. H. F. DE *et al.* Compósitos de cimento Portland com adição de nanotubos de carbono (NTC): Propriedades no estado fresco e resistência à compressão. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 20, n. 1, p. 127–144, mar. 2015.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3 ed ed. São Paulo: Ibracon, 2008.

MELO, V. S. **Nanotecnologia Aplicada ao Concreto: Efeito da mistura física de nanotubos de carbono em matrizes de cimento Portland**. 2009. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

MOHAMADIAN, N. *et al.* Reinforcement of oil and gas wellbore cements with a methyl methacrylate/carbon-nanotube polymer nanocomposite additive. **Cement and Concrete Composites**, v. 114, p. 103763, nov. 2020.

MOHAMMED, A. *et al.* Incorporating graphene oxide in cement composites: A study of transport properties. **Construction and Building Materials**, v. 84, p. 341–347, jun. 2015.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Concrete technology**. 2. ed ed. Harlow: Prentice Hall, 2010.

PAN, Z. *et al.* Mechanical properties and microstructure of a graphene oxide–cement composite. **Cement and Concrete Composites**, v. 58, p. 140–147, abr. 2015.

QUINTANA, M.; TAPIA, J. I.; PRATO, M. Liquid-phase exfoliated graphene: functionalization, characterization, and applications. **Beilstein Journal of Nanotechnology**, v. 5, p. 2328–2338, 4 dez. 2014.

ROCHA, V. V. *et al.* Revisão teórica sobre o potencial da adição do óxido de grafeno em materiais cimentícios. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 26, n. 3, p. e13002, 2021.

SANTOS, A. **Água, Cimento Portland e Concreto: por que não se vive sem eles? | Cimento Itambé**, 25 abr. 2019. Disponível em: <<https://www.cimentoitambe.com.br/massa-cinzenta/agua-cimento-portland-e-concreto-por-que-nao-se-vive-sem-eles/>>. Acesso em: 28 nov. 2022

SANTOS, L. **Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto**. 2006. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

SOLDANO, C.; MAHMOOD, A.; DUJARDIN, E. Production, properties and potential of graphene. **Carbon**, v. 48, n. 8, p. 2127–2150, jul. 2010.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. 2. ed., Repr ed. London: Telford, 2004.

VILELA, K. C. **Desenvolvimento de baixo custo para medição de condutividade térmica em corpos de prova cerâmicos**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia dos Materiais) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

ZARBIN, A. J. G.; OLIVEIRA, M. M. Nanoestruturas de carbono (nanotubos, grafeno): Quo Vadis? **Química Nova**, v. 36, n. 10, p. 1533–1539, 2013.

ZHAO, L. *et al.* Investigation of the effectiveness of PC@GO on the reinforcement for cement composites. **Construction and Building Materials**, v. 113, p. 470–478, jun. 2016.