

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**Edlaine Feital Barbosa Motta**

**Comparação da adição de nanotubos de carbono funcionalizados e não funcionalizados  
nas propriedades de concretos submetidos a temperaturas elevadas**

Juiz de Fora

2023

**Edlaine Feital Barbosa Motta**

**Comparação da adição de nanotubos de carbono funcionalizados e não funcionalizados nas propriedades de concretos submetidos a temperaturas elevadas**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas e Materiais.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Thaís Mayra de Oliveira

Coorientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Júlia Castro Mendes

Juiz de Fora

2023

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo (a) autor (a)

Motta, Edlaine Feital Barbosa.

Comparação da adição de nanotubos de carbono funcionalizados e não funcionalizados nas propriedades de concretos submetidos a temperaturas elevadas /Edlaine Feital Barbosa Motta. -- 2023.  
99p.

Orientador: Thaís Mayra de Oliveira

Coorientador: Júlia Castro Mendes

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2023.

1. Nanotubos de Carbono. 2. Concreto. 3. Temperaturas Elevadas. I. Oliveira, Thaís Mayra de , orient. II. Mendes, Júlia Castro, coorient. III. Título.

**Edlaine Feital Barbosa Motta**

**Comparação da adição de nanotubos de carbono funcionalizados e não funcionalizados nas propriedades de concretos submetidos a temperaturas elevadas**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas e Materiais.

Aprovada em 18 de dezembro de 2023.

**BANCA EXAMINADORA**

**Profa. Dra. Julia Castro Mendes** - Coorientadora e Presidente da Banca  
Universidade Federal de Juiz de Fora

**Profa. Dra. Indhira Oliveira Maciel** -- Membro Titular Interno  
Universidade Federal de Juiz de Fora

**Profa. Dra. Lais Cristina Barbosa Costa** - Membro Titular Externo  
Universidade Federal do Ceará

Juiz de Fora, 30/11/2023.



Documento assinado eletronicamente por **Júlia Castro Mendes, Professor(a)**, em 20/12/2023, às 16:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Indhira Oliveira Maciel, Usuário Externo**, em 20/12/2023, às 23:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **LAÍS CRISTINA BARBOSA COSTA, Usuário Externo**, em 23/12/2023, às 09:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Uff (www2.uff.br/SEI) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **1602329** e o código CRC **DC705488**.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, que me permitiu chegar até aqui, iluminando o meu caminho.

A minha mãe, Edna, e irmãos, Liércio e Bruno, por todo amor, suporte e por sempre acreditarem em meu potencial.

Ao meu namorado, Vinicius, pelo amor, carinho e companheirismo durante essa caminhada.

À professora Thaís por me orientar e ajudar nos ensaios de laboratório desta pesquisa.

À professora Júlia por me coorientar e contribuir para o refinamento deste trabalho.

À professora Indhira pelo empenho em me ajudar com o processo de dispersão dos nanotubos de carbono e por aceitar o convite para participar da banca examinadora.

Às professora Laís Cristina por aceitar o convite para participar da banca examinadora.

À empresa Sika pela disponibilização dos materiais utilizados nesta pesquisa.

À Faculdade de Física da UFJF pela realização dos ensaios e procedimentos de dispersão dos NTCs.

À UFOP e ao IME por realizarem os ensaios de microscopia eletrônica de varredura.

À UFJF pelo ensino público, gratuito e de qualidade.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

## RESUMO

Os nanotubos de carbono (NTCs) possuem excelentes propriedades mecânicas. Quando aplicados a concretos, eles funcionam como reforço, aprimorando a microestrutura da matriz e evitando a propagação de fissuras. Entretanto, ainda existem lacunas de pesquisa envolvendo o comportamento de NTCs sob temperaturas elevadas, um tema importante a fim de garantir a segurança humana e a preservação da edificação em caso de incêndio. Dentro desse contexto, o objetivo desta pesquisa é avaliar o comportamento termomecânico de um concreto com adição de NTCs funcionalizados e não funcionalizados. Para este fim, foram ensaiados três tipos de concreto: convencional (REF), com NTCs funcionalizados (NTC FUN) e com NTCs não funcionalizados (NTC NF); ambos no teor de 0,15% em relação à massa de cimento. Foram realizados ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV), massa específica, absorção, índice de vazios, determinação de velocidade de propagação de onda ultrassônica (VPU), resistência à compressão e à tração. Os concretos foram ensaiados em temperatura ambiente e após aquecimento de 300°C, 600°C e 900°C em forno mufla. Os resultados da MEV mostraram a má dispersão dos NTCs e falta de homogeneidade no nanomaterial no concreto. Não foram identificadas diferenças significativas entre a dispersão dos dois tipos de NTCs. Não há diferença nos resultados de massa específica, índice de vazios e VPU para os traços NTC FUN e NTC NF em todas as temperaturas estudadas. Não há diferença entre a perda de massa em 300°C e 600°C dos traços com adição de NTCs. Na temperatura de 900°C, a perda de massa do traço NTC NF foi superior ao traço NTC FUN. Não há diferença entre a absorção de água dos traços com adição de NTCs nas temperaturas ambiente, 300°C e 600°C. Em 900°C, a absorção do traço NTC NF foi superior ao traço NTC FUN. Na temperatura ambiente, os resultados de resistência à compressão dos traços com adição de NTCs foi semelhante. Quanto às resistências residuais à compressão, o traço NTC FUN apresentou melhor desempenho na temperatura de 300°C, possivelmente devido à forte ligação entre os grupos funcionais dos NTCs funcionalizados com a matriz cimentícia. Na temperatura ambiente e após a exposição a temperaturas elevadas não houve diferença na resistência à tração dos traços NTC FUN e NTC NF. Pode-se concluir que a adição de NTCs funcionalizados melhora o comportamento mecânico do concreto no início da exposição a temperaturas elevadas em situações de incêndio, mas mais trabalhos são recomendados para entender os fenômenos por trás da dispersão desse material.

**Palavras-chave:** Nanotubos de carbono; Funcionalização; Concreto; Temperaturas elevadas; Incêndio.

## ABSTRACT

Carbon nanotubes (CNTs) have excellent mechanical properties. When applied to concrete, they function as reinforcement, improving the microstructure of the matrix and preventing the propagation of cracks. However, there are still research gaps involving the behavior of CNTs at high temperatures, an important topic in order to guarantee human safety and the preservation of buildings in the event of fire. Within this context, the objective of this research is to evaluate the thermomechanical behavior of a concrete with the addition of functionalized and non-functionalized CNTs. For this purpose, three types of concrete were tested: conventional (REF), with functionalized CNTs (NTC FUN) and with non-functionalized CNTs (NTC NF); both at a content of 0.15% in relation to the cement mass. Scanning electron microscopy (SEM), specific mass, absorption, void index, determination of ultrasonic wave propagation speed (VPU), compressive and tensile strength were carried out. The concretes were tested at room temperature and after heating to 300°C, 600°C and 900°C in a muffle furnace. The SEM results showed the poor dispersion of CNTs and lack of homogeneity in the nanomaterial in the concrete. No significant differences were identified between the dispersion of the two types of CNTs. There is no difference in the specific mass, void ratio and VPU results for the NTC FUN and NTC NF traces at all temperatures studied. There is no difference between the mass loss at 300°C and 600°C of the traces with the addition of CNTs. At a temperature of 900°C, the mass loss of the NTC NF mix was greater than that of the NTC FUN mix. There is no difference between the water absorption of traces with the addition of CNTs at room temperatures, 300°C and 600°C. At 900°C, the absorption of the NTC NF trace was higher than the NTC FUN trace. At room temperature, the compressive strength results of the traces with the addition of CNTs were similar. Regarding residual compressive strength, the NTC FUN mix showed better performance at a temperature of 300°C, possibly due to the strong bond between the functional groups of the CNTs functionalized with the cementitious matrix. At room temperature and after exposure to high temperatures there was no difference in the tensile strength of the NTC FUN and NTC NF traces. It can be concluded that the addition of functionalized CNTs improves the mechanical behavior of concrete at the beginning of exposure to high temperatures in fire situations, but further work is recommended to understand the phenomena behind the dispersion of this material.

**Keywords:** Carbon nanotubes; Functionalization; Concrete; High temperatures; Fire.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Formação do NTC: (a) folha de grafeno; (b) e (c) folha de grafeno se enrolando; (d) NTC formado.....	14
Figura 2- Representação da estrutura: a) NTC de parede simples; b) NTC de parede múltipla .....	15
Figura 3- Diferentes formações de parede de NTC.....	15
Figura 4 - Funcionalização covalente do NTC.....	16
Figura 5 - NTC não funcionalizado e NTC com funcionalização covalente.....	16
Figura 6 – Funcionalização não covalente: surfactante na superfície do NTC .....	17
Figura 7 - Crescimento de C-S-H na superfície do NTC .....	18
Figura 8 - Interação entre o NTC com funcionalização covalente e o produto de hidratação do cimento .....	18
Figura 9 - Efeito de ponte dos NTCs.....	19
Figura 10 - Mecanismo de fragmentação explosiva no concreto: a) tensões térmicas; b) pressão de vapor nos poros.....	25
Figura 11 – Relação entre a resistência à compressão e temperatura de concretos com 0,1% a 1% de NTCs funcionalizados .....	27
Figura 12 - Fluxograma dos ensaios realizados na pesquisa. ....	29
Figura 13 – NTCs utilizados na pesquisa: a) NTC funcionalizado; b) NTC não funcionalizado .....	32
Figura 14 - Granulometria da areia natural .....	33
Figura 15 - Curva granulométrica brita 0 .....	34
Figura 16 - Materiais da mistura do concreto na argamassadeira. ....	36
Figura 17 – a) Solução com água, aditivo policarboxilato e NTCs b) Solução aquosa com NTCs no homogeneizador ultrassônico .....	37
Figura 18 – Cura Inicial dos corpos de prova.....	38
Figura 19 – Corpos de prova imersos .....	38
Figura 20- Corpos de prova dentro da mufla.....	39
Figura 21 - Ensaio de ultrassom .....	41
Figura 22 - Ensaio de resistência à compressão .....	42
Figura 23 – Ensaio de resistência à tração por compressão diametral .....	43
Figura 24 – MEV temperatura ambiente (UFOP), magnificação de 5.000x: a) traço NTC FUN; b) traço NTC FUN.....	45

Figura 25 – MEV temperatura ambiente (IME), magnificação de 5.000x: a) traço NTC FUN; b) traço NTC NF.....	45
Figura 26 - MEV temperatura de 300°C (UFOP), magnificação de 5.000x: a) traço NTC FUN; b) traço NTC NF.....	46
Figura 27 - MEV temperatura de 300°C (IME), magnificação de 10.000x: a) traço NTC FUN; b) traço NTC NF.....	47
Figura 28 - MEV temperatura de 600°C (UFOP), magnificação de 5.000x: a) traço NTC FUN; b) traço NTC NF.....	48
Figura 29 - MEV temperatura de 600°C (IME): a) traço NTC FUN, magnificação de 20.000x; b) traço NTC NF, magnificação de 15.000x .....	48
Figura 30 - MEV temperatura de 900°C (UFOP), magnificação de 5.000x: a) traço NTC FUN; b) traço NTC NF.....	49
Figura 31 – Resultados de perda de massa .....	50
Figura 32 - Resultados de massa específica .....	51
Figura 33 - Resultados de índice de vazios .....	52
Figura 34 - Resultados de absorção de água.....	53
Figura 35 - Resultados de VPU .....	54
Figura 36 - Resultados de resistência à compressão.....	55
Figura 37 – Perda de resistência à compressão após a exposição a temperaturas elevadas .....	56
Figura 38 - Comparação entre os resultados de resistência à tração .....	58
Figura 39 - Perda de resistência à compressão após a exposição a temperaturas elevadas.....	59
Figura 40 – Corpos de prova dos traços REF, NTC FUN e NTC NF em temperatura ambiente e após a exposição as temperaturas de 300°C, 600°C e 900°C .....	61
Figura 41 – Perda de massa - 300°C.....	76
Figura 42 – Perda de massa - 600°C.....	76
Figura 43 – Perda de massa 900°C .....	76
Figura 44 – Massa específica - Temperatura Ambiente .....	77
Figura 45 – Massa específica - 300°C .....	78
Figura 46 – Massa específica - 600°C .....	79
Figura 47 – Massa específica - 900°C .....	80
Figura 48 – Índice de vazios - Temperatura Ambiente .....	81
Figura 49 – Índice de vazios - 300°C .....	82
Figura 50 – Índice de vazios - 600°C .....	83
Figura 51 – Índice de vazios - 900°C .....	84

Figura 52 – Absorção - Temperatura ambiente .....	85
Figura 53 – Absorção de água - 300°C .....	86
Figura 54 - Absorção de água - 600°C .....	87
Figura 55 - Absorção de água - 900°C .....	88
Figura 56 – VPU - Temperatura ambiente .....	89
Figura 57 – VPU - 300°C .....	90
Figura 58 – VPU - 600°C .....	91
Figura 59 – Resistência à compressão - Temperatura Ambiente .....	92
Figura 60 – Resistência à compressão - 300°C.....	93
Figura 61- Resistência à compressão - 600°C .....	94
Figura 62 - Resistência à compressão - 900°C .....	95
Figura 63 - Resistência à tração – Temperatura ambiente .....	96
Figura 64 - Resistência à tração - 300°C .....	97
Figura 65 - Resistência à tração - 600°C .....	98
Figura 66 - Resistência à tração - 900°C .....	99

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Transformações no concreto exposto a altas temperaturas .....	23
Tabela 2 – Evolução do comportamento do concreto em função da elevação de temperatura	24
Tabela 4 - Composição química do cimento CP V -ARI MAX.....	30
Tabela 5 - Propriedades Físico-Químicas do cimento CP V– ARI MAX.....	30
Tabela 6 - Resistência à compressão do Cimento CPV -ARI MAX segundo a NBR 7215 ..	30
Tabela 7 - Propriedades dos NTCs funcionalizados (NTC FUN) .....	31
Tabela 8 – Propriedades dos NTCs não funcionalizados (NTC NF) .....	31
Tabela 9 – Caracterização da areia natural .....	32
Tabela 10 - Caracterização brita 0.....	33
Tabela 11 – Características físicas e químicas da sílica ativa .....	34
Tabela 12 -Principais características dos aditivos .....	35
Tabela 13 - Traços utilizados na pesquisa .....	35
Tabela 14 - Resultados de massa específica de cada corpo de prova.....	70
Tabela 15 - Resultados de índice de vazios de cada corpo de prova.....	71
Tabela 16 - Resultados de absorção de cada corpo de prova .....	72
Tabela 17 - Resultados de velocidade de propagação de onda ultrassônica de cada corpo de prova.....	73
Tabela 18 - Resultados de resistência à compressão de cada corpo de prova.....	74
Tabela 19 - Resultados de resistência à tração de cada corpo de prova .....	74
Tabela 20 - Resultados de perda de massa de cada corpo de prova .....	75

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
1.1	JUSTIFICATIVA .....	11
1.2	OBJETIVOS .....	13
1.3	ESTRUTURA DA PESQUISA .....	13
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>14</b>
2.1	NANOTUBOS DE CARBONO (NTCs).....	14
2.2	PROPRIEDADES DA MATRIZ COM DOS NANOTUBOS DE CARBONO (NTCs) .....	17
2.3	DISPERSÃO DOS NANOTUBOS DE CARBONO EM MATRIZES CIMENTÍCIAS.....	21
2.4	COMPORTAMENTO DO CONCRETO EXPOSTO A TEMPERATURAS ELEVADAS .....	22
2.5	COMPORTAMENTO DO CONCRETO COM ADIÇÃO DE NANOTUBOS DE CARBONO EXPOSTO A TEMPERATURAS ELEVADAS.....	25
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>29</b>
3.1	MATERIAIS.....	29
3.1.1	Cimento Portland.....	30
3.1.2	Nanotubos de Carbono (NTCs).....	31
3.1.3	Agregados.....	32
3.1.4	Adições e Aditivos.....	34
3.2	DOSAGEM E MOLDAGEM DOS CONCRETOS .....	35
3.2.1	Planejamento experimental.....	35
3.2.2	Mistura dos materiais.....	36
3.2.3	Moldagem, cura e retificação dos corpos de prova.....	37
3.2.4	Exposição Térmica.....	39
3.3	ENSAIOS REALIZADOS .....	40
3.3.1	Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	40
3.3.2	Determinação de massa específica absorção e índice de vazios.....	40
3.3.3	Ensaio de determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica (VPU).....	41

3.3.4	Determinação de resistência à compressão.....	42
3.3.5	Determinação da resistência à tração por compressão diametral.....	42
3.3.6	Perda de massa.....	43
3.3.7	Análise estatística.....	43
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>44</b>
4.1	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) .....	44
4.2	PERDA DE MASSA .....	49
4.3	MASSA ESPECÍFICA, ÍNDICE DE VAZIOS E ABSORÇÃO de água .....	50
4.4	VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO ULTRASSÔNICA (VPU) .....	53
4.5	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....	54
4.6	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO.....	57
4.7	ANÁLISE VISUAL.....	59
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>62</b>
5.1	LIMITAÇÕES DO TRABALHO E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....	63
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>65</b>
<b>7</b>	<b>APÊNDICE A – RESULTADOS INDIVIDUAIS DE CADA CORPO DE PROVA .....</b>	<b>70</b>
<b>8</b>	<b>APÊNDICE B – ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....</b>	<b>76</b>

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 JUSTIFICATIVA

Uma importante aplicação da nanotecnologia na construção civil é a utilização de nanotubos de carbono (NTCs) no concreto. Os NTCs são estruturas em forma de tubo compostas por folhas de grafeno em dimensões nanométricas (SABOLKINA *et al.*, 2012 *apud* GLEIZE e SILVESTRO, 2020). Esses materiais possuem excelentes propriedades, como alta resistência à tração e à fratura, alto módulo de elasticidade, alta temperatura de falha e boa condutividade elétrica e térmica (RASHAD, 2017).

Com isso, os NTCs podem aprimorar algumas características negativas do concreto, como a baixa resistência à tração e baixa capacidade de deformação (GLEIZE e SILVESTRO, 2020). Os NTCs preenchem os microporos do concreto e proporcionam um efeito de ponte na matriz (HAWREEN, BOGAS e KURDA, 2019). Eles atravessam as microfissuras, impedindo sua propagação em macroescala e funcionando como material de reforço (CARRIÇO, BOGAS, *et al.*, 2017).

Entre as diversas solicitações às quais as estruturas de concreto são expostas, pode-se citar os casos de incêndio. Nessas situações, com o incêndio totalmente desenvolvido no compartimento, a temperatura média no local do fogo é de 900°C (CORPO DE BOMBEIROS DO ESTADO DE GOIÁS, 2014). Segundo o Anuário do Corpo de Bombeiros do Estado do Rio de Janeiro, em 2018, o órgão foi solicitado para atender 31.237 casos de incêndios no estado, dos quais 39% foram em edificações. De acordo com o Corpo de Bombeiros de Estado do Ceará, em 2022, foram apagados 975 incêndios em residências unifamiliares e multifamiliares no estado. Segundo o jornal eletrônico G1, o incêndio ocorrido em Londres, em 2017, em um edifício residencial de 24 andares resultou na morte de 12 pessoas. E ainda, segundo o jornal eletrônico Correio Braziliense, em 2018, houve um incêndio em um prédio de 22 andares em São Paulo que ocasionou na morte de uma pessoa e o desabamento da edificação. Além disso, no Brasil, é possível citar diversos casos da destruição de patrimônios históricos e danos à edificações devido à incêndios. Dentre os casos, podemos citar: Instituto Butantan em São Paulo em 2010; Capela São Pedro Alcântara no Rio de Janeiro em 2011; Arquivo Público do Estado de São Paulo em 2012; Memorial da América Latina em São Paulo em 2013; Centro Cultural Liceu de Artes e Ofícios em São Paulo em 2014; Museu da Língua Portuguesa em São Paulo em 2015; Museu Nacional no Rio de Janeiro em 2018 e Cinemateca Brasileira em São Paulo em 2021.

Estes números são alarmantes e evidenciam a importância de haver conhecimento sobre o comportamento de materiais estruturais sob condição de incêndio a fim de garantir a

segurança humana e do patrimônio público. Estruturas mais resistentes a altas temperaturas podem aumentar, em caso de incêndio, a segurança dos usuários e a preservação da edificação e do patrimônio público. Segundo a NBR 14432 (ABNT, 2001), a estrutura da construção deve suportar entre 30 e 120 minutos para que haja a evacuação completa do local.

Em caso de incêndio em uma edificação de concreto armado, as temperaturas elevadas levam à evaporação da água e decomposição de outros elementos, gerando gases, o que eleva a pressão interna do concreto (MEMON, SHAH, *et al.*, 2018). Esse processo pode levar ao aparecimento de fissuras e à fragmentação explosiva do material, também chamada *spalling* (VIANA, BACELAR, *et al.*, 2020). Essa condição reduz significativamente a resistência à compressão, a resistência à tração e o módulo de elasticidade do concreto (YAO e LU, 2021).

Os principais fatores que contribuem para uma maior segurança de estruturas de concreto à temperaturas elevadas são a resistência à tração e a microestrutura do compósito (VIANA, BACELAR, *et al.*, 2020). A incorporação de NTCs no concreto já mostrou potencial para melhoria dessas propriedades (VIANA, BACELAR, *et al.*, 2020). Além do preenchimento dos microporos e neutralização das microfissuras (CARRIÇO, BOGAS, *et al.*, 2017), efeito já citado anteriormente, os NTCs funcionam como locais de nucleação para o crescimento do silicato de cálcio hidratado (C-H-S). Além disso, a temperatura de falha dos nanotubos é de 600°C, o que pode melhorar o desempenho de fratura e deformação precoce da pasta de cimento e reduzir a propagação de trincas no início da exposição a altas temperaturas em situações de incêndio (YAO e LU, 2021).

Existem pesquisas referentes às propriedades mecânicas do concreto com adição de NTCs em temperatura ambiente, como as feitas por Adhikary, Rudzionis *et al.* (2021), Mosallam, Behbahani *et al.* (2021) e Hawreen *et al.* (2019). No entanto, o comportamento do concreto nanomodificado quando submetido a temperaturas elevadas é tema de poucos estudos. Yao e Lu (2021), Viana *et al.* (2020) e Baloch, Khushnood e Khaliq (2018) investigaram o comportamento do concreto com adição de NTCs em temperaturas elevadas. Esses autores observaram que a adição dos NTCs diminuiu a ocorrência de fragmentação explosiva no concreto (*spalling*) e que a resistência à compressão residual do concreto nanomodificado foi reduzida, drasticamente, após a exposição a temperatura de 600°C. Os pesquisadores afirmaram que estudos mais profundos precisam ser feitos. Por essa razão, este estudo compara o comportamento de concretos com adição de NTCs funcionalizados e não funcionalizados após a exposição a temperaturas elevadas, buscando aperfeiçoar cada vez mais as propriedades do concreto e possibilitar maior segurança humana e preservação do patrimônio no caso de incêndio. Este trabalho investiga a porosidade, absorção, velocidade de propagação de onda

ultrassônica e o efeito da adição de NTCs funcionalizados e não funcionalizados no concreto após a exposição a temperaturas elevadas. Essas análises ainda não foram realizadas por outros trabalhos na literatura.

## **1.2 OBJETIVOS**

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar o comportamento termomecânico de um concreto com adição de nanotubos de carbono (NTCs), comparando o comportamento dos NTCs funcionalizados (NTC FUN) e não funcionalizados (NTC NF).

Os objetivos específicos são:

- Investigar a microestrutura do concreto com adição de NTCs funcionalizados e não funcionalizados;
- Avaliar a influência dos NTCs utilizados nas propriedades mecânicas do concreto em temperatura ambiente;
- Avaliar e comparar a influência dos NTCs utilizados nas propriedades residuais do concreto após a exposição as temperaturas de 300°C, 600°C, e 900°C.

## **1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA**

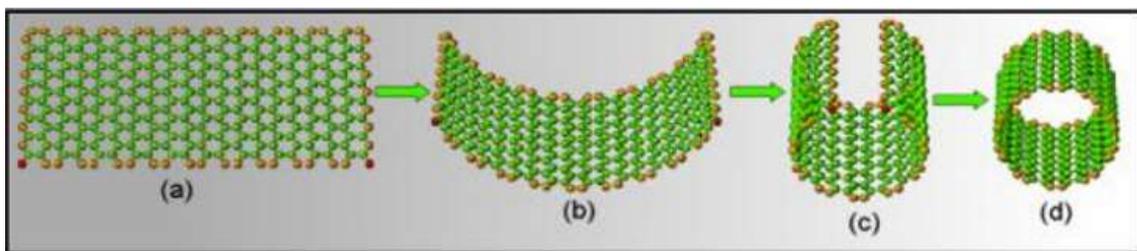
A pesquisa está estruturada em cinco capítulos, sendo este primeiro a introdução, abordando a contextualização do tema, a justificativa para a realização da pesquisa e os objetivos. No segundo capítulo desenvolveu-se o estudo da arte acerca dos temas pertinentes: características dos NTCs, das propriedades das matrizes cimentícias com adição dos NTCs e dos desafios de sua dispersão; alterações ocorridas no concreto quando submetido a temperaturas elevadas e o comportamento do concreto com adição de NTCs exposto a temperaturas elevadas. O terceiro capítulo apresenta o método experimental, trazendo a descrição dos materiais utilizados na pesquisa e dos ensaios realizados. O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos e as discussões realizadas. Por fim, o último capítulo traz as conclusões desta pesquisa, bem como sugestões para pesquisas futuras.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 NANOTUBOS DE CARBONO (NTCS)

Os nanotubos de carbono (NTCs) tornaram-se conhecidos no mundo acadêmico, em 1991, a partir dos estudos do pesquisador japonês Sumio Iijima que sintetizou o material em laboratório pela primeira vez (IJIMA, 1991). Os NTCs são estruturas em forma de tubo compostas por folhas de grafeno em dimensões nanométricas. Os átomos de carbono da folha de grafeno são unidos por ligações químicas *sp*, o que proporciona a esses materiais alto módulo de Young e alta resistência (SABOLKINA *et al.*, 2012 *apud* SILVESTRO E GLEIZE, 2020). A formação do NTC é apresentada na Figura 1.

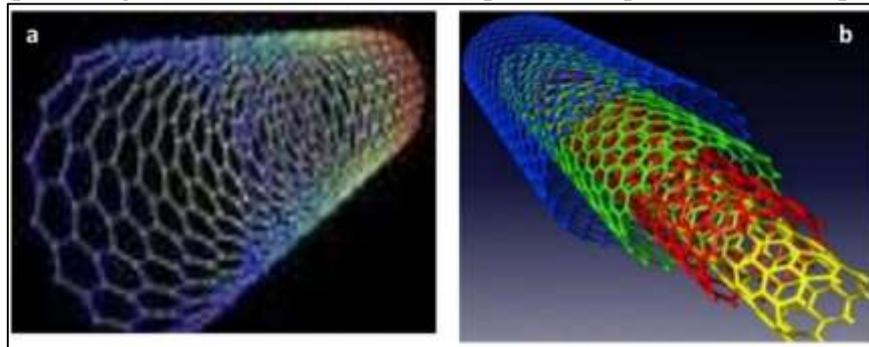
Figura 1- Formação do NTC: (a) folha de grafeno; (b) e (c) folha de grafeno se enrolando; (d) NTC formado



Fonte: Couto (2006).

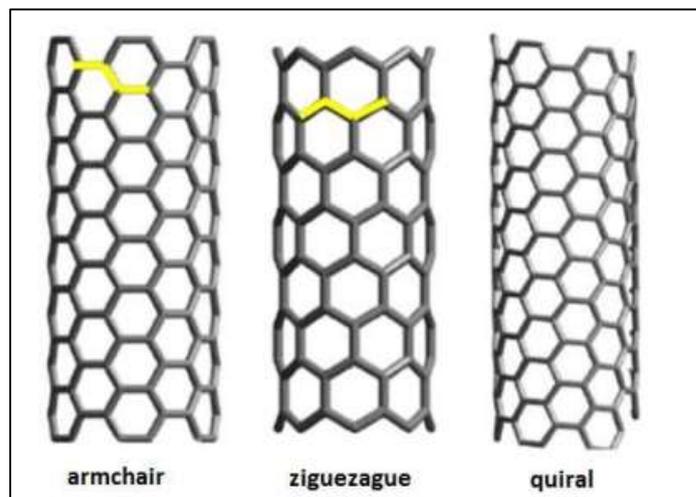
Os NTCs podem ser formados por uma única parede (NTC de parede simples) ou por várias paredes (NTC de paredes múltiplas) (GLEIZE e SILVESTRO, 2020). Os NTCs de paredes múltiplas são mais utilizados, pois possuem maior facilidade de produção em larga escala e custo mais baixo quando comparado ao NTC de parede simples (RASHAD, 2017). A Figura 2 mostra os dois tipos de NTC. As paredes, de acordo com o seu formato, podem ser do tipo *armchair*, zigzag ou quiral, conforme ilustrado na Figura 3 (RASHAD, 2017).

Figura 2- Representação da estrutura: a) NTC de parede simples; b) NTC de parede múltipla



Fonte: Rashad (2017).

Figura 3- Diferentes formações de parede de NTC



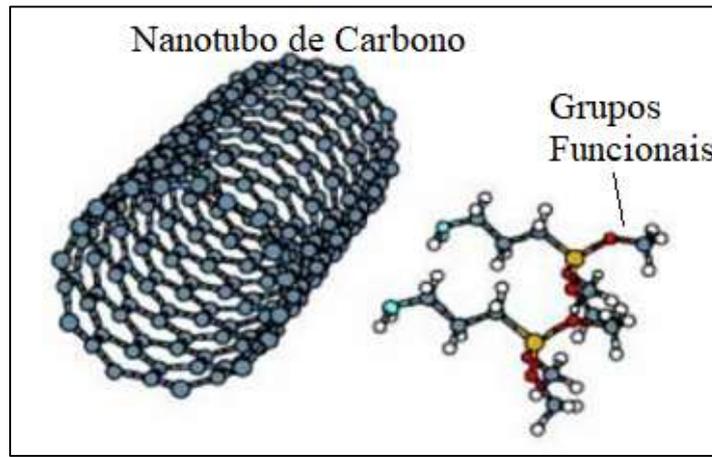
Fonte: Adaptado Rashad (2017).

Rashad (2017), Silvestro e Gleize (2020) e Xie, Cai e Wang (2007) destacaram as principais características dos NTCs:

- Resistência à tração em torno de 63GPa (que é aproximadamente 50 vezes maior que o aço);
- Módulo de Young em torno de 1 TPa (que é aproximadamente 5 vezes maior que o do aço);
- Resistência média a fratura de até 100 GPa;
- Deformações elásticas cerca de 60 vezes maior que o aço;
- Temperatura de falha de aproximadamente 600°C;
- Boa condutividade elétrica e
- Alta condutividade térmica.

Os NTCs podem ser submetidos ao processo de funcionalização para tornar o nanomaterial mais reativo com o meio e facilitar sua dispersão em solução aquosa (OSORIO, 2008). Segundo Silva (2019), o processo pode ser covalente ou não covalente. A funcionalização covalente consiste na adsorção de moléculas específicas à superfície dos NTCs (BORGES, 2019). As moléculas adicionadas são denominadas grupos funcionais (Figura 4) e irão alterar as propriedades superficiais do nanomaterial (OSORIO, 2008).

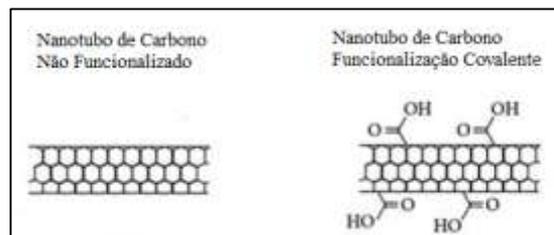
Figura 4 - Funcionalização covalente do NTC



Fonte: Capaz e Chacham (2003).

De acordo com Gleize e Silvestro (2020), é comum incorporar grupos funcionais carboxila (-COOH) e hidroxila (-OH) ao NTC (Figura 5) por meio de um tratamento com uma mistura de ácido nítrico. Osorio (2008) observou que a funcionalização covalente danifica algumas ligações do NTC, levando à sua quebra e gerando defeitos em sua superfície, o que possibilita a adsorção dos grupos funcionais e cria os efeitos desejados de dispersão e reatividade.

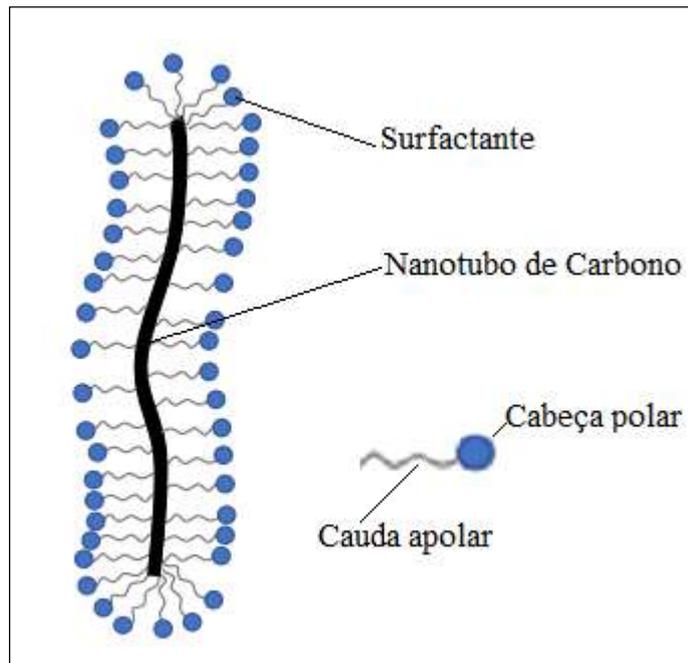
Figura 5 - NTC não funcionalizado e NTC com funcionalização covalente



Fonte: Adaptado de (VESMAWALA, VAGHELA, *et al.*, 2020).

Segundo Vaisman *et al.* (2007), a funcionalização não covalente consiste na aplicação de surfactantes à superfície dos NTCs. Os surfactantes possuem, geralmente, uma região hidrofílica (cabeça polar) e uma região hidrofóbica (cauda apolar) (VAISMAN, WAGNER e MARON, 2007). Eles formam uma micela entorno do nanomaterial (Figura 6) e não danificam sua estrutura (SILVA, 2019). A finalidade do processo é facilitar a dispersão do nanomaterial em solução aquosa.

Figura 6 – Funcionalização não covalente: surfactante na superfície do NTC



Fonte: Adaptado de Pinto (2022).

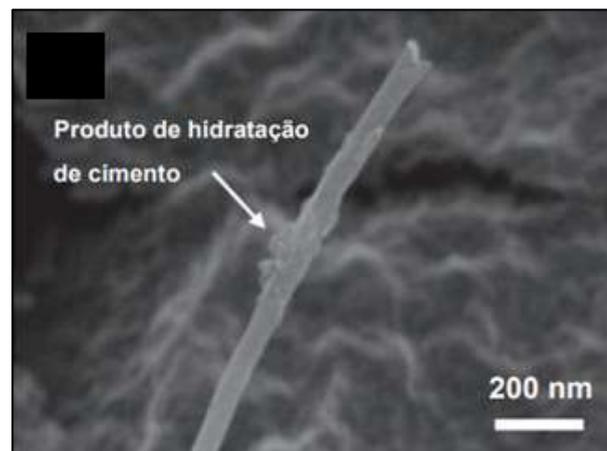
## 2.2 PROPRIEDADES DA MATRIZ COM DOS NANOTUBOS DE CARBONO (NTCS)

Em matrizes cimentícias, a adição dos NTCs ao concreto promove três principais efeitos: enchimento (*filler*), nucleação e ponte (CARRIÇO, BOGAS, *et al.*, 2017). O primeiro efeito ocorre devido ao preenchimento dos microporos pelos nanotubos, principalmente nos espaços entre os produtos de hidratação do cimento (HAWREEN, BOGAS e KURDA, 2019).

Os NTCs também funcionam como locais de nucleação para o crescimento de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), promovendo uma hidratação mais rápida e uniforme dos compostos cimentícios (CARRIÇO, BOGAS, *et al.*, 2017). Zou *et al.* (2015) analisaram os produtos de hidratação do cimento na superfície do NTC (Figura 7), observando que a ligação entre o nanomaterial e a matriz é forte, devido as ligações covalentes formadas entre as

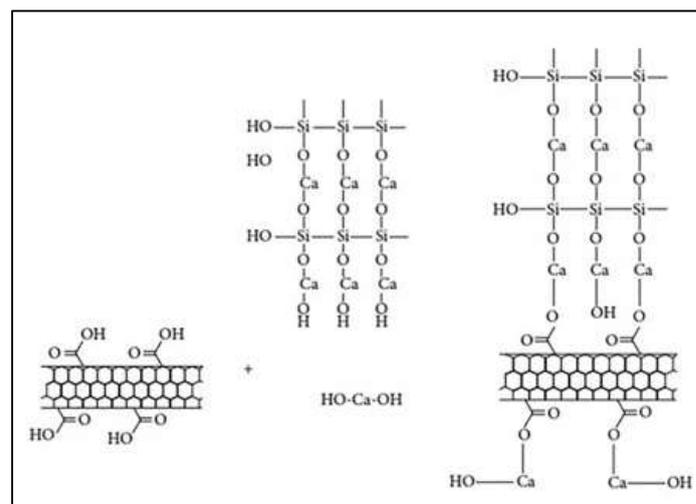
ramificações do NTC e a matriz. A Figura 8 mostra a ligação química entre o NTC com funcionalização covalente e os produtos de hidratação do cimento formados sobre ele. Os NTCs são capazes de ancorar os aglomerados C-S-H vizinhos e preencher vazios entre eles, o que é altamente controlado pela relação entre o comprimento e diâmetro do nanotubo e pela técnica de dispersão (HAWREEN, BOGAS e KURDA, 2019). Assim, segundo Konsta *et al.* (2019), os NTCs aumentam a eficiência na transferência de cargas.

Figura 7 - Crescimento de C-S-H na superfície do NTC



Fonte: Adaptado de Zou *et al.* (2015).

Figura 8 - Interação entre o NTC com funcionalização covalente e o produto de hidratação do cimento

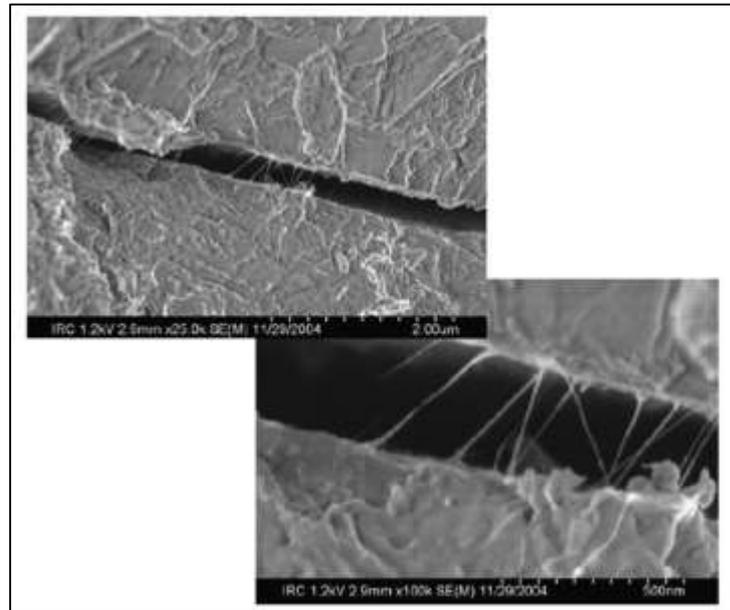


Fonte: Adaptado (VESMAWALA, VAGHELA, *et al.*, 2020).

O terceiro efeito, de ponte, deve-se ao fato de os NTCs atravessarem as microfissuras (Figura 9), neutralizando sua progressão e o seu crescimento em macroescala (RASHAD,

2017). Dessa forma, os NTCs funcionam como um reforço para o concreto (GLEIZE e SILVESTRO, 2020).

Figura 9 - Efeito de ponte dos NTCs



Fonte: Rashad (2017).

A revisão bibliográfica de Silvestro e Gleize (2020) estudou a adição de NTCs em matrizes cimentícias. Quanto à resistência à compressão, foi observado que, dos 99 artigos analisados, 91 investigaram essa propriedade, dentre os quais 94% relataram aumento da propriedade com a incorporação dos NTCs em relação à amostra de referência. Em relação à resistência à flexão, dos trabalhos recrutados, 57 apresentaram resultados para essa propriedade e 92% relataram aumento da resistência com adição dos nanotubos. Por fim, para a resistência à tração, apenas 19 artigos apresentaram resultados e todos mostraram desempenho equivalente ou superior ao traço de controle. Segundo os autores, os artigos que reportaram propriedades mecânicas inferiores às amostras de referências, em sua maioria, justificaram o ocorrido devido ao alto percentual de NTCs utilizados, a má dispersão e aglomeração do nanomaterial, à técnica de dispersão, à incorporação de ar, ao tipo de dispersante e à utilização de NTCs funcionalizados com grupos hidroxila (GLEIZE e SILVESTRO, 2020). Cabe ressaltar que apenas 13% dos trabalhos analisados na revisão foram feitos com concreto, enquanto os outros 87% foram adições de NTCs em pastas e argamassas de cimento.

Como estudos ilustrativos desses efeitos, pode-se citar a pesquisa de Hawreen *et al.* (2019), que avaliou as propriedades mecânicas do concreto com cinco tipos diferentes NTCs.

Foram utilizados nanotubos de carbono de paredes múltiplas, em concentrações de 0,05%, 0,1% e 0,5% em relação à massa de cimento, e dispersos pelo processo de sonificação (que será explicado em detalhes na próxima seção) e adição de aditivo dispersor. As seguintes propriedades foram verificadas: resistência à tração, à compressão e à flexão, energia de fratura e módulo de elasticidade. Observaram-se aumentos nessas propriedades de até 23%, 18%, 27%, 42% e 15%, respectivamente. Segundo os autores, as melhorias nas resistências mecânicas devem-se, principalmente, ao efeito dos NTCs no preenchimento dos microporos e na retenção da propagação de fissuras. Os pesquisadores observaram que em termos de resistência, a incorporação dos NTCs afetou a morfologia inicial dos produtos de hidratação do cimento, acelerando o processo de hidratação. Os autores concluíram que, em geral, as adições de NTCs, mesmo em baixa quantidade, melhoraram as propriedades mecânicas do concreto.

O estudo de Konsta *et al.* (2019) investigou o efeito da adição de 0,1% de NTCs, em relação à massa de cimento, no concreto convencional e de alta resistência. Foram utilizados nanotubos de carbono de paredes múltiplas funcionalizados. Estes foram dispersos pelo processo de sonificação e com aditivo à base de policarboxilato. A referida adição de NTCs aumentou o módulo de elasticidade em até 56% no concreto convencional e em até 40% no concreto de alta resistência. Foi observado, a partir da proporcionalidade das curvas de tensão de compressão *versus* deformação, que o concreto nanomodificado tem sua capacidade de carga aumentada significativamente durante a deformação elástica. Segundo os autores, a incorporação de NTCs fornece ao concreto um reforço a sua nanoestrutura, modificando a interface entre agregados a matriz cimentícia, o que altera benéficamente, a eficiência da transferência de carga (KONSTA-GDOUTOS, DANOGLIDIS e SHAH, 2019).

Por fim, Mohsen *et al.* (2017) investigaram a adição de 0,03%, 0,08%, 0,1%, 0,25%, 0,35% e 0,5% de NTC em relação à massa de cimento em pastas de cimento. Os autores utilizaram NTCs de paredes múltiplas e dispersaram o nanomaterial com sonificação e aditivo policarboxilato. Eles observaram que as amostras contendo 0,25% ou mais de NTCs tiveram cerca de 60% e 25% de melhorias na resistência à flexão e à compressão. Porcentagens menores de 0,03% e 0,08% obtiveram apenas 5% e 10% de aumento na resistência à flexão e compressão. Além disso, a análise pela microscopia eletrônica de varredura (MEV) mostrou que teores baixos de NTCs como 0,03%, 0,08% e 0,15% tiveram dispersões melhores do que proporções mais elevadas 0,25%, 0,35% e 0,5%. A análise estatística sugeriu que um conteúdo de 0,25% de NTCs pode ser um teor ideal para melhores dispersões e resistência em termos de custo-benefício (MOHSEN, TAHA, *et al.*, 2017).

### 2.3 DISPERSÃO DOS NANOTUBOS DE CARBONO EM MATRIZES CIMENTÍCIAS

O grande desafio atual para a utilização dos NTCs na pasta de cimento é a sua dispersão. A natureza hidrofóbica, as fortes forças de Van der Waals e a interação interfacial fraca do nanomaterial com a matriz cimentícia dificultam sua distribuição homogênea (RASHAD, 2017). Além disso, a elevada área superficial dos NTCs aumenta as forças atrativas entre eles, gerando aglomeração (VAISMAN, WAGNER e MARON, 2007). Segundo Gillani *et al.* (2017), as melhorias no comportamento do concreto com adição de NTCs são altamente dependentes da sua dispersão.

Na revisão de Silvestro e Gleize (2020) de 99 artigos sobre NTC em matrizes cimentícias, foi observado que o método mais utilizado para a dispersão dos NTCs foi a sonificação, a combinação da energia ultrassônica com um aditivo dispersante. Os autores verificaram que 84% das pesquisas utilizaram ondas ultrassônicas e 77% usaram aditivos dispersores. O aditivo mais utilizado foi à base de policarboxilato, em 40,4% dos trabalhos, que, além de auxiliar na dispersão, contribui para melhorar a trabalhabilidade da mistura (GLEIZE e SILVESTRO, 2020).

Segundo os autores da revisão, o ultrassom promove a dispersão dos NTCs e o aditivo impede a sua aglomeração, garantindo a estabilidade da solução. A sonificação envolve a aplicação da energia ultrassônica e a transferência de ondas para formar um campo de cavitação no qual as diferenças de pressão provocam a implosão de milhões de microbolhas (GLEIZE e SILVESTRO, 2020). A energia acumulada é liberada, promovendo o rompimento das interações de Van der Waals e a esfoliação dos aglomerados de NTCs (ZOU, CHEN, *et al.*, 2015). O uso de aditivos dispersores durante o processo de sonificação promove a ligação do dispersor com as nanoestruturas esfoliadas, evitando a formação de aglomerados quando a energia do ultrassom for removida (ZOU, CHEN, *et al.*, 2015). Zou *et al.* (2015) também alerta que a energia de ultrassom utilizada deve ser capaz de dispersar os NTCs sem danificá-los.

Zou *et al.* (2015) observaram que quanto maior o tempo de ultrassom, maior a quantidade de NTCs dispersos e mais moléculas de policarboxilato são adsorvidas pelos NTCs. Conseqüentemente, há menor quantidade de policarboxilato para interagir com a mistura da pasta de cimento, resultando na diminuição da trabalhabilidade (ZOU, CHEN, *et al.*, 2015). Portanto, em alguns casos, para manter a trabalhabilidade, é necessário adicionar uma quantidade adicional de aditivo policarboxilato.

Vesmawala *et al.* (2020) realizaram uma pesquisa comparando a resistência à compressão, à tração e à flexão de um concreto com adição de NTCs funcionalizados nas

proporções de 0,1%, 0,2%, 0,3%, 0,4% e 0,5% com aditivo dispersor a base de policarboxilato e sem o aditivo. Para a adição de 0,1% de nanotubos de carbono, utilizando o aditivo, foi observado aumento na resistência à compressão de 28,65%, à tração 27,58% e flexão de 24,35%. Segundo os autores, a melhoria nas propriedades mecânicas do concreto com o aditivo deve-se à dispersão homogênea dos NTCs, que foi observada por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV).

A adição de um surfactante/dispersor, como o policarboxilato, caracteriza o processo de funcionalização não covalente. Os surfactantes possuem uma região hidrofílica e uma região hidrofóbica (SILVA, 2019). Essa estrutura permite a ligação do NTC (apolar) com a parte hidrofóbica do surfactante e a ligação da água (polar) com a parte hidrofílica do surfactante (SILVA, 2019). Tal procedimento melhora a dispersão dos NTCs em solução aquosa (VAISMAN, WAGNER e MARON, 2007).

De acordo com Osório (2008), a funcionalização covalente potencializa o processo de dispersão dos nanotubos em meio aquoso, uma vez que com os grupos funcionais, os NTCs tendem a se repelir uns aos outros. Segundo Li *et al.* (2005), os NTCs com grupos ácidos carboxílicos em suas superfícies (funcionalização covalente) induzem interações interfaciais do nanomaterial com os produtos de hidratação do cimento, produzindo uma alta resistência de ligação e aumentando a eficiência de transferência de carga da matriz de cimento. Além disso, os grupos funcionais atuam como ramificações, aderindo melhor à matriz cimentícia (LI, WANG e ZHAO, 2005).

Sobre a funcionalização covalente dos NTCs, segundo a revisão de Gleize e Silvestre (2020), os trabalhos apontam divergências sobre a sua influência nas propriedades mecânicas dos compósitos cimentícios. Segundo os autores, de modo geral, uma maior hidrofiliabilidade no sistema, devido à presença dos grupos funcionais, dificulta as reações de hidratação do cimento. Além disso, estes grupos podem gerar aglomeração por causa de sua carga superficial negativa (GLEIZE e SILVESTRO, 2020).

## **2.4 COMPORTAMENTO DO CONCRETO EXPOSTO A TEMPERATURAS ELEVADAS**

O desempenho do concreto exposto a altas temperaturas depende da composição do concreto, do tipo e da proporção dos componentes, das taxas de aquecimento e resfriamento e da duração da exposição (YAO e LU, 2021). Lima (2005) apresentou as transformações microestruturais causadas pelo aquecimento no concreto. Segundo o autor, até 80°C não ocorrem alterações significativas na estrutura. Entre 80°C e 105°C, ocorre a decomposição da

etringita e a perda de água adsorvida e interlamelar. O gel de C-S-H sofre processo de desidratação, a qual é iniciada em 100°C e termina próximo a 400°C. Durante esse processo, ocorre a liberação de água e, em alguns casos, formação de silicatos anidros e óxido de cálcio. Quando a fração cristalina do gel C-S-H desaparece, a larnita é formada. O C-S-H desaparece progressivamente até a temperatura de 400 °C, ao mesmo tempo em que ocorre um acréscimo na quantidade de larnita. A quantidade de portlandita apresenta um aumento progressivo até 250°C, permanecendo estável até 500°C, quando se degrada, rapidamente, e ocorre a formação do óxido de cálcio. Acima de 800°C, a pasta sofre reações cerâmicas e em 1100°C, ocorre o derretimento total dos cristais. As partículas anidras não são afetadas pela variação de temperatura. A Tabela 1 apresenta as transformações que ocorrem no concreto devido à exposição a temperaturas elevadas, com base no trabalho de Lima (2005) e Ribeiro e Tutikian (2018).

Tabela 1 - Transformações no concreto exposto a altas temperaturas

<b>Temp. (°C)</b>	<b>Transformação</b>
20 a 80	Processo de hidratação acelerado, tendo perda lenta de água capilar e redução das forças de coesão
100	Aumento acentuado na permeabilidade da água
80 a 200	Aumento na taxa de perda da água por capilaridade e desidratação da água não evaporável
80 a 850	Perda da água quimicamente combinada do gel de cimento
150	Primeiro pico de decomposição do C-S-H
300	Ponto de aumento considerável da porosidade e de microfissuras
350	Fragmentação de alguns agregados de rio
374	Ponto crítico da água, liberação das águas livres
400 a 600	Dissociação do Ca(OH) <sub>2</sub> em CaO e água
573	Transformação dos agregados (quartzo e areias) da forma $\alpha$ para $\beta$
550 a 660	Aumento dos efeitos térmicos
700	Descarbonatação do agregado calcário (CaCO <sub>3</sub> ) em CaO e CO <sub>2</sub>
720	Segundo pico de decomposição do C-S-H e formação de $\beta$ -C <sub>2</sub> -S e $\beta$ -CS
800	Substituição da estrutura hidráulica por uma cerâmica – modificação das ligações químicas
1060	Início da fusão de alguns constituintes

Fonte: Ribeiro e Tutikian (2018)

A exposição do concreto a altas temperaturas acarreta alterações na sua cor e perda de resistência (SOUZA e RIPPER, 2009). A Tabela 2 apresenta a variação de cor e a condição do concreto de acordo com a temperatura de exposição.

Tabela 2 – Evolução do comportamento do concreto em função da elevação de temperatura

<b>Temperatura em °C</b>	<b>Cor do Concreto</b>	<b>Condição do Concreto</b>
0 a 200	cinza	não afetado
300 a 600	rosa	razoavelmente bom
600 a 900	rosa a vermelho	friável, com alta sucção de água
900 a 1200	cinza avermelhado	friável
>1200	amarelo	decomposto

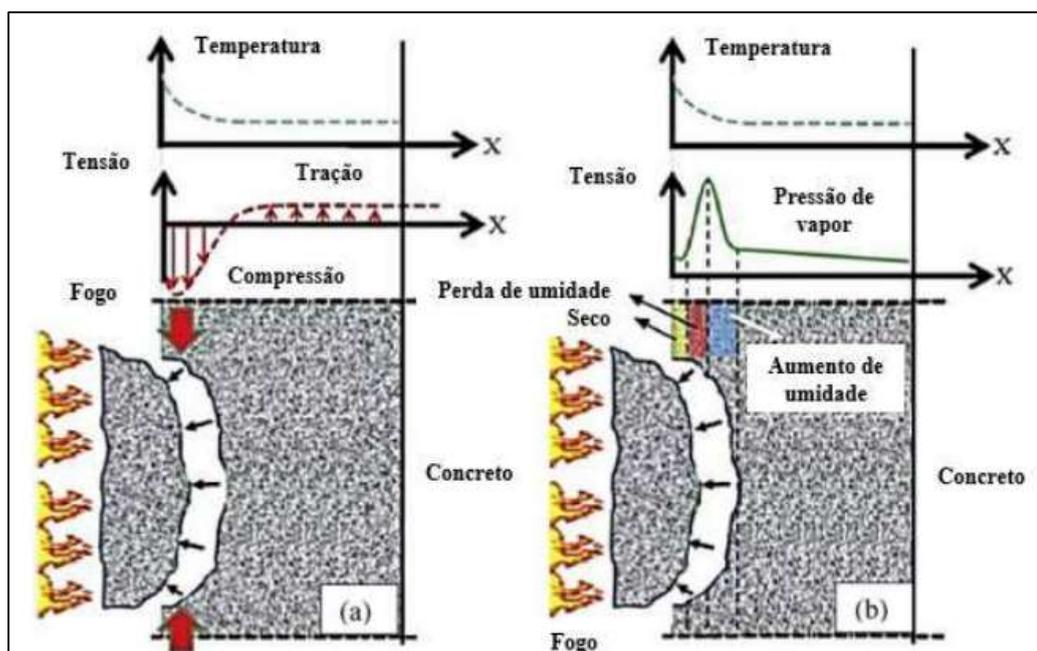
Fonte: Cánovas (1984).

À medida que a temperatura aumenta, a decomposição química dos hidratos, a retração diferencial da pasta de cimento, a instabilidade térmica e a expansão do agregado graúdo podem causar a fissuração da matriz de concreto (MEMON, SHAH, *et al.*, 2018).

Ao mesmo tempo, a exposição do concreto ao fogo e a temperaturas elevadas pode acarretar o *spalling*/fragmentação explosiva do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Esse fenômeno caracteriza-se pelo deslocamento, lascamento e fragmentação de pedaços da superfície do concreto (VIANA, BACELAR, *et al.*, 2020). O *spalling* pode ocorrer quando a temperatura da superfície do concreto aumenta, gerando tensões de compressão paralelamente à superfície da face aquecida e tensões perpendiculares de tração. Quando essas tensões diferenciais excedem a capacidade de tração do concreto, ele se desprende, conforme apresentado na Figura 10)a (MEMON, SHAH, *et al.*, 2018).

A fragmentação explosiva também pode ocorrer devido à pressão gerada pela vaporização da água aprisionada no concreto exposto a altas temperaturas. Durante o processo de aquecimento, uma parte da água interior do elemento estrutural evapora-se e move-se em direção à superfície do concreto, enquanto outra parte do vapor se move para dentro do núcleo, com menor nível de pressão interna (MEMON, SHAH, *et al.*, 2018). A água é condensada devido às temperaturas mais baixas no interior do concreto, criando uma camada que impede que o vapor escape da matriz e aumenta a pressão dos poros até que as tensões internas atinjam a resistência à tração do concreto, que podem causar sua fissuração e fragmentação (VIANA, BACELAR, *et al.*, 2020). Esse processo é ilustrado na Figura 10)b.

Figura 10 - Mecanismo de fragmentação explosiva no concreto: a) tensões térmicas; b) pressão de vapor nos poros



Fonte: Adaptado de Memon, Shah et al. (2018).

O concreto de alta resistência, quando submetido a cargas térmicas, apresenta uma maior tendência à fragmentação explosiva em relação ao concreto tradicional (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Isso ocorre porque o concreto de alta resistência é mais frágil e mais susceptível ao crescimento de trincas (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Além disso, segundo Viana, Bacelar *et al.* (2020) a baixa porosidade dos concretos de alta resistência pode aumentar ainda mais a pressão nos poros.

Nesse contexto, devido à alta condutividade térmica dos NTCs, a adição do nanomaterial no concreto pode facilitar o resfriamento no interior do maciço e evitar o aparecimento das tensões internas causadas pelo aquecimento (BATISTONA, GLEIZEA, *et al.*, 2020).

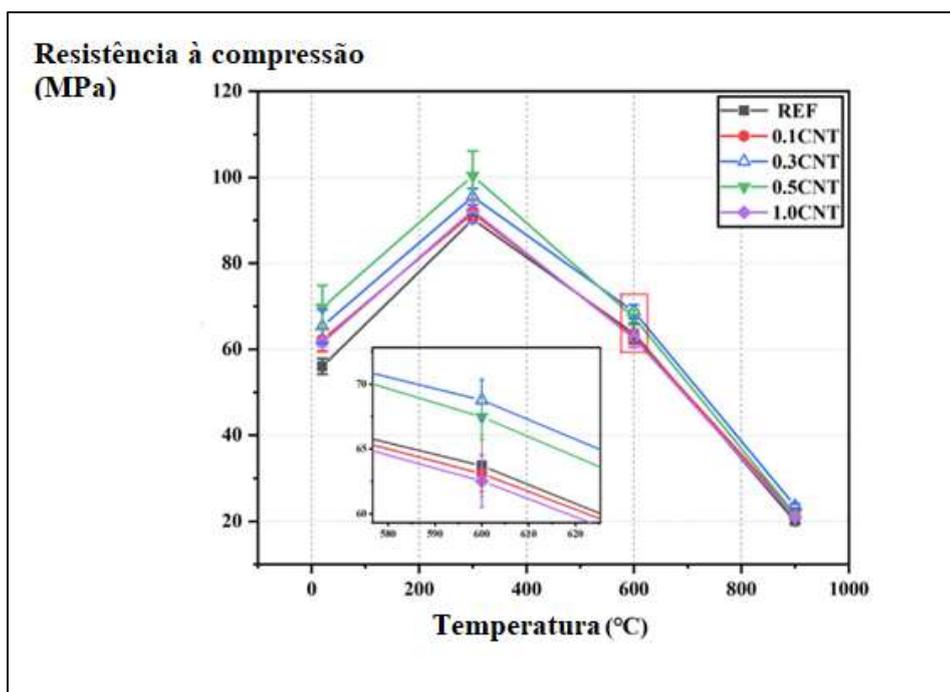
## 2.5 COMPORTAMENTO DO CONCRETO COM ADIÇÃO DE NANOTUBOS DE CARBONO EXPOSTO A TEMPERATURAS ELEVADAS

Como visto, quando o concreto é submetido a temperaturas elevadas, sua resistência à compressão, à tração e o módulo de elasticidade são reduzidos significativamente (YAO e LU, 2021). Assim, os NTCs podem melhorar o desempenho do concreto na resistência à fissuração térmica em temperaturas elevadas por possuírem alta resistência térmica e à fratura, por

restringirem a propagação de fissuras, por melhorarem o empacotamento das matrizes cimentícias e por fornecerem pontos de nucleação auxiliares (BALOCH, KHUSHNOOD e KHALIQ, 2018).

Yao e Lu (2021) realizaram um estudo com concreto de alta resistência com adições de 0% (REF), a 1% de NTCs funcionalizados (1.0 CNT) exposto às temperaturas de 300°C, 600°C, e 900°C (Figura 11). Foram analisadas a resistência à compressão e a microestrutura do concreto, comparando com um traço de referência. Para dispersar o nanomaterial, foram utilizados a sonificação e um aditivo à base de policarboxilato. Em temperatura ambiente, o concreto com adição de 0,5% de NTCs apresentou o maior valor de resistência à compressão, tendo aumentado essa propriedade em 24,5% em relação a amostra de referência. Segundo os autores, teores superiores a 0,5% de NTCs podem causar aglomeração do nanomaterial, diminuir a trabalhabilidade da mistura, aumentar a porosidade na matriz e ter um efeito negativo na resistência à compressão. Verificou-se que na temperatura de 300°C a compressão residual, em todas as amostras, aumentou. Segundo os autores, isso ocorreu porque a temperatura elevada promove a reação pozolânica da parcela de minerais ainda não reagidos no concreto ao mesmo tempo em que há um pico de produtos de hidratação do cimento ainda não reagido. Os autores destacaram ainda que, em temperatura ambiente, o tamanho dos poros na amostra de referência e no concreto com adição de NTCs é diferente. Os poros no concreto de referência são maiores e fornecem espaço para a formação de novos produtos hidratados em 300°C. Os NTCs ocupam espaço na matriz cimentícia e alteram a estrutura de poros a temperatura ambiente. Dessa forma, no concreto nanomodificado, na temperatura de 300°C, não há muito espaço para a formação de novos produtos de hidratação. A adição de NTCs inibe a reação de hidratação adicional do concreto em 300°C. Portanto, no intervalo de 300°C a 600°C a resistência residual de todas as amostras foi reduzida. Na temperatura de 600°C, os NTCs começam a falhar e os produtos de hidratação se decompõem. Em 600°C, o concreto com adição de 0,3% de NTCs apresentou o maior valor de resistência à compressão residual. Em 900°C a resistência atingiu valores mínimos e os NTCs falham completamente. Esse fato ocorreu porque o aumento da temperatura promoveu a degradação da microestrutura do concreto, incluindo desidratação, transformação de fase, retração, expansão do agregado, decomposição do C-S-H e falha do NTC.

Figura 11 – Relação entre a resistência à compressão e temperatura de concretos com 0,1% a 1% de NTCs funcionalizados



Fonte: Adaptado de Yao e Lu (2021).

A pesquisa de Viana *et al.* (2020) analisou um concreto de alto desempenho com adição de teores de 0%, 0,05% e 0,1% de NTCs submetidos ao aquecimento lento e rápido entre as temperaturas de 30-300°C, 30-450°C e 30-600°C. A dispersão foi feita com a submersão dos NTCs em isopropanol e posterior sonificação. Os autores investigaram a resistência à compressão em temperatura ambiente e residual e à tração, a fragmentação explosiva, a densidade, a perda de massa e a permeabilidade ao gás das amostras. Os resultados evidenciam que a adição dos NTCs diminuiu a ocorrência de fragmentação explosiva do concreto. Tal fato pode ser explicado devido aos NTCs criarem uma estrutura de poros que permitiu a saída de vapores sem elevar a pressão interna e funcionarem como reforço estrutural, contribuindo para um melhor comportamento à tração do concreto. Além disso, o nanomaterial melhora a ligação entre o agregado e o C-S-H que, apesar das altas temperaturas, ainda existe em quantidade reduzida.

Baloch, Khushnood e Khaliq (2018) estudaram as propriedades mecânicas residuais do concreto convencional e com adição de NTCs após exposição a altas temperaturas. Os nanotubos utilizados possuíam paredes múltiplas e foram incorporados no teor de 0,08% em relação à massa de cimento, dispersos com goma acácia e aditivo. Em relação à resistência à compressão, em temperatura ambiente, houve um aumento de 5% na propriedade do concreto

nanomodificado em relação à amostra de referência. Na temperatura de 200°C, o comportamento da amostra de controle e da amostra com NTCs foi semelhante. Nas temperaturas de 400°C, 600°C e 800°C, a perda de resistência do concreto com NTCs foi de 16%, 33% e 69%, respectivamente, enquanto as perdas da amostra de controle foram de 18%, 49% e 76%. Analisando a resistência à tração, em temperatura ambiente, a tração do concreto com NTCs aumentou 16% em relação a referência. Nas temperaturas de 200°C, 400°C, 600°C e 800°C, o concreto convencional apresentou perdas de resistências de 19%, 60%, 83% e 85%, enquanto o concreto nanomodificado apresentou reduções de 25%, 55%, 70% e 85%. Nesse estudo o concreto com NTCs apresentou melhor desempenho nas resistências residuais. Eles explicaram esse comportamento pela incorporação de NTCs aumentar a quantidade de C-S-H de alta rigidez e confinar os nanoporos do C-S-H.

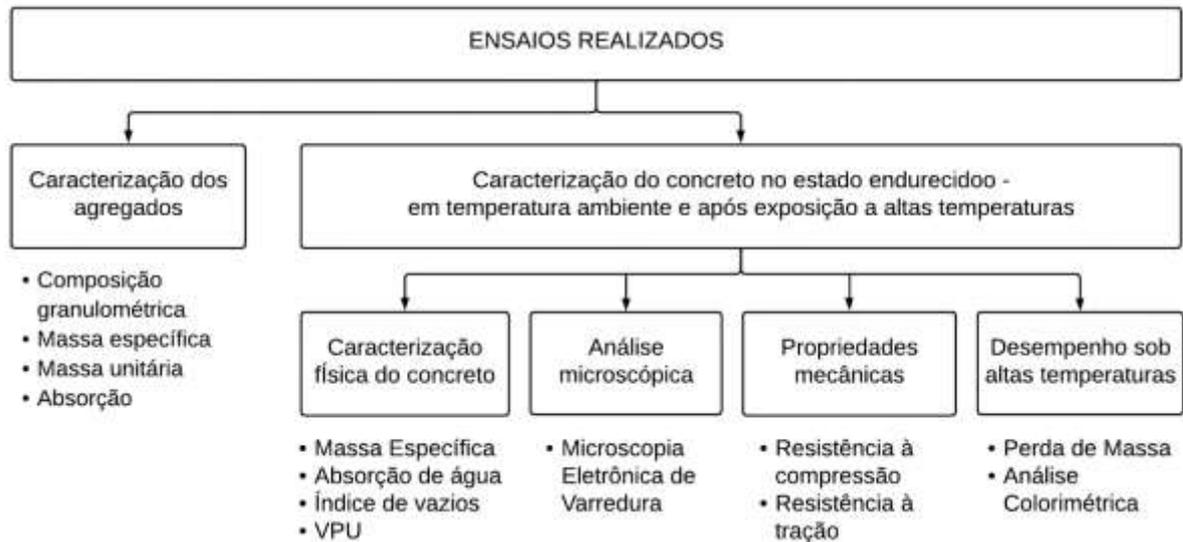
Todos esses trabalhos concluíram que a inclusão de NTCs no concreto pode melhorar suas propriedades mecânicas residuais após exposição a altas temperaturas. Entretanto, não foram encontrados trabalhos que investigassem a porosidade, absorção e velocidade de propagação de onda ultrassônica do concreto com NTCs após a exposição a temperaturas elevadas.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho abrangeu três etapas: 1) caracterização dos agregados, 2) moldagem dos corpos de prova e 3) ensaios do concreto em seu estado endurecido. Foram investigados três traços de concreto: um de referência sem adição de NTCs, que será denominado “REF”; um com adição de 0,15% de NTCs de paredes múltiplas funcionalizados com grupos carboxila, que será denominado “NTC FUN”; e um com adição de 0,15% de NTCs de paredes múltiplas não funcionalizados, que será denominado “NTC NF”.

Para investigar a microestrutura e as propriedades mecânicas dos três tipos de concreto, foram realizados os seguintes ensaios: perda de massa, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), massa específica, índice de vazios, absorção de água, velocidade de propagação de onda ultrassônica (VPU), resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral. Essas análises foram feitas antes e após a exposição às temperaturas elevadas de 300°C, 600°C, e 900°C no forno mufla. A Figura 12 apresenta o fluxograma dos ensaios que foram realizados neste trabalho.

Figura 12 - Fluxograma dos ensaios realizados na pesquisa.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

#### 3.1 MATERIAIS

Esta seção apresenta a caracterização dos materiais utilizados. Para a moldagem dos corpos de prova utilizou-se água potável proveniente da rede de abastecimento municipal da cidade de Juiz de Fora – MG.

### 3.1.1 CIMENTO PORTLAND

O cimento utilizado na produção do concreto foi do tipo CP V-ARI MAX (Alta Resistência Inicial) fabricado pela Cimento Nacional. A composição química, as propriedades físico-químicas e os resultados de resistência à compressão do cimento empregado, segundo o fabricante, são apresentados nas Tabela 3, 4 e 5, respectivamente.

Tabela 3 - Composição química do cimento CP V -ARI MAX

<b>Substância</b>	<b>Concentração (% em massa)</b>
Silicato tricálcico	20-70
Silicato dicálcico	10-60
Ferro-aluminato de cálcio	5-15
Sulfato de cálcio	2-8
Aluminato tricálcico	1-15
Carbonato de cálcio	0-25
Óxido de magnésio (livre)	0-6
Óxido de cálcio (livre)	0-2

Fonte: Cimento Nacional (2018).

Tabela 4 - Propriedades Físico-Químicas do cimento CP V– ARI MAX

<b>Característica</b>	<b>Valor/Qualidade</b>
Estado físico	Sólido
Forma	Pó
Cor	Cinza
Odor	Característico
Ph	13
Massa específica aparente	1,2 g/cm <sup>2</sup>
Densidade	2,99 g/cm <sup>3</sup>
Solubilidade em ácido clorídrico	99%l
Solubilidade em água	1,5 g/l

Fonte: Cimento Nacional (2018).

Tabela 5 - Resistência à compressão do Cimento CPV -ARI MAX segundo a NBR 7215

<b>Idade</b>	<b>Resistência à Compressão</b>
1 dia	19 MPa
3 dias	35 MPa
7 dias	44 MPa
28 dias	51 MPa

Fonte: Cimento Nacional (2018).

### 3.1.2 NANOTUBOS DE CARBONO (NTCS)

Para a realização desta pesquisa, utilizou-se dois tipos de nanotubos: NTCs funcionalizados (NTC FUN) e NTCs não funcionalizados (NTC NF). Os NTC FUN foram adquiridos da empresa brasileira Nano View Nanotecnologia (Figura 13). Eles foram funcionalizados com grupos carboxila (-COOH) por meio de tratamento ácido (funcionalização covalente). Suas propriedades físicas estão apresentadas na Tabela 6. Os NTC NF utilizados nesta pesquisa (Figura 13) são provenientes da empresa Metal Working da China. Suas propriedades físicas estão apresentadas na Tabela 7. Um dos parâmetros apresentados é o fator de forma, definido pela razão entre o comprimento (L) e o diâmetro (d) do NTC. Segundo Melo (2009), espera-se que quanto maior for o comprimento do nanomaterial, melhor a conexão com as partículas de cimento. Em contrapartida, NTCs com fatores de forma elevados podem ter sua dispersão prejudicada na matriz cimentícia (BATISTONA, GLEIZEA, *et al.*, 2020). Tal fato pode prejudicar potencialmente a trabalhabilidade e a resistência mecânica do concreto (BATISTONA, GLEIZEA, *et al.*, 2020).

Tabela 6 - Propriedades dos NTCs funcionalizados (NTC FUN)

<b>Propriedade</b>	<b>Valor/Qualidade</b>
Pureza	>95%
Diâmetro externo	10 – 30 nm
Comprimento	1 – 10 $\mu\text{m}$
Área de superfície específica	250 – 270 $\text{m}^2/\text{g}$
Grau de Funcionalização	9%
Densidade	1,4 $\text{g}/\text{cm}^3$
Cor	Preto
Fator de forma (L/d)	100-333,34

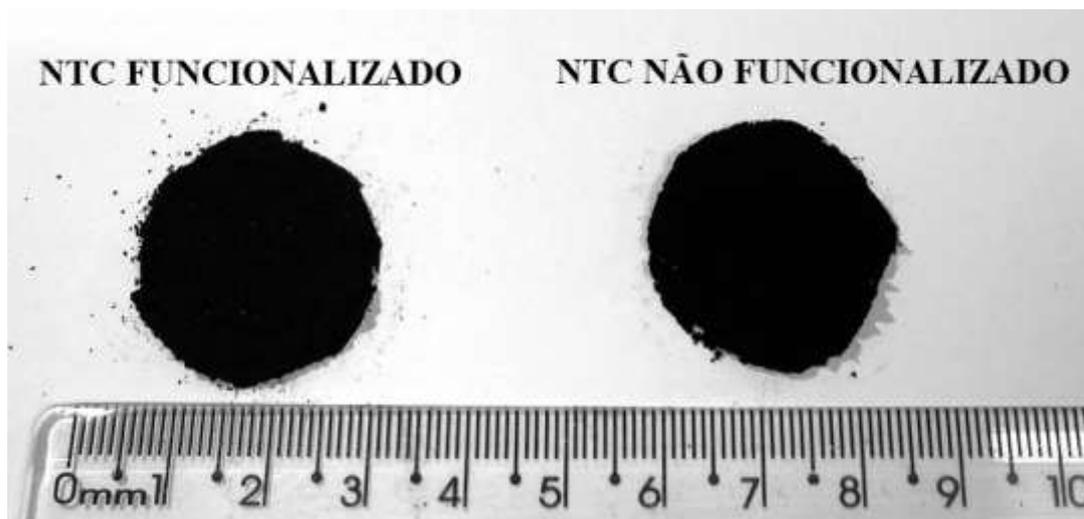
Fonte: Ficha Técnica Nano View Nanotecnologia (2022).

Tabela 7 – Propriedades dos NTCs não funcionalizados (NTC NF)

<b>Propriedade</b>	<b>Valor/Qualidade</b>
Pureza	>97%
Diâmetro externo	3 – 15 nm
Comprimento	15 – 30 $\mu\text{m}$
Área de superfície específica	250 – 270 $\text{m}^2/\text{g}$
Densidade	0,06 – 0,09 $\text{g}/\text{cm}^3$
Cor	Preto
Fator de Forma (L/d)	5000-2000

Fonte: Ficha técnica Metal Working (2023).

Figura 13 – NTCs utilizados na pesquisa: a) NTC funcionalizado; b) NTC não funcionalizado



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

### 3.1.3 AGREGADOS

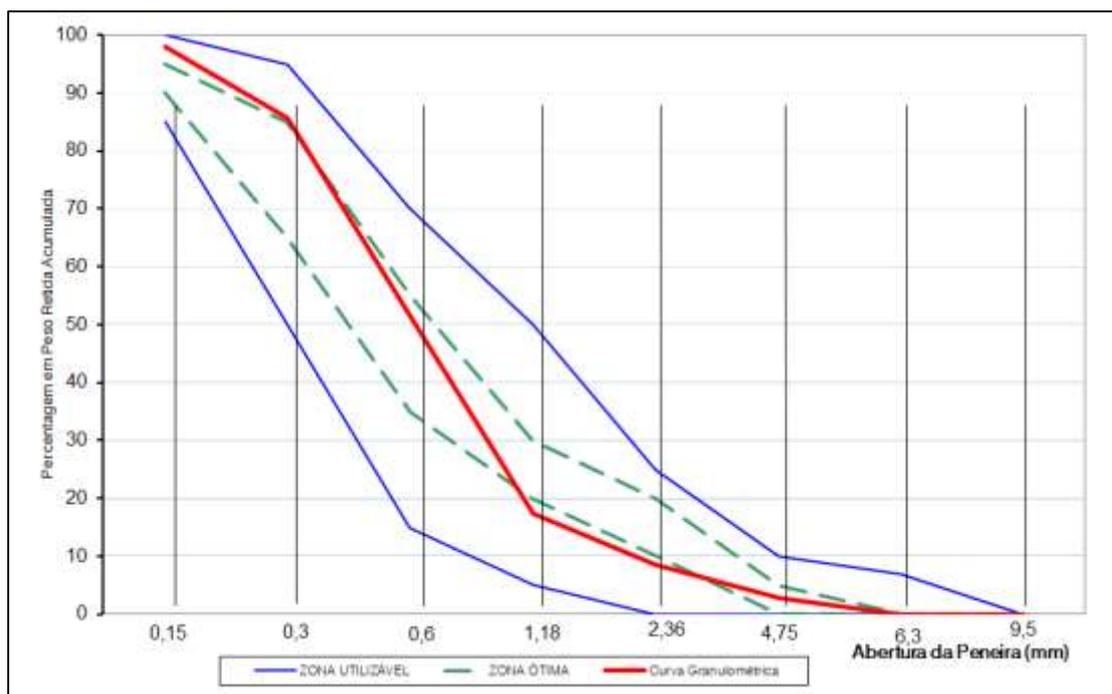
Para a confecção dos concretos utilizou-se areia natural com origem no Rio Preto como agregado miúdo. A análise granulométrica e os resultados dos ensaios de caracterização física da areia natural estão apresentados na Tabela 8. A curva granulométrica é apresentada na Figura 14. As propriedades físicas estão dentro do esperado para agregados convencionais e a curva granulométrica está dentro da zona utilizável estabelecida pela NBR 7211 (2009).

Tabela 8 – Caracterização da areia natural

<b>Análise Granulométrica</b>		
Peneiras (mm)	% Retida	% Acumulada
4,8	2,88	3
2,4	5,74	9
1,2	8,74	17
0,6	34,26	52
0,3	34,03	86
0,15	12,28	98
Fundo	2,06	100
<b>Propriedades Físicas</b>		
Módulo de Finura	2,64	
Dimensão Máxima Característica (mm)	4,80	
Massa Específica Real (g/cm <sup>3</sup> )	2,597	
Massa Unitária (g/cm <sup>3</sup> )	1,526	
Teor de Material Pulverulento (%)	1,92	

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 14 - Granulometria da areia natural



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Como agregado graúdo, utilizou-se brita 0, originada de rochas basálticas e proveniente de Campinas em São Paulo da Quibrita Mineradora. A análise granulométrica e os resultados dos ensaios de caracterização física da brita 0 estão apresentados na Tabela 9. A curva granulométrica é apresentada na Figura 15.

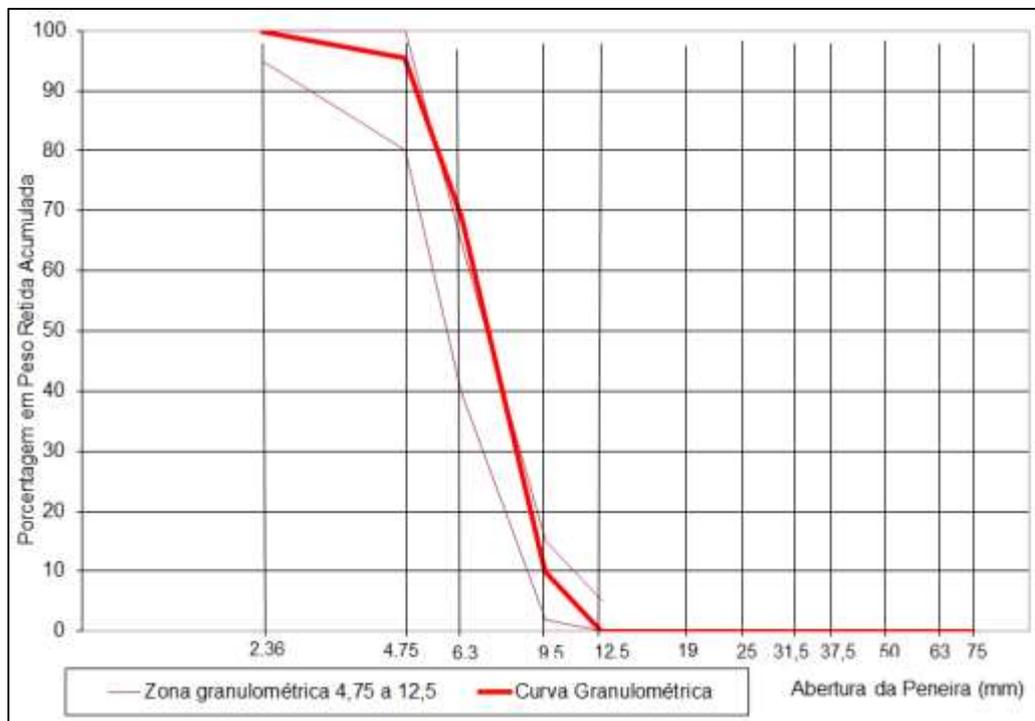
Tabela 9 - Caracterização brita 0

<b>Análise Granulométrica</b>		
Peneiras (mm)	% Retida	% Acumulada
19	-	-
12,5	-	-
9,5	9,96	10
6,3	58,97	69
4,8	26,51	95
2,4	4,33	100
1,2	0,00	100
0,6	0,00	100
0,3	0,00	100
0,15	0,00	100
Fundo	0,23	100

<b>Propriedades Físicas</b>	
Módulo de Finura	6,04
Dimensão Máxima Característica (mm)	9,50
Massa Específica Real (g/cm <sup>3</sup> )	2,789
Massa Unitária (g/cm <sup>3</sup> )	1,428
Teor de Material Pulverulento (%)	0,25
Absorção (%)	0,6

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 15 - Curva granulométrica brita 0



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

### 3.1.4 ADIÇÕES E ADITIVOS

Como adição ao concreto, foi utilizada sílica ativa da marca Tecnosil. As características físicas e químicas do material estão apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 – Características físicas e químicas da sílica ativa

<b>Propriedade</b>	<b>Valor/Qualidade</b>
Massa Específica	2220 Kg/m <sup>3</sup>
Teor de SiO <sub>2</sub>	>90%
Superfície Específica	~19.000 m <sup>2</sup> /Kg
Formato da partícula	Esférico

<b>Propriedade</b>	<b>Valor/Qualidade</b>
Diâmetro médio da partícula	0,2 $\mu$ m
Massa unitária não densificado	<350 kg/m <sup>3</sup>
Massa unitária – densificado	>350 Kg/m <sup>3</sup>

Fonte: Tecnosil (2023).

Para dispersão dos NTCs e trabalhabilidade da matriz, foram utilizados os aditivos Sikament RM-300, aditivo plastificante de pega normal com alto desempenho, e Sika ViscoCrete 3535 CB, aditivo superplastificante de terceira geração. A Tabela 11 apresenta as principais características dos aditivos, segundo o fabricante.

Tabela 11 - Principais características dos aditivos

<b>Característica</b>	<b>Sikament RM-300 (plastificante)</b>	<b>Sika ViscoCrete 3535CB (superplastificante)</b>
Composição básica	Combinação de dispersantes orgânicos em base aquosa	Solução de policarboxilato em meio aquoso
Densidade	1,18 $\pm$ 0,02 Kg/L	1,08 $\pm$ 0,02Kg/L
pH	6,0 $\pm$ 1,0	5,0 $\pm$ 1,0
Dosagem recomendada	0,3 a 1,6% em relação ao peso de aglomerantes	1,0 a 1,5% em relação ao peso de aglomerantes

Fonte: Sika (2019); Sika (2014).

## 3.2 DOSAGEM E MOLDAGEM DOS CONCRETOS

### 3.2.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Para a presente pesquisa foi utilizado um concreto, de classe 50, cujo traço já foi elaborado e empregado previamente por pesquisadores(as) do Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Os traços utilizados são apresentados na Tabela 12. O consumo de cimento adotado foi de 545 Kg/m<sup>3</sup>.

Tabela 12 - Traços utilizados na pesquisa

	<b>Cimento</b>	<b>Areia Natural</b>	<b>Brita 0</b>	<b>Fator a/c</b>	<b>Aditivo plastificante (%)</b>	<b>Aditivo superplastif. (%)</b>	<b>Sílica Ativa (%)</b>	<b>NTC (%)</b>
Referência - REF	1	1,175	1,819	0,4	0,2	0,25	12	0
NTCs funcionalizados – NTC FUN	1	1,175	1,819	0,4	0,2	0,5	12	0,15
NTCs não funcionalizados – NTC NF	1	1,175	1,819	0,4	0,2	0,7	12	0,15

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Para a realização dos ensaios descritos nas próximas seções, foram moldados 108 corpos de prova cilíndricos de 5cm de diâmetro e 10cm de altura, sendo 36 sem adição de NTCs (REF), 36 com adição de NTCs funcionalizados (NTC FUN) e 36 com adição de NTCs não funcionalizados (NTC NF). Foram feitas 3 repetições/corpos de prova para cada ensaio. De acordo com a pesquisa de Azevedo *et al.* (2020), dentro das características do presente trabalho, é viável a utilização de corpos de prova cilíndricos de 5x10cm ao invés de corpos de 10x20cm para os ensaios de resistência à compressão. Essa redução da dimensão dos corpos de prova foi fundamental para a execução deste trabalho dentro dos recursos financeiros disponíveis.

### 3.2.2 MISTURA DOS MATERIAIS

A mistura do concreto de referência (REF) foi realizada da seguinte forma: em uma bandeja foram misturados os agregados graúdos e miúdos manualmente; depois foi acrescentada a sílica ativa, o cimento e, novamente, foi realizada a mistura manual dos materiais secos. A mistura homogeneizada foi colocada na argamassadeira, conforme apresentado na Figura 16. Foi adicionada metade da água do traço e realizada a mistura mecânica por 90 segundos. Por fim, foram adicionados o restante da água, os aditivos e, novamente, foi realizada a mistura mecânica por 120 segundos.

Figura 16 - Materiais da mistura do concreto na argamassadeira.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Para os concretos com NTCs (NTC FUN e NTC NF), primeiro foi realizada a dispersão no nanomaterial na água. Em um recipiente, foram colocados metade da água do traço, com

0,1% de aditivo policarboxilato e os NTCs (Figura 17). Essa solução foi agitada, manualmente, por 2 minutos. Posteriormente, a solução foi sonificada por 2h no homogeneizador ultrassônico da Biologics-Inc (modelo 3000MP), no Departamento de Física da UFJF (Figura 17).

As misturas com NTCs foram feitas da seguinte forma: os agregados graúdos, miúdos, a sílica ativa e o cimento foram misturados a seco, manualmente, e colocados na argamassadeira. Foi adicionada metade da água do traço e realizada a mistura mecânica por 90 segundos. Posteriormente, acrescentou-se a solução aquosa com NTCs e os aditivos. Por fim, foi realizada, novamente, a mistura mecânica por 120 segundos.

Figura 17 – a) Solução com água, aditivo policarboxilato e NTCs b) Solução aquosa com NTCs no homogeneizador ultrassônico



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

### 3.2.3 MOLDAGEM, CURA E RETIFICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

O concreto foi colocado nos moldes previamente lubrificados com desmoldante em quatro camadas de volume aproximadamente igual e o adensamento foi feito manualmente, utilizando-se a haste metálica. Foram dados 30 golpes em cada camada, distribuídos uniformemente em toda a seção transversal do molde. Posteriormente, foi feito o rasamento da superfície e os corpos de prova foram levados para a câmara úmida para a cura inicial (Figura 18). Após 72 horas, eles foram retirados dos moldes e imersos em um balde com água onde permaneceram até a idade dos ensaios (Figura 19).

Figura 18 – Cura Inicial dos corpos de prova



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 19 – Corpos de prova imersos



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Para realização dos ensaios mecânicos, os corpos de prova foram retificados a fim de tornar a superfície plana com a retificadora de corpos de prova automática I-3064 da marca Contenco.

### 3.2.4 EXPOSIÇÃO TÉRMICA

A exposição térmica ocorreu em um forno mufla para laboratório da marca Up Brasil no qual os corpos de prova, depois de 28 dias de idade e previamente secos ao ar, foram introduzidos, conforme Figura 20, e submetidos às temperaturas de 300°C, 600°C ou 900°C. Essas temperaturas foram adotadas com o objetivo de analisar as diferenças no comportamento do concreto com e sem NTCs (e com os diferentes NTCs). A taxa de variação de temperatura adotada foi de 0,5°C/min e o tempo de exposição após o atingimento da temperatura máxima foi de 60 minutos, conforme recomendações da RILEM TC 129-MHT (2000). Após a exposição, os corpos de prova permaneceram dentro da mufla até atingirem a temperatura ambiente. Posteriormente, foram retirados e submetidos aos ensaios para determinação das propriedades residuais.

Figura 20- Corpos de prova dentro da mufla



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

A NBR 14432 (2001) especifica o tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) que cada tipo de edificação deve possuir. O período varia de 30 a 120 minutos para que haja evacuação total do local, garantindo a segurança dos usuários.

### 3.3 ENSAIOS REALIZADOS

#### 3.3.1 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Os fragmentos dos corpos de prova foram submetidos ao ensaio de Microscopia eletrônica de varredura (MEV). As micrografias por MEV são geradas pela interação de um feixe de elétrons incidido sobre a amostra. Este ensaio foi realizado com a finalidade de investigar a dispersão dos NTCs na matriz cimentícia. Devido à intenção de repetição de alguns ensaios, as micrografias foram feitas no Laboratório NanoLab da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) no equipamento TESCAN VEGA 3 e no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura e Transmissão do Instituto Militar de Engenharia (IME) no equipamento Quanta FEG 250 - FEI. Para a realização do ensaio na UFOP, o fragmento de concreto foi embutido em moldes circulares com resina e posteriormente, lixados. Antes das amostras serem colocadas no equipamento foram cobertas por uma camada fina de ouro. Para a realização do ensaio no IME, os fragmentos de concreto foram colocados no equipamento sem embutimento ou lixamento e cobertas com uma camada fina de carbono.

#### 3.3.2 DETERMINAÇÃO DE MASSA ESPECÍFICA ABSORÇÃO E ÍNDICE DE VAZIOS

Para realização deste ensaio, os corpos de prova foram retirados da água, pesados submersos, saturados com superfície seca e após a secagem conforme NBR 9778 (2005). A massa específica da amostra seca, a absorção e o índice de vazios foram calculados, respectivamente, a partir das Equações 1, 2 e 3.

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \quad (1)$$

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (2)$$

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad (3)$$

Sendo:

$\rho_s$  a massa específica da amostra seca expressa em gramas por centímetro cúbico ( $\text{g/cm}^3$ );

A a absorção em porcentagem (%);

$I_v$  o índice de vazios em porcentagem (%);

$m_s$  a massa seca em gramas (g);

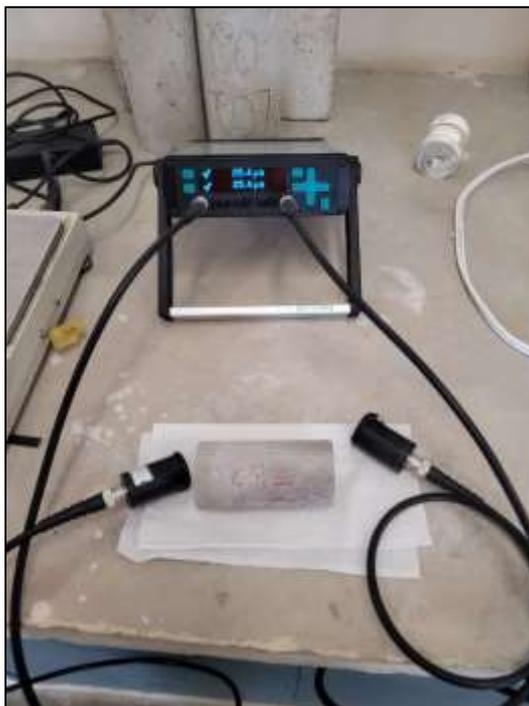
$m_{sat}$  a massa da amostra saturada em água em gramas (g) e

$m_i$  a massa da amostra saturada imersa em água em gramas (g).

### 3.3.3 ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDA ULTRASSÔNICA (VPU)

Os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica (ou velocidade de pulso ultrassônico – VPU) de acordo com a NBR 8802 (2019). O ensaio consiste em aplicar fina camada de gel acoplante nas faces dos transdutores e posicioná-los nas faces opostas dos corpos de prova (transmissão direta) (Figura 21). O ensaio foi realizado no equipamento Pundit Lab da Proceq.

Figura 21 - Ensaio de ultrassom



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Segundo Mendes *et al.* (2020), as características físico-químicas dos agregados miúdos, a densidade e o sistema de poros da matriz tem grande influencia na velocidade de propagação de onda ultrassônica. Como as ondas se propagam em meio sólido, a reflexão e refração que elas sofrem quando interagem com o ar, agregados e produtos de hidratação interferem nesse

parâmetro (MENDES, BARRETO, *et al.*, 2020). Potanto, quanto maior a quantidade de poros ou interfaces entre os componentes da matriz, menor será a velocidade de propagação de onda ultrassônica (MENDES, BARRETO, *et al.*, 2020).

### 3.3.4 DETERMINAÇÃO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão conforme NBR 5739 (2018). A Figura 22 mostra a realização do ensaio.

Figura 22 - Ensaio de resistência à compressão



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

### 3.3.5 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral conforme a NBR 7222 (2011). A Figura 23 mostra a realização do ensaio.

Figura 23 – Ensaio de resistência à tração por compressão diametral



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

### **3.3.6 PERDA DE MASSA**

A perda de massa, em porcentagem, foi determinada a partir da pesagem dos corpos de prova em temperatura ambiente e após a exposição a 300°C, 600°C e 900°C. A pesagem foi feita em uma balança da marca Marte, com carga máxima 5kg e precisão 0,1g. Para a primeira pesagem, os corpos de prova foram retirados da câmara úmida e secos ao ar por 3 dias.

### **3.3.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA**

Os dados desta pesquisa foram analisados pelo método estatístico de Análise de Variância com um fator (one-way ANOVA), utilizando-se o programa Jamovi.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados os resultados e as análises dos ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV), massa específica, índice de vazios, absorção, ultrassom, resistência à compressão e à tração, perda de massa e análise visual do concreto, para os concretos convencionais (REF), com NTCs funcionalizados (NTC FUN) e com NTCs não funcionalizados (NTC NF).

### 4.1 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A Figura 24 apresenta as imagens do concreto com adição de NTCs funcionalizados e não funcionalizados em temperatura ambiente feitas na UFOP. Como pode ser observado na Figura 24a, os NTCs funcionalizados não foram encontrados na amostra do traço NTC FUN. Tal fato evidencia que os NTCs não foram bem dispersos no concreto e ficaram concentrados em algumas regiões. Na Figura 24b, os NTCs não funcionalizados foram encontrados ocupando faixas da amostra de concreto NTC NF.

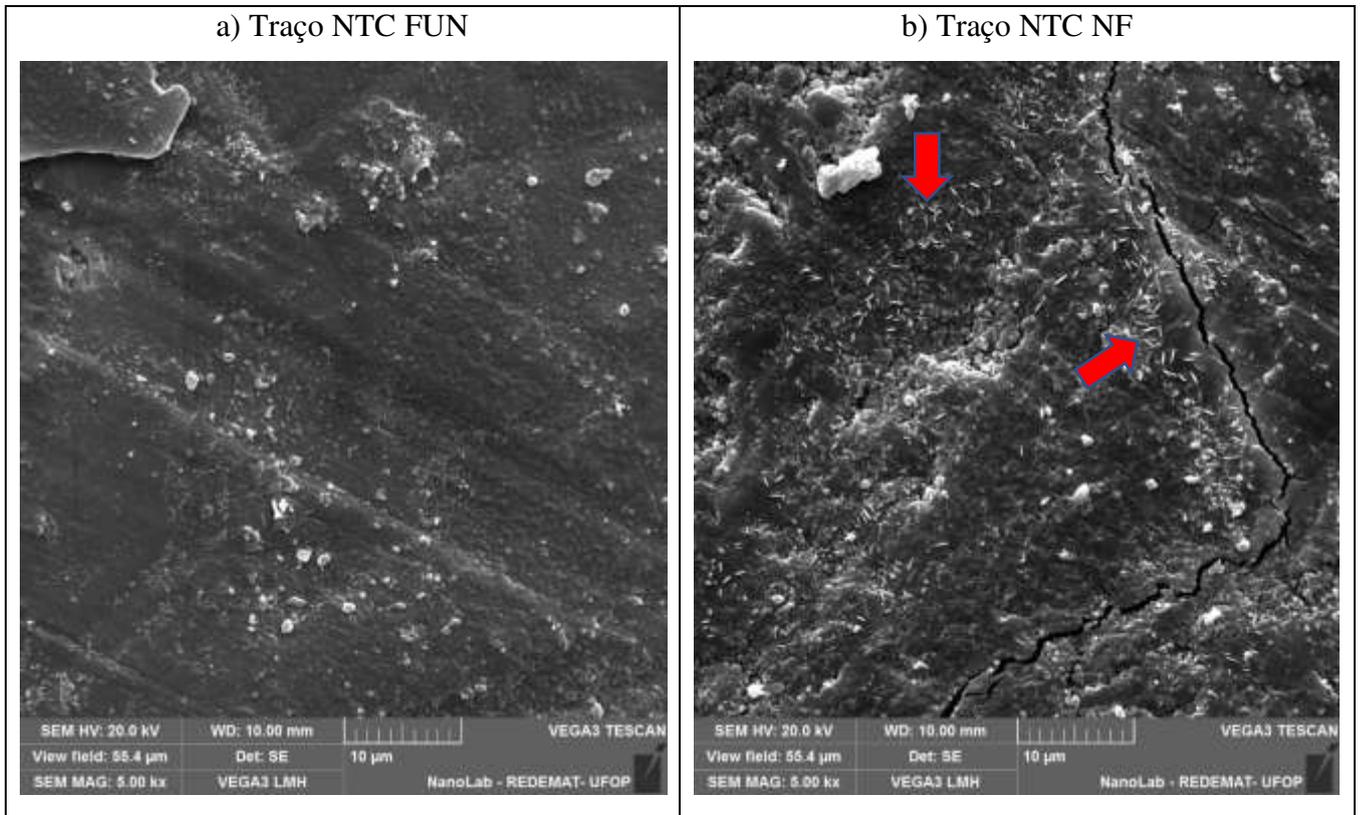
Devido à dificuldade de encontrar os NTCs, os ensaios também foram realizados no Instituto Militar de Engenharia (IME) com outros fragmentos de concreto (Figura 25). Na Figura 25a é possível observar os NTCs funcionalizados na amostra NTC FUN em temperatura ambiente. Observa-se que alguns NTCs ficaram concentrados e não tiveram boa dispersão na matriz cimentícia. Na Figura 25b foi encontrado apenas um NTC não funcionalizado na amostra NTC NF.

Os MEVs feitos em ambas as instituições evidenciam que algumas regiões do concreto ficaram sem NTCs e que não houve uma boa homogeneidade do nanomaterial no concreto. Isso ocorreu apesar de terem sido seguidos os processos de dispersão mais indicados pela literatura (HAWREEN, BOGAS e KURDA, 2019), (YAO e LU, 2021), (MOHSEN, TAHA, *et al.*, 2017), (KONSTA-GDOUTOS, DANOGLIDIS e SHAH, 2019) e (GLEIZE e SILVESTRO, 2020).

Estudos como os de Mohsen *et al.* (2017) e Yao e Lu (2021) utilizaram processos de dispersão similares a este trabalho e com algumas concentrações de NTCs também não alcançaram uma boa dispersão do nanomaterial no concreto. Assim, observa-se que a dispersão dos NTCs ainda é um desafio para o emprego do nanomaterial em matrizes cimentícias.

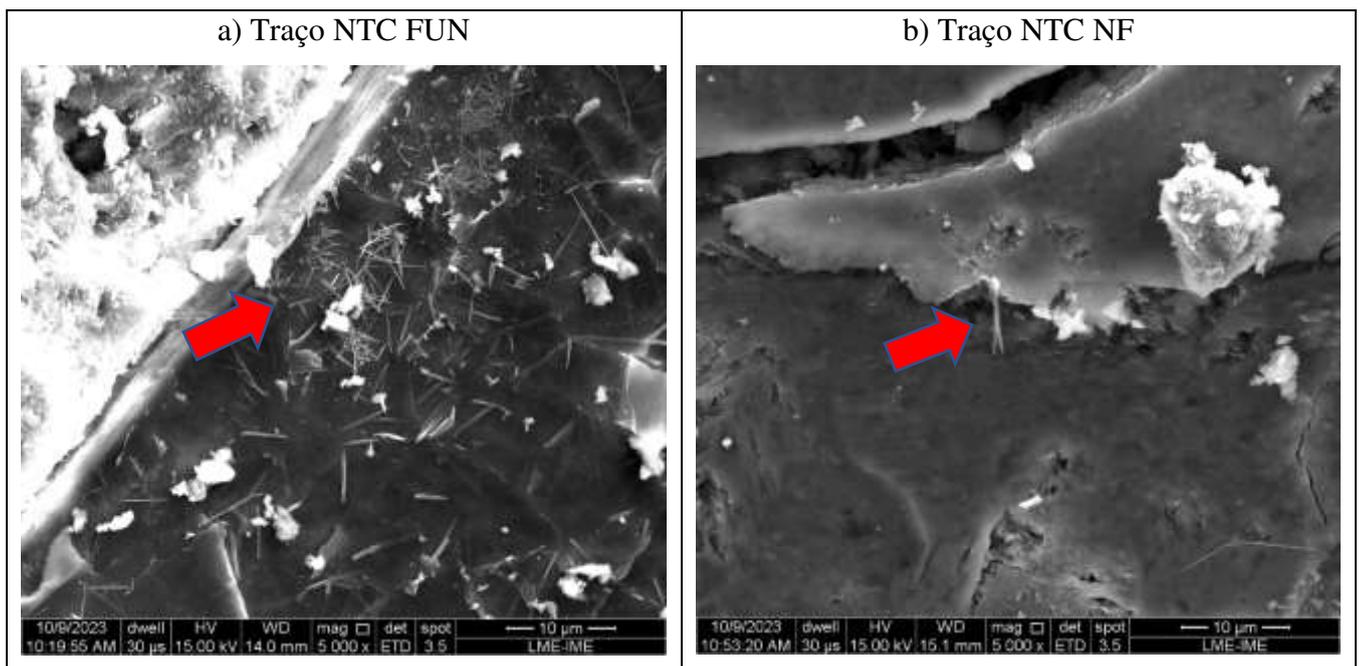
Com as imagens obtidas, não foram identificadas diferenças significativas na dispersão dos NTCs funcionalizados e não funcionalizados no concreto.

Figura 24 – MEV temperatura ambiente (UFOP), magnificação de 5.000x: a) traço NTC FUN; b) traço NTC NF



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

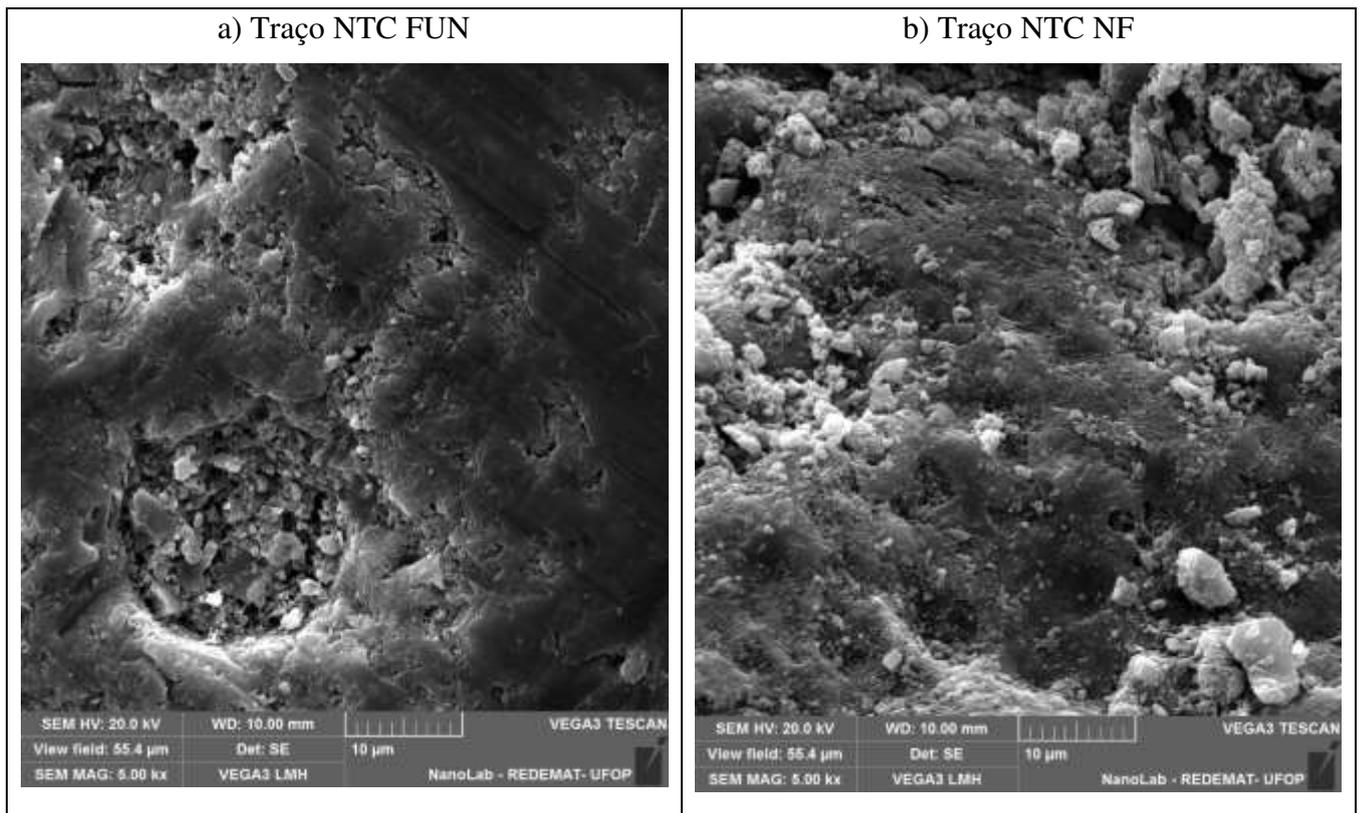
Figura 25 – MEV temperatura ambiente (IME), magnificação de 5.000x: a) traço NTC FUN; b) traço NTC NF



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

A Figura 26 apresenta as imagens dos traços NTC FUN e NTC NF após a exposição a 300°C feitas na UFOP. Nos dois traços analisados é possível observar a degradação do concreto com o aumento dos vazios. Entretanto, os NTCs não foram encontrados nas amostras analisadas, o que novamente evidencia a má distribuição dos NTCs no concreto.

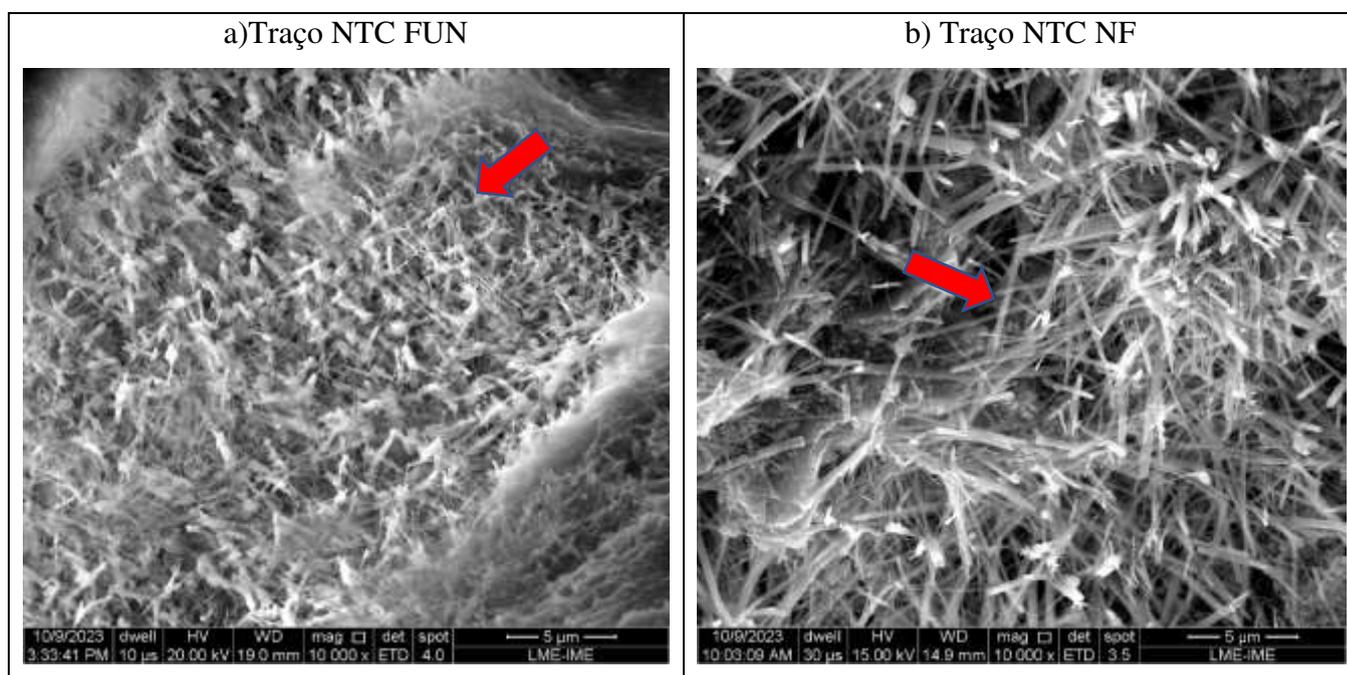
Figura 26 - MEV temperatura de 300°C (UFOP), magnificação de 5.000x: a) traço NTC FUN; b) traço NTC NF



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

A Figura 27 apresenta as imagens do concreto com adição de NTCs funcionalizados e não funcionalizados após a exposição a 300°C feitas no IME. Nas duas amostras, os NTCs foram encontrados aglomerados, mostrando a má dispersão do nanomaterial no concreto. Observa-se, na Figura 27a, um emaranhado entre os NTCs e elementos da pasta de cimento.

Figura 27 - MEV temperatura de 300°C (IME), magnificação de 10.000x: a) traço NTC FUN; b) traço NTC NF

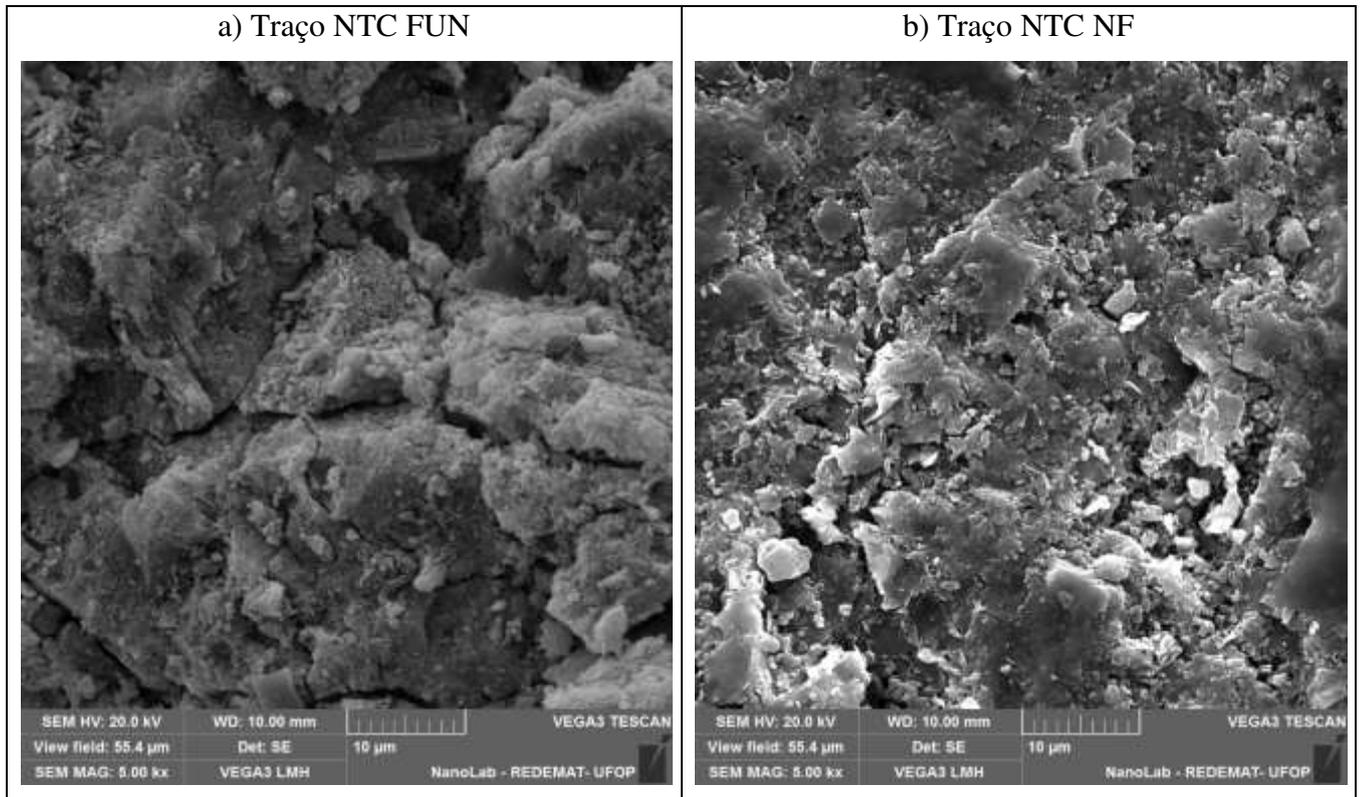


Fonte: Elaborado pela autora (2023).

As Figura 28 e 29 mostram a MEV dos concretos com NTCs submetidos a 600°C feitas na UFOP e no IME, respectivamente. Nas imagens feitas pelo IME é possível observar a presença de um NTC que ainda não foi decomposto pelo aumento da temperatura.

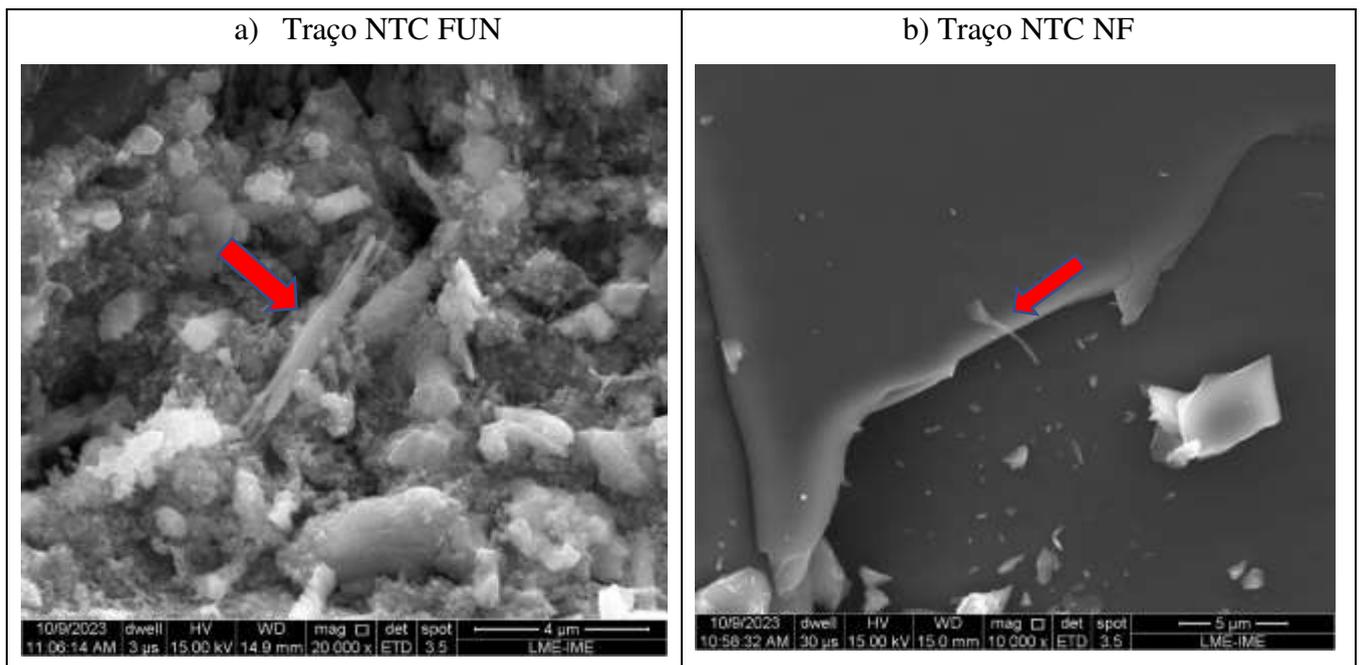
As imagens de MEV também foram feitas após a exposição a temperatura de 900°C. Entretanto, em nenhuma delas foram encontrados os NTCs. Tal fato era esperado, uma vez que a temperatura de degradação dos NTCs é de cerca de 600°C (GLEIZE e SILVESTRO, 2020). A Figura 30 apresenta a imagens dos traços com adição de NTCs após a exposição 900°C. Nessas imagens é possível observar a degradação do concreto submetido a temperaturas elevadas com o aumento da porosidade e decomposição dos produtos de hidratação.

Figura 28 - MEV temperatura de 600°C (UFOP), magnificação de 5.000x: a) traço NTC FUN; b) traço NTC NF



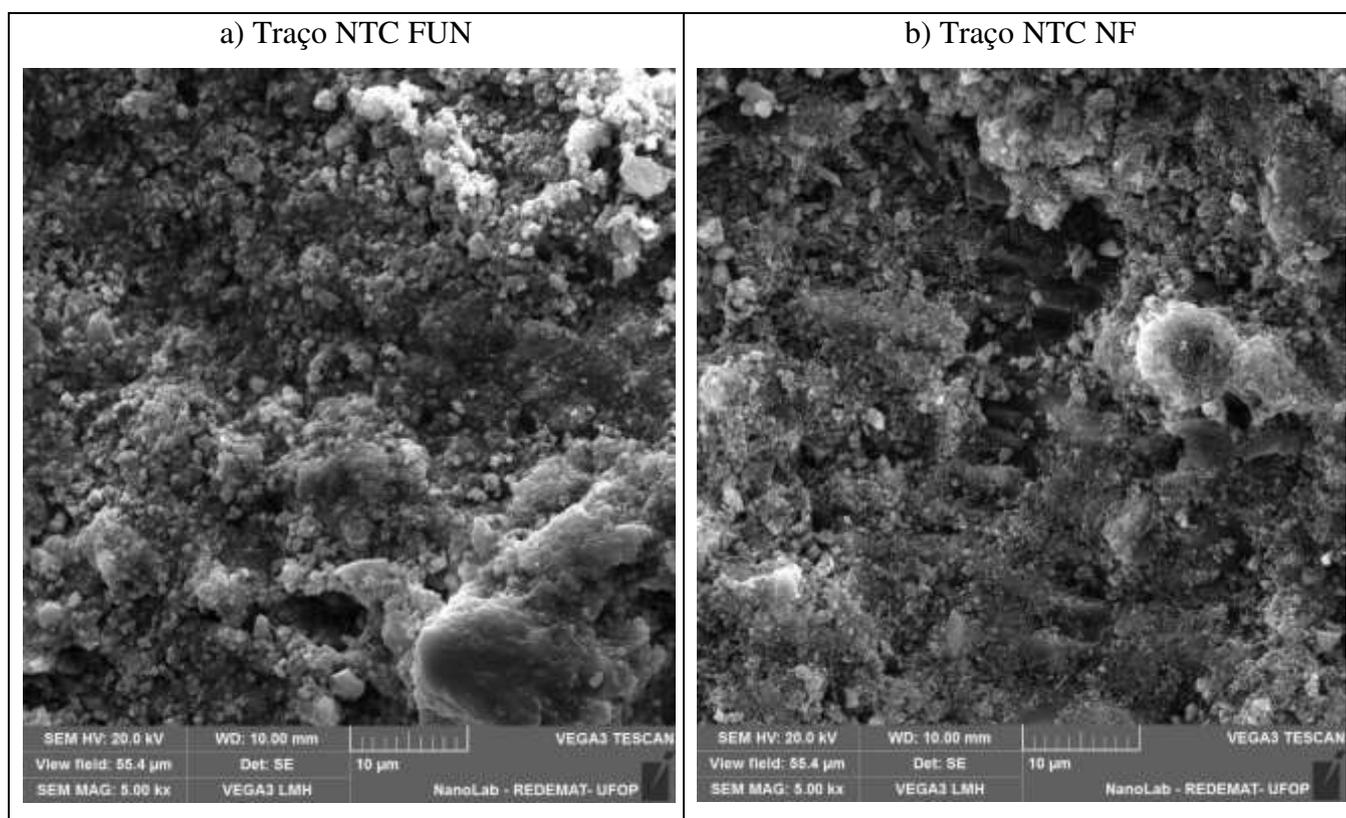
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 29 - MEV temperatura de 600°C (IME): a) traço NTC FUN, magnificação de 20.000x; b) traço NTC NF, magnificação de 15.000x



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 30 - MEV temperatura de 900°C (UFOP), magnificação de 5.000x: a) traço NTC FUN; b) traço NTC NF



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

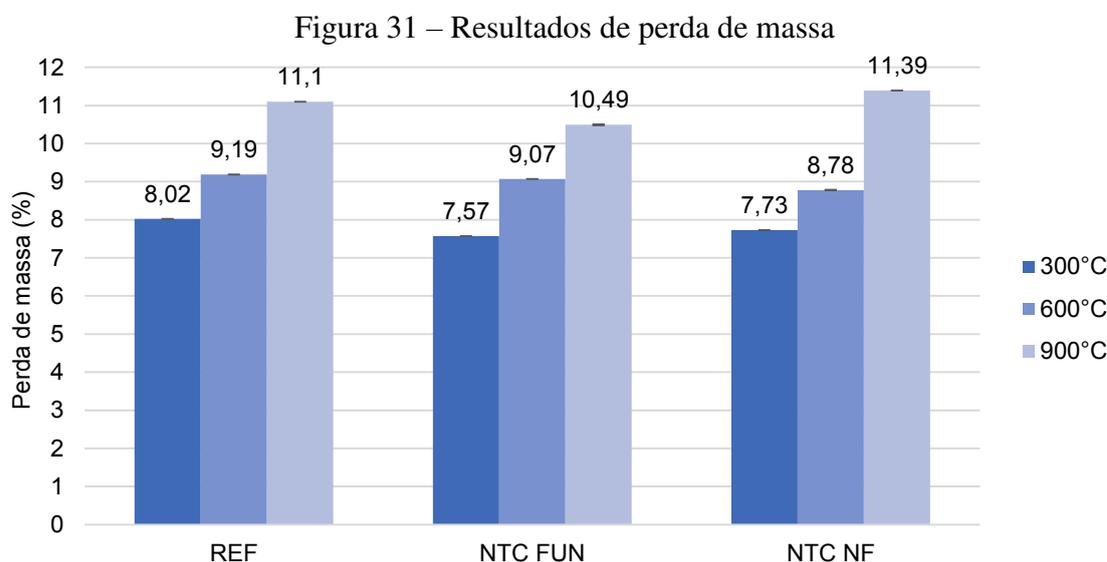
## 4.2 PERDA DE MASSA

Os resultados de perda de massa são mostrados na Figura 31. Considerando a temperatura de 300°C, as análises estatísticas indicam que não há diferença entre os valores dos traços NTC FUN e NTC NF. O maior valor médio de perda de massa foi apresentado pelo traço REF (8,02%). Nessa temperatura, a perda de massa está relacionada ao aumento da porosidade do concreto devido à perda de água livre e adsorvida decorrente do aquecimento (RIBEIRO e TUTIKIAN, 2018).

Na temperatura de 600°C, as análises estatísticas indicam que não há diferença entre os traços NTC FUN e NTC NF. O traço REF apresentou, novamente, o maior valor de perda de massa (9,19%). Nessa temperatura, a perda de massa provavelmente se deu devido à decomposição do hidróxido de cálcio e à evaporação da água quimicamente combinada aos silicatos de cálcio hidratados (LIMA, 2005).

Para a temperatura de 900°C, o traço NTC FUN (10,49%) apresentou uma redução de 5% na perda de massa em relação a mistura de REF (11,10%). Em contrapartida, a amostra NTC NF apresentou aumento de 1,8% na perda de massa em relação ao traço REF. Foi observada uma diferença entre os traços NTC FUN e NTC NF de cerca de 8%, com o NTC NF apresentando o

pior resultado. Nessa temperatura, a perda de massa provavelmente se deu devido à perda de água quimicamente combinada com os produtos de hidratação do cimento (RIBEIRO e TUTIKIAN, 2018) e à perda da camada superficial do concreto (fragmentação explosiva) ocasionada pelas pressões internas geradas pelo aquecimento (VIANA, BACELAR, *et al.*, 2020).



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Quanto à perda de massa de concretos contendo adição de NTCs após a exposição a temperaturas elevadas, Viana *et al.* (2020), estudando concretos com adição de 0,1% de NTCs, constaram perdas médias de cerca de 3% a 300°C, 3,5% a 600°C e 5,5% a 900°C para o concreto nanomodificado, valores inferiores aos obtidos nesta pesquisa. Os valores de perda de massa do concreto de referência foram próximos ao do concreto com adição de NTCs, como neste trabalho. O concreto moldado pelos autores era de 100 MPa e as perdas da amostra de controle foram de cerca de 3% a 300°C, 3% a 600°C e 5% a 900°C.

Em contrapartida, Baloch, Khushnood e Khaliq (2018) constataram valores maiores de perda de massa para concretos classe 25 com adição de 0,08% de NTCs, sendo cerca de 3% a 200°C, 4% a 400°C, 9% a 600°C e 14% a 800°C. Os resultados de perda de massa a 600°C e 900°C estão próximos aos obtidos neste trabalho. O concreto de referência apresentou perdas de cerca de 3% a 200°C, 5% a 400°C, 9% a 600°C e 13% a 800°C. Novamente os valores de perda de massa do concreto de referência foram próximos ao do concreto com adição de NTCs.

#### 4.3 MASSA ESPECÍFICA, ÍNDICE DE VAZIOS E ABSORÇÃO DE ÁGUA

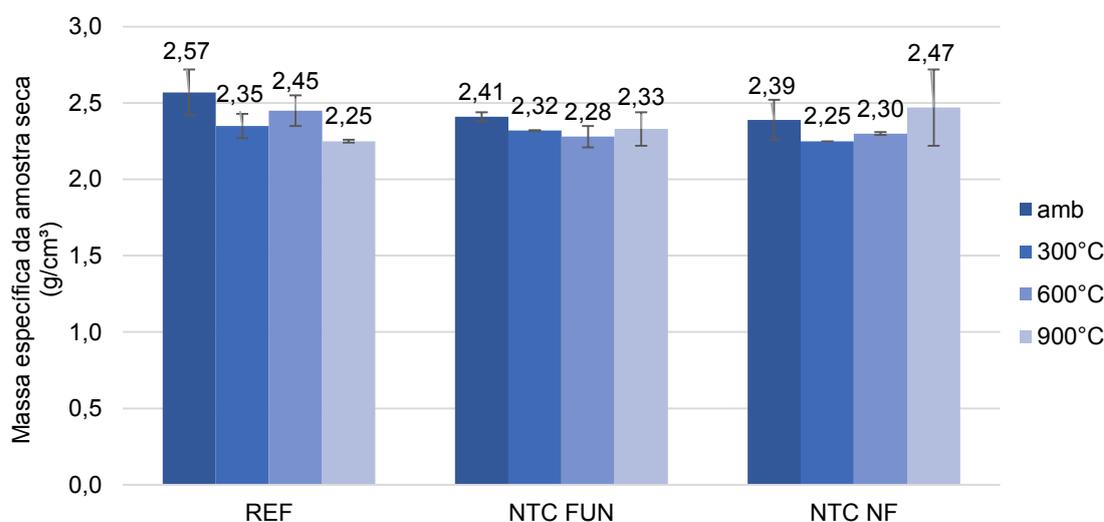
Na Figura 32 é possível observar os resultados de massa específica da amostra seca. Na temperatura ambiente, as análises estatísticas indicam que não há diferença entre os traços NTC

FUN e NTC NF. O traço REF apresentou o maior valor de massa específica ( $2,57 \text{ g/cm}^3$ ). Em contrapartida, o estudo de Pinto (2022) não verificou diferenças significativas para os resultados de massa específica em temperatura ambiente no concreto com adição de 0,1% de NTCs. O estudo de Viana *et al.* (2020) também não verificou diferenças significativas para essa propriedade no concreto com adição de 0,1% de NTCs após a exposição as temperaturas de  $300^\circ\text{C}$ ,  $450^\circ\text{C}$  e  $600^\circ\text{C}$ .

Na temperatura de  $300^\circ\text{C}$ , as análises estatísticas indicam que não há diferença entre os três traços analisados. Após a exposição a  $600^\circ\text{C}$ , o maior valor de massa específica foi observado pela amostra REF ( $2,45 \text{ g/cm}^3$ ) e não há diferença entre os valores dos traços com adição de NTCs. Na temperatura de  $900^\circ\text{C}$ , novamente, as análises estatísticas indicam que não há diferença entre todos os traços analisados.

Para todas as temperaturas estudadas não se notam tendências de aumento ou redução da massa específica com o aumento da temperatura de exposição.

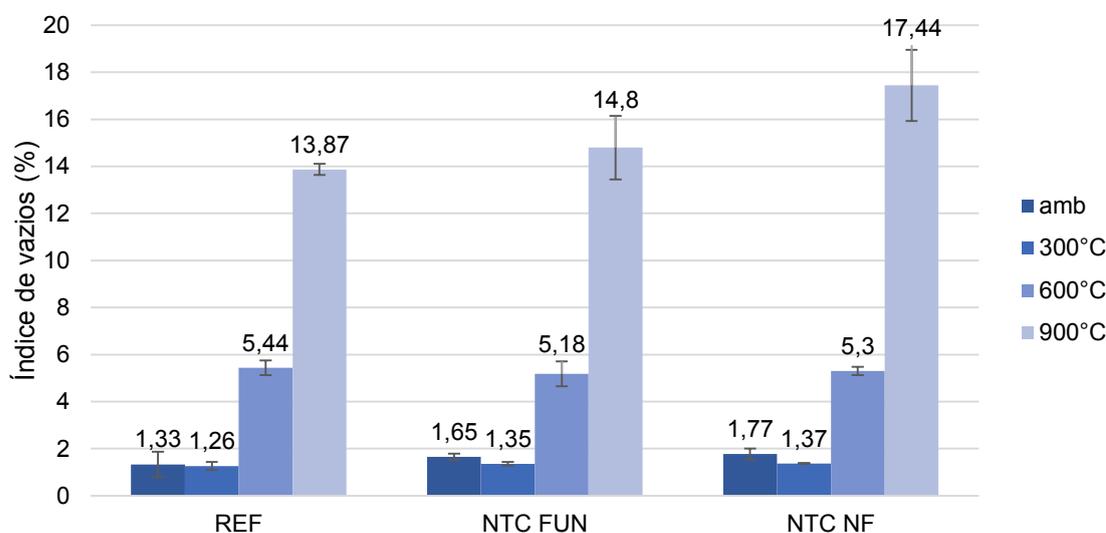
Figura 32 - Resultados de massa específica



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

A Figura 33 apresenta os resultados do índice de vazios. As análises estatísticas indicam que em temperatura ambiente e após a exposição do concreto a  $300^\circ\text{C}$  e  $600^\circ\text{C}$  não há diferença entre os três traços analisados para o parâmetro de índice de vazios. Na temperatura de  $900^\circ\text{C}$ , não há diferença entre os traços com adição de NTCs e o traço REF apresentou o menor valor médio para o parâmetro (13,87%). Os traços NTC FUN e NTC NF provavelmente apresentam maior porosidade nessa temperatura devido aos espaços vazios gerados pela degradação do nanomaterial que ocorre na temperatura de aproximadamente  $600^\circ\text{C}$ .

Figura 33 - Resultados de índice de vazios



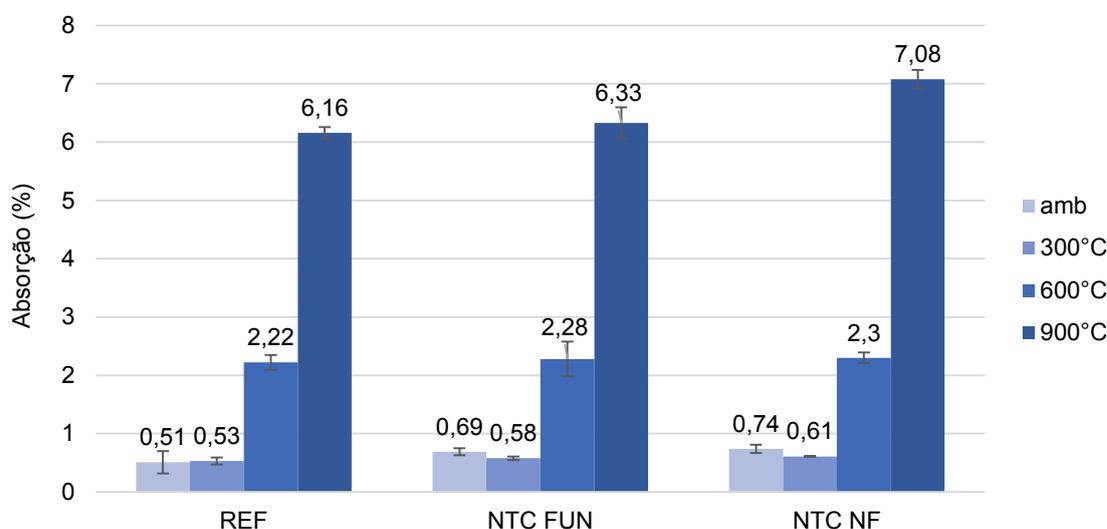
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Em consonância com os resultados obtidos nesta pesquisa, outros trabalhos como os de Pinto (2022) e Silva (2019) não observaram variação significativa na porosidade do concreto com adição de NTCs em relação a amostra de controle na temperatura ambiente.

Para os três traços analisados, o índice de vazios apresenta uma suave diminuição na temperatura de 300°C em relação a temperatura ambiente. Tal fato pode ter ocorrido devido a reações tardias de hidratação de cimento e/ou microssiflica que ainda não haviam reagido, preenchendo alguns poros do concreto (YAO e LU, 2021). Observa-se que, como esperado, a partir de 300°C o índice de vazios aumenta devido ao aumento da porosidade decorrente do processo de decomposição dos produtos de hidratação, perda de água e ao aumento da microfissuração do concreto com o aquecimento (RIBEIRO e TUTIKIAN, 2018).

Na Figura 34 é possível observar os resultados de absorção de água dos corpos de prova, cujo comportamento foi muito similar ao índice de vazios (Figura 33). As análises estatísticas indicam que em temperatura ambiente a após a exposição do concreto a 300°C e 600°C não há diferença entre os três traços analisados para o parâmetro de absorção de água. Na temperatura de 900°C, os valores médios dos traços REF e NTC FUN foram próximos (6,33%) e inferiores ao valor médio do traço NTC NF. As causas são provavelmente as mesmas do resultado de índice de vazios.

Figura 34 - Resultados de absorção de água



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

#### 4.4 VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO ULTRASSÔNICA (VPU)

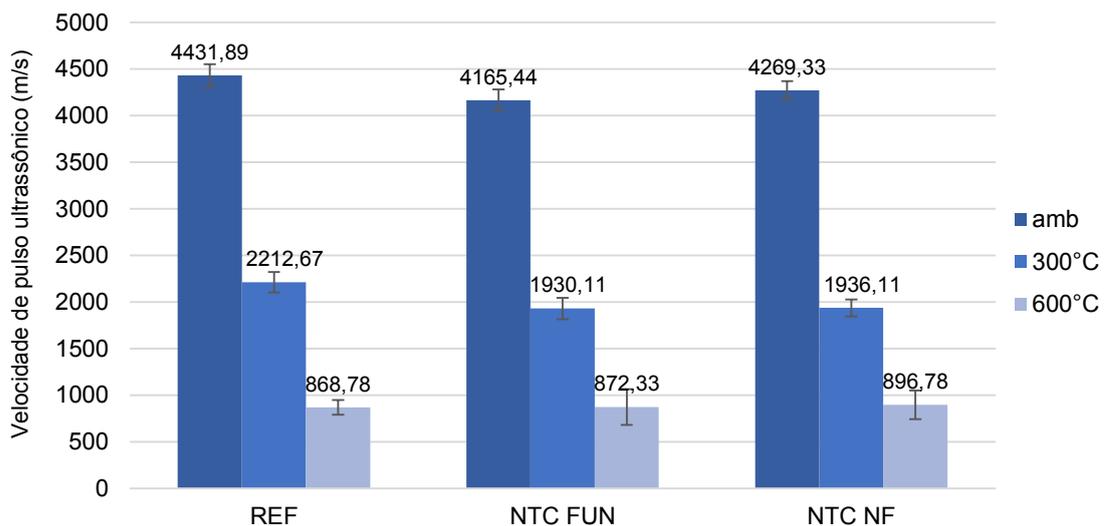
A Figura 35 mostra os resultados de velocidade de propagação de onda ultrassônica (VPU). Considerando a temperatura ambiente, o traço REF apresenta a maior VPU (4431,89 m/s). Os traços NTC FUN e NTC NF apresentaram valores de VPU cerca de 6% e 4% inferiores ao REF, respectivamente. As análises estatísticas indicam que não há diferença nos valores dos traços com adição de NTCs.

Para essa propriedade, o comportamento dos traços NTC FUN e NTC NF não apresentou diferenças significativas em nenhuma temperatura. Isso aponta que não houve diferença significativa entre o sistema de poros e o sistema de NTCs formados nas matrizes dos dois tipos de NTCs (MENDES, BARRETO, *et al.*, 2020). Isso também indica que, embora insatisfatória, a dispersão dos dois materiais foi similar na matriz de concreto.

Na temperatura de 300°C, o traço REF apresentou a maior VPU (2212,67 m/s). Os traços NTC FUN e NTC NF apresentaram reduções de cerca de 13% nessa propriedade em relação ao traço REF. Nessa temperatura também não houve diferenças significativas para a propriedade entre os concretos com adição de NTCs. Na temperatura de 600°C não houve diferença entre os resultados de VPU para os três traços analisados. O equipamento utilizado para leitura da VPU não conseguiu detectar a velocidade para a temperatura de 900°C devido à elevada microfissuração do concreto.

Uma vez que a onda se propaga em meio sólido, a VPU tende a decrescer com o aumento das interfaces entre diferentes componentes da matriz (ex. pasta, agregados, vazios e NTCs) (MENDES, BARRETO, *et al.*, 2020). Dessa forma, a VPU diminuiu com o aumento da temperatura devido ao aumento de vazios e a microfissuração ocasionados pela degradação do concreto. Conforme o índice de vazios aumenta a perda de massa também aumenta, visto que as duas propriedades estão relacionadas à perda de água proveniente do aquecimento. Nas temperaturas de 300°C e 600°C, as reduções chegaram a cerca de 54% e 80%, respectivamente. O estudo de Forigo *et al.* (2021) verificou valores de redução menores para o VPU de um concreto convencional, de classe 50, após a exposição a altas temperaturas, sendo cerca de 4% a 300°C e 38% a 600°C.

Figura 35 - Resultados de VPU

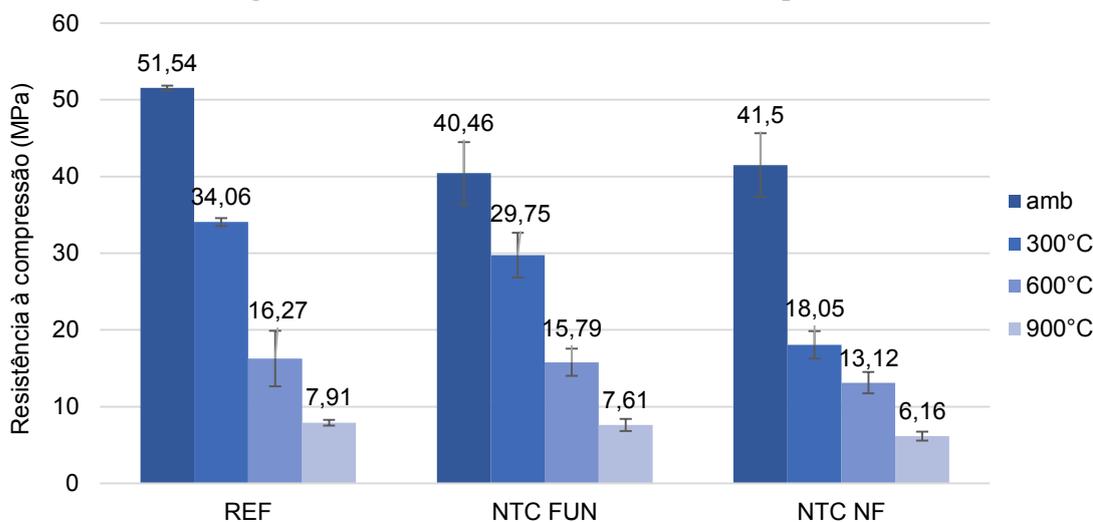


Fonte: Elaborado pela autora (2023).

#### 4.5 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A Figura 36 mostra os resultados de resistência à compressão nas diferentes temperaturas. Considerando as resistências médias na temperatura ambiente, o traço REF apresentou o maior resultado (51,54 MPa) e os traços NTC FUN e NTC NF apresentaram valores cerca de 21% e 19% inferiores ao REF, respectivamente. O desempenho insatisfatório dos concretos com adição de NTCs nessa propriedade pode ser atribuído a má dispersão dos NTCs, como verificado nas imagens da MEV.

Figura 36 - Resultados de resistência à compressão



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

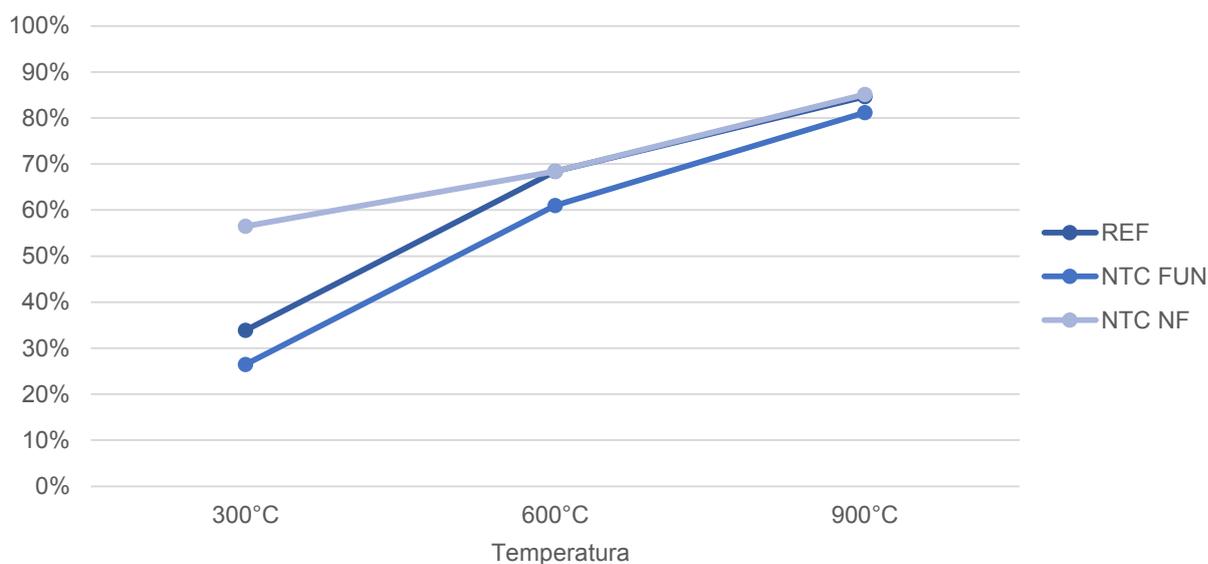
Tobón *et al.* (2016), Zhou *et al.* (2016) e Wang *et al.* (2019) também obtiveram reduções na resistência à compressão de argamassas e concretos com adição de NTCs. Os autores atribuíram esse desempenho à aglomeração e à má dispersão dos NTCs na matriz cimentícia. Cabe ressaltar ainda que, segundo Gillani *et al.* (2017), as melhorias no comportamento do concreto com adição de NTCs são altamente dependentes da sua dispersão. Não houve diferenças significativas na resistência à compressão dos traços NTC FUN e NTC NF na temperatura ambiente.

Na temperatura de 300°C, o traço REF apresentou a maior resistência (34,06 MPa) e os traços NTC FUN e NTC NF apresentaram reduções de cerca 13% e 47% em relação ao traço REF, respectivamente. Nessa temperatura, o comportamento do traço NTC FUN foi cerca de 65% superior ao traço NTC NF. Na temperatura de 600°C, as análises estatísticas indicam que não houve diferenças significativas entre os três traços estudados. Na temperatura de 900°C, mais uma vez a maior resistência foi apresentada pelo traço REF (7,91 MPa). Não há diferença entre os traços NTC FUN e NTC NF nessa temperatura e os valores de resistência observados foram inferiores ao REF.

O traço REF apresentou perdas de resistências de 34%, 68% e 85% após a exposição as temperaturas de 300°C, 600°C e 900°C, respectivamente (Figura 37). As amostras NTC FUN apresentaram perdas de 26%, 61% e 81% e o traço NTC NF perdas de 57%, 68% e 85%. Considerando a perda de resistência na temperaturas de 300°C, o traço NTC FUN apresentou o melhor comportamento entre os três traços. Esse desempenho pode ser atribuído a forte ligação covalente entre os grupos funcionais/ramificação dos NTCs funcionalizados com a matriz cimentícia (ZOU, CHEN, *et al.*, 2015). Segundo Li *et al.* (2005), os NTCs com grupos funcionais

induzem interações interfaciais do nanomaterial com os produtos de hidratação do cimento, produzindo uma alta resistência de ligação e aumentando a eficiência de transferência de carga da matriz de cimento. Na temperatura de 900°C, os valores de redução foram próximos para os três traços analisados, o que é esperado, dado que os NTCs são degradados na temperatura de 600°C.

Figura 37 – Perda de resistência à compressão após a exposição a temperaturas elevadas



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Quanto ao efeito da adição de NTCs no concreto após a exposição a temperaturas elevadas, Baloch, Khushnood e Khaliq (2018) investigaram a resistência à compressão do concreto convencional, classe 25, com adição de 0,08% de NTCs. Os autores constataram reduções de 5%, 18%, 49% e 76% na resistência nas temperaturas de 200°C, 400°C, 600°C e 800°C da amostra de referência. Em contrapartida, nas amostras com adição de NTCs as reduções encontradas foram menores, de 5%, 16%, 33% e 69%. No estudo, o concreto com NTCs apresentou melhor desempenho na resistência à compressão residual em todas as temperaturas analisadas. Os autores justificaram esse fato devido à ação de reforço dos NTCs e ao impedimento de propagação de fissuras (efeito de ponte). Além disso, os autores destacam que o calor específico diminui e a condutividade térmica do concreto aumenta com a adição dos NTCs, que possuem alta condutividade térmica. Por conseguinte, as tensões térmicas e as fissuras no concreto são reduzidas.

Yao e Lu (2021), estudando a adição de NTCs funcionalizados na concentração de 0,1% no concreto classe 50, constataram que a resistência à compressão aumentou após a exposição

a temperatura de 300°C em cerca de 60% na amostra de referência e 48% no concreto com NTCs. Na temperatura de 600°C, houve aumento de cerca de 15% e 1% na resistência para o concreto de controle e para o concreto com NTCs, respectivamente. Na temperatura de 900°C, ambos os traços apresentaram perda de cerca de 60% de resistência. Segundo os autores, o comportamento do concreto com NTCs foi superior ao concreto de referência após a exposição as temperaturas de 300°C e 600°C devido ao efeito de ponte que atenua a propagação de fissuras no concreto nanomodificado.

O estudo de Viana *et al.* (2020) avaliou o concreto com adição de 0,1% de NTCs. Os autores observaram reduções de 14%, 38% e 80% na resistência à compressão do concreto de referência após a exposição a 300°C, 450°C e 600°C, respectivamente. Para o concreto com NTCs, encontraram perdas de 0%, 46% e 83%. No estudo, o comportamento do concreto nanomodificado foi superior apenas após a exposição a 300°C. Segundo os autores, esse comportamento pode ser explicado pela adição dos NTCs, que criou uma estrutura de poros que permitiu uma melhor distribuição de tensões. Dessa forma, o concreto resistiu melhor aos efeitos da exposição a temperaturas elevadas.

#### **4.6 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO**

A Figura 38 mostra os resultados de resistência à tração. As análises estatísticas indicam que, na temperatura ambiente, não houve diferença significativa nos valores de resistência à tração entre os três traços.

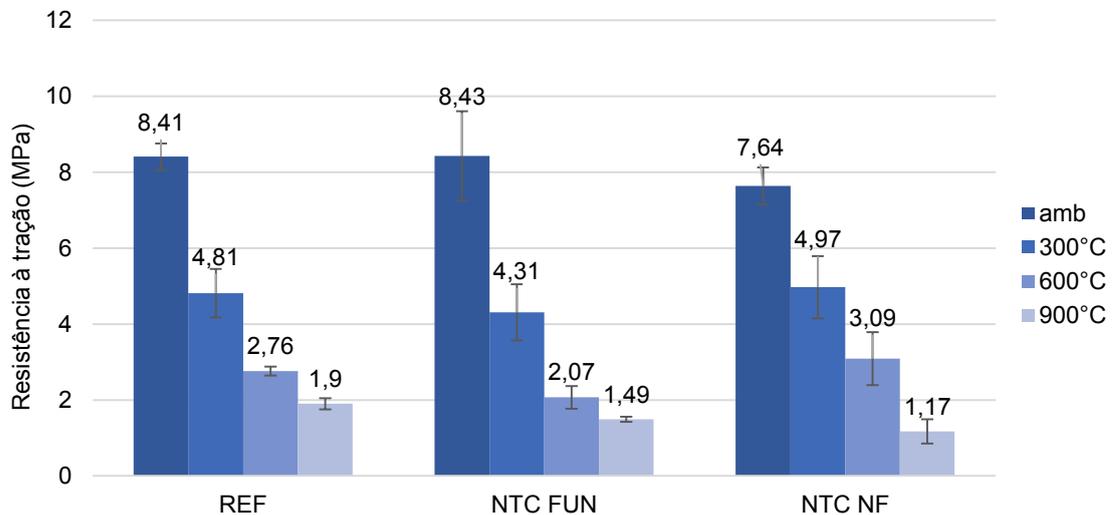
Quanto ao efeito da adição de NTCs no concreto em temperatura ambiente, Borges (2019) estudou o desempenho do concreto convencional produzido com NTCs sintetizados diretamente sobre o clínquer na concentração de 0,15%. O autor também não encontrou diferenças significativas na resistência à tração em relação ao concreto de referência, embora não tenha explicado as razões. Viana *et al.* (2020) também pesquisou a adição de NTCs no concreto. Na temperatura ambiente, assim como no presente trabalho, os autores não encontraram melhorias na resistência a tração do concreto nanomodificado, e tal como Borges (2019), não justificaram esse efeito.

Entretanto, esses são casos incomuns. A maioria dos autores relata um aumento na resistência à tração de até 10% até 20% com a adição de NTCs (HAWREEN, BOGAS e KURDA, 2019), (VESMAWALA, VAGHELA, *et al.*, 2020), (GILLANI, ANWAR, *et al.*, 2017), (MARCONDES, 2012), (PINTO, SILVA e DIAS, 2020). Como visto anteriormente, a falta de homogeneidade dos NTCs no concreto, juntamente com a maior porosidade,

provavelmente prejudicaram a melhoria das propriedades mecânicas do presente trabalho (GILLANI, ANWAR, *et al.*, 2017).

Nas temperaturas de 300°C 600°C, as análises estatísticas indicam que não houve diferença significativa entre as resistências dos três traços analisados. Na temperatura de 900°C, o melhor desempenho foi obtido pelo traço REF (1,9 MPa). Não há diferença entre o desempenho dos traços NTC FUN e NTC NF nessa temperatura. Nota-se que, conforme o esperado, a resistência a tração diminui com o aumento da temperatura, acompanhando a tendência da resistência à compressão, e as razões são provavelmente as mesmas do resultado anterior.

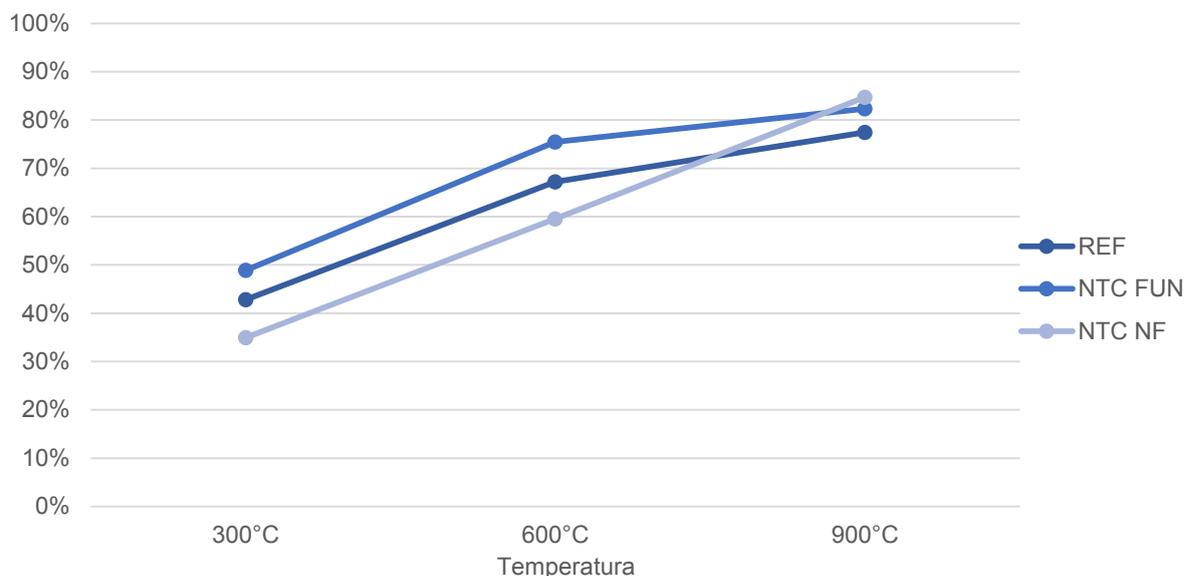
Figura 38 - Comparação entre os resultados de resistência à tração



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

O traço REF apresentou perdas de resistências de 43%, 67% e 75% após a exposição as temperaturas de 300°C, 600°C e 900°C, respectivamente (Figura 39). As amostras NTC FUN apresentaram perdas de 49%, 75% e 82%; e o traço NTC NF, perdas de 35%, 60% e 85%. Na temperatura de 900°C, o traço REF apresentou a menor perda de resistência. Nessa temperatura não há NTCs nas amostras de concreto, uma vez que eles sofrem degradação na temperatura de cerca de 600°C (GLEIZE e SILVESTRO, 2020). Portanto, os NTCs não podem contribuir para o comportamento mecânico do concreto em 900°C.

Figura 39 - Perda de resistência à tração após a exposição a temperaturas elevadas



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Baloch, Khushnood e Khaliq (2018) investigaram a resistência a tração do concreto com adição de 0,08% de NTCs na temperatura ambiente e após a exposição a elevadas temperaturas. Os autores constataram reduções de 19, 60, 83 e 85% na resistência a tração nas temperaturas de 200°C, 400°C, 600°C e 800°C na amostra de referência. E nas amostras com adição de NTCs as reduções encontradas foram de 25, 55, 70 e 85%. Nesse estudo, o concreto com NTCs apresentou melhor desempenho nas propriedades residuais nas temperaturas de 400°C e 600°C. Na temperatura de 800°C, não houve diferenças significativas entre os traços. Segundo os autores, o comportamento superior do concreto com adição de NTCs é devido ao reforço e ao efeito de ponte de fissuras gerado pelos NTCs no concreto.

#### 4.7 ANÁLISE VISUAL

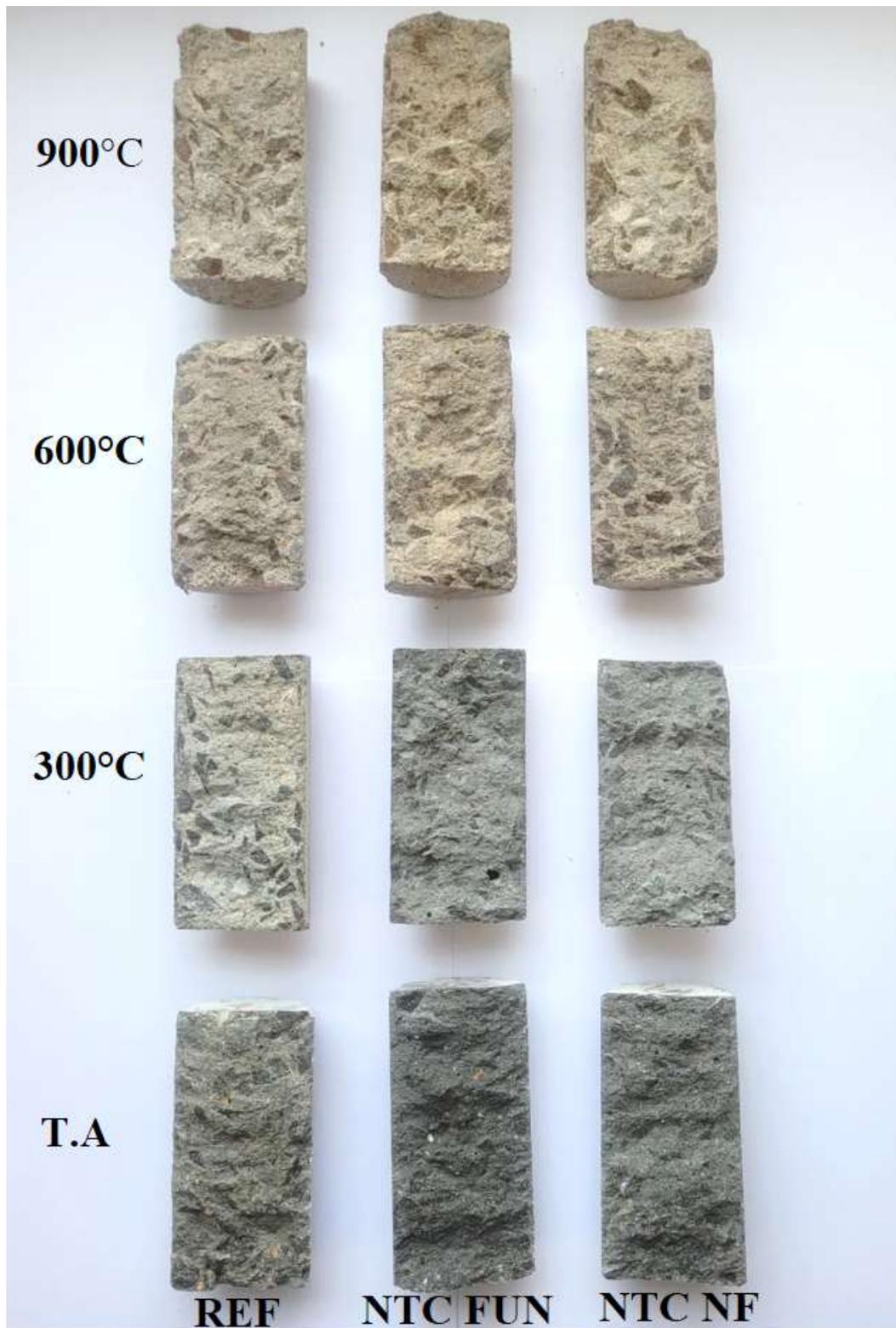
A Figura 40 apresenta os corpos de prova dos traços REF, NTC FUN e NTC NF nas diferentes temperaturas analisadas neste trabalho. Foram usados os corpos de prova rompidos no ensaio de compressão diametral, e é mostrada a seção central após a ruptura.

Nota-se que, na temperatura ambiente, as amostras NTC FUN e NTC NF apresentaram uma cor cinza ligeiramente mais escura que o concreto de referência, provavelmente devido à adição dos NTCs, que possuem a cor preta. Na temperatura de 300°C, os corpos de prova de todos os traços permaneceram com a cor cinza e não foram observadas microfissuras no concreto. Nas amostras expostas a 600°C, foram observadas microfissuras nos três traços analisados. Além disso,

os agregados miúdos e o concreto apresentaram coloração rosada em todos os traços. Na temperatura de 900°C, verificou-se a presença de muitas microfissuras nas três amostras analisadas. O concreto, os agregados miúdos e graúdos apresentaram um tom de rosa mais intenso nessa temperatura para todos os traços. Esse comportamento está compatível com o descrito na literatura por Cánovas (1984) que indica que concretos expostos a temperaturas entre 600°C e 900°C apresentem cor de rosa a vermelho. Segundo Wendt (2006), as mudanças de coloração do concreto são principalmente ocasionadas pela alteração da cor dos agregados devido ao aquecimento.

Excetuando-se o cinza mais escuro dos corpos de prova com NTCs, não foram observadas diferenças significativas entre a cor dos diferentes traços.

Figura 40 – Corpos de prova dos traços REF, NTC FUN e NTC NF em temperatura ambiente e após a exposição as temperaturas de 300°C, 600°C e 900°C



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo comparar o comportamento termomecânico do concreto com adição de NTCs funcionalizados e não funcionalizados. Para este fim, foram ensaiados três tipos de concreto: convencional (REF), com NTCs funcionalizados (NTC FUN) e com NTCs não funcionalizados (NTC NF). Foram realizados ensaios de perda de massa, microscopia eletrônica de varredura (MEV), massa específica, absorção, índice de vazios, determinação de velocidade de propagação de onda ultrassônica (VPU), resistência à compressão e à tração; todos em temperatura ambiente e após a exposição a temperaturas elevadas. Os principais resultados obtidos foram os seguintes:

- As imagens da MEV mostraram que os NTCs funcionalizados e não funcionalizados ficaram concentrados em algumas regiões do concreto e que não houve boa dispersão do nanomaterial na matriz cimentícia. Não foram identificadas diferenças significativas entre a dispersão dos NTCs funcionalizados e não funcionalizados no concreto;
- Os resultados de perda de massa não apresentaram diferenças significativas entre os traços NTC FUN e NTC NF nas temperaturas de 300°C e 600°C. Após a exposição a 900°C, o pior resultado de perda de massa foi apresentado pelo traço NTC NF.
- Os resultados de massa específica não mostraram diferenças significativas entre os traços com adição de NTCs para todas as temperaturas analisadas;
- Os resultados de índice de vazios não apresentaram diferenças significativas entre os traços NTC FUN e NTC NF em nenhuma das temperaturas estudadas. Também não há diferença no parâmetro comparando os concretos com adição de NTCs e o REF nas temperaturas ambiente, 300°C e 600°C. Após a exposição a 900°C, o menor índice de vazios foi observado pelo traço REF. A maior porosidade dos traços com adição de NTCs, provavelmente ocorreu devido aos espaços vazios gerados pela degradação do nanomaterial.
- Os resultados de absorção de água não apresentaram diferenças significativas entre os traços NTC FUN e NTC NF na temperatura ambiente e após exposição a 300°C e 600°C. Na temperatura de 900°C, o traço NTC NF apresentou o maior valor de absorção.
- Os resultados de VPU dos traços NTC FUN e NTC NF não apresentaram diferenças significativas para todas as temperaturas analisadas. Isso também indica que, embora insatisfatória, a dispersão dos dois materiais foi similar na matriz de concreto.

- As resistências à compressão dos traços NTC FUN e NTC NF não apresentaram diferenças significativas na temperatura ambiente e foram menores que a resistência do traço REF, provavelmente devido à má dispersão dos NTCs.
- Quanto às resistências residuais à compressão, não houve diferenças significativas nos valores de resistência dos traços NTC FUN e NTC NF, com exceção da temperatura de 300°C. Nessa temperatura, o desempenho do traço NTC FUN foi superior, provavelmente devido à forte ligação covalente entre as ramificações dos NTCs funcionalizados com a matriz cimentícia;
- Não há diferença na resistência à tração dos três traços analisados em temperatura ambiente. A má dispersão e a falta de homogeneidade dos NTCs no concreto provavelmente prejudicaram a melhoria nessa propriedade.
- Quanto às resistências residuais à tração, não há diferença entre os traços NTC FUN e NTC NF em nenhuma temperatura estudada. Não houve uma tendência geral de melhora ou piora entre os traços com NTCs e o convencional (REF).
- Os corpos de prova expostos as temperaturas de 600°C e 900°C apresentaram fissuras e variação de cor, do tom cinza para o tom rosado, para todos os traços analisados. Esses resultados ficaram dentro do esperado para as temperaturas testadas.

Levando-se em consideração os resultados obtidos nesta pesquisa, pode-se concluir que a adição de NTCs funcionalizados melhora o comportamento mecânico do concreto no início da exposição a altas temperaturas em situações de incêndio. Essa melhora poderia ter sido potencialmente maior se a dispersão dos NTCs tivesse sido mais eficaz. Mas mesmo com os resultados obtidos, é possível inferir que a adição de NTCs pode contribuir para maior segurança da estrutura da edificação e dos usuários.

Quanto à comparação dos traços NTC FUN e NTC NF, a adição de NTCs funcionalizados foi mais eficaz na melhoria da resistência residual à compressão na temperatura de 300°C. Para os demais parâmetros analisados o comportamento dos traços com adição de NTCs foi semelhante.

## **5.1 LIMITAÇÕES DO TRABALHO E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS**

Esta pesquisa apresentou algumas limitações geradas pela dificuldade de aquisição de NTCs funcionalizados e não funcionalizados com as mesmas dimensões e razão de aspecto. Esse fato impediu a melhor comparação entre a adição dos dois tipos de NTCs no concreto,

uma vez que a razão de aspecto do NTC influencia a dispersão e as propriedades mecânicas do concreto nanomodificado.

Apesar dos métodos de dispersão de NTCs mais citados na literatura terem sido seguidos, a dispersão obtida no presente trabalho não foi satisfatória, afetando todos os resultados. Uma das possíveis causas pode ter sido o teor de surfactante adicionado na solução aquosa com NTCs para garantir uma boa dispersão do nanomaterial. Segundo Sobolkina *et al.* (2012), quando o teor de surfactante é baixo, não ocorre o cobrimento completo do NTC e a dispersão é prejudicada pela aglomeração dos NTCs. Quando o teor é alto, há formação de multicamadas de surfactante, o que não contribui para a dispersão e pode até gerar até reaglomeração dos NTCs. Portanto, é preciso encontrar o teor ideal de surfactante para a quantidade e dimensão dos NTCs utilizados, o que é normalmente feito de forma empírica (tentativa e erro). Apesar de vários testes terem sido feitos pela equipe do projeto, para o presente traço e materiais adotados, o teor de surfactante pode ter levado a má dispersão dos NTCs nos concretos. Outras possíveis causas de aglomeração dos NTCs podem ter sido a técnica de mistura e alguma possível incompatibilidade com algum dos outros aditivos e adições adotados.

Levando-se em consideração os resultados obtidos nesta pesquisa e as lacunas da área que ainda não foram preenchidas, pode-se sugerir como temas para pesquisas futuras:

- Analisar as propriedades do concreto com adição de NTCs funcionalizados e não funcionalizados com o mesmo comprimento e mesma razão de aspecto após a exposição a altas temperaturas;
- Analisar as propriedades do concreto com NTCs após a exposição a temperaturas elevadas com outros teores de adição;
- Entender o fenômeno de aglomeração/dispersão dos NTCs, que é reportado por diversos autores na literatura, mas até o momento não foi satisfatoriamente explicado, apesar de sua importância nos resultados dos concretos nanomodificados;
- Aumentar o tempo de sonificação dos NTCs em solução aquosa antes da mistura;
- Realizar a dispersão dos NTCs com outros métodos como a agitação magnética e a goma acácia.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova.** Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522: Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão.** Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802: Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica.** Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de coão diametral de copos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 30: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água.** Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** Rio de Janeiro, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14432: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento .** Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16965: Ensaio de resistência ao fogo de elementos construtivos – Diretrizes gerais**. Rio de Janeiro, 2021.

ADHIKARY, S. K. et al. Effects of carbon nanotubes on expanded glass and silica aerogel based lightweight concrete. **Scientific reports**, p. 11, Janeiro 2021.

AZEVEDO, C. F. et al. Compressive strength of reduced concrete specimens considering. **Construction and Building Materials**, p. 12, 3 Maio 2020.

BALOGH, W. L.; KHUSHNOOD, R. A.; KHALIQ, W. Influence of multi-walled carbon nanotubes on the residual performance. **Construction and Building Materials**, p. 13, 14 Julho 2018.

BATISTONA, E. et al. Efeito da proporção de aspecto dos Nanotubos de Carbono (CNTs) na reologia, condutividade térmica e desempenho mecânico de Pasta de cimento Portland. **IBRACON de Estruturas e Materiais**, p. 12, Dezembro 2020.

BICA, K. M. A. M. **Estudo do concreto de cimento portland com adição de nanografite**. Patos de Minas: Centro Universitário de Patos de Minas, 2017.

BORGES, L. A. **DESEMPENHO DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM NANOTUBOS DE CARBONO SINTETIZADOS DIRETAMENTE SOBRE O CLINQUER**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2019.

CÁNOVAS, M. F. **Patología y Terapéutica del Hormigon Armado**. Madrid: Dossat, 1984.

CAPAZ, R. B.; CHACHAM, H. Nanotubos e a nova era do carbono. **Ciência Hoje**, 2003. Disponível em: <[www.fisica.ufc.br/redenano](http://www.fisica.ufc.br/redenano)>. Acesso em: 12 Fevereiro 2023.

CARRIÇO, A. et al. Durability of multi-walled carbon nanotube reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, p. 13, 27 Dezembro 2017.

CEARÁ, C. D. B. D. E. D. **Corpo de Bombeiros do Estado do Ceará**, 2022. Disponível em: <<https://www.bombeiros.ce.gov.br/2022/11/02/corpo-de-bombeiros-apagou-975-incendios-em-residencias-em-2022/>>. Acesso em: 10 Março 2023.

COUTO, G. G. **Nanopartículas de níquel: síntese, caracterização, propriedades e estudo de sua utilização como catalisadores na obtenção de nanotubos de carbono**. Curitiba: Universidade federal do Paraná, 2006.

FORIGO, C.; LOPES, Y. D.; VANALLI, L. Determinação da resistência à compressão do concreto exposto a altas temperaturas pelo método de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas. **Holos**, p. 20, Janeiro 2021.

FORIGO, C.; LOPES, Y. D.; VANALLI, L. Determinação da resistência à compressão do concreto exposto a altas temperaturas pelo método de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas. **Holos**, p. 20, Janeiro 2021.

- G1. **g1.globo.com**, 2023. Disponível em: <<https://g1.globo.com/se/sergipe/noticia/2023/01/17/incendios-em-edificacoes-aumentaram-13percent-em-2022-diz-corpo-de-bombeiros-de-sergipe.ghml>>. Acesso em: 10 Março 2023.
- GILLANI, S. S.-U.-H. et al. Improving the mechanical performance of cement composites by. **ScienceDirect**, 2017.
- GLEIZE, P. J. P.; SILVESTRO, L. Effect of carbon nanotubes on compressive, flexural and tensile strengths. **Construction and Building Materials**, p. 12, 8 Julho 2020.
- HAWREEN, A.; BOGAS, J. A.; KURDA, R. Mechanical Characterization of Concrete Reinforced with Diferent. **Arabian Journal for Science and Engineering**, p. 16, 5 Agosto 2019.
- IJIMA, S. Helical microtubules of graphitic carbon. **Letters to nature**, p. 3, November 1991.
- JANEIRO, C. D. B. M. D. E. D. R. D. **cbmerj.rj.gov.br**, 2019. Disponível em: <<https://www.cbmerj.rj.gov.br/annualos/annualo2019.pdf>>. Acesso em: 10 Março 2023.
- KONSTA-GDOUTOS, M. S.; DANOGLIDIS, P. A.; SHAH, S. P. High modulus concrete: Effects of low carbon nanotube and nanofiber. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, p. 8, 2 Julho 2019.
- LEI, L.; ZHANG, L. Synthesis and performance of a non-air entraining polycarboxylate superplasticizer. **Cement and Concrete Research**, p. 10, Junho 2022.
- LI, G. Y.; WANG, P. M.; ZHAO, X. Mechanical behavior and microstructure of cement composites incorporating surface-treated multi-walled carbon nanotubes. **Carbon**, p. 7, December 2005.
- LIMA, R. C. A. **Investigação do comportamento de concretos em temperaturas elevadas**. [S.l.]: Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.
- MARCONDES, C. G. N. **Adição de nanotubos de carbono em concretos de cimento portland - absorção, permeabilidade, penetração de cloretos e propriedades mecânicas**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2012.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials**. Terceira Edição. 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. **Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais**, Belo Horizonte, 2009.
- MEMON, S. A. et al. Durability of sustainable concrete subjected to elevated temperature – A review. **Construction and Building Materials**, p. 21, 8 Dezembro 2018.

- MENDES, J. C. et al. Correlation Between Ultrasonic Pulse Velocity and Thermal Conductivity of Cement-Based Composites. **Journal of Nondestructive Evaluation**, p. 10, March 2020.
- MINAS, E. D. **em.com.br**, 2023. Disponível em: <[https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2022/08/30/interna\\_gerais,1389957/em-minas-bombeiros-atendem-a-9-incendios-em-casas-e-comercios-por-dia.shtml](https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2022/08/30/interna_gerais,1389957/em-minas-bombeiros-atendem-a-9-incendios-em-casas-e-comercios-por-dia.shtml)>. Acesso em: 10 Março 2023.
- MOHSEN, M. O. et al. Optimum carbon nanotubes' content for improving flexural and. **Construction and Building Materials**, p. 9, 2 Junho 2017.
- MOSALLAM, S. J. et al. The effect of carbon nanotubes on mechanical properties of structural. **Structures**, p. 16, 1 Setembro 2021.
- OSORIO, A. G. **Funcionalização de nanotubos de carbono e sua utilização como reforço em matriz de hidroxiapatita**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.
- PAULO, C. D. B. D. E. D. S. **ssp.sp.gov.br/**, 2023. Disponível em: <<http://www.ssp.sp.gov.br/estatistica/corpobombeiro.aspx>>. Acesso em: 10 Março 2023.
- PINTO, S. A.; SILVA, M. O.; DIAS, C. M. R. Influence of the incorporation of functionalized and non-functionalized carbon nanotubes (NTC) on the mechanical performance of mortars. **BADUCON**, p. 12, Dezembro 2020.
- PINTO, S. D. A. **Influência de Nanotubos de Carbono (NTC) na durabilidade do concreto quanto à ação de cloretos**. Salvador: Universidade Federal da Bahia, 2022.
- RASHAD, A. M. Effect of carbon nanotubes (CNTs) on the properties of traditional. **Construction and Building Materials**, p. 21, 10 Julho 2017.
- RIBEIRO, D. V.; TUTIKIAN, B. F. Durabilidade do concreto submetido a situações extremas: resistência a ciclos de gelo e degelo e à ação do fogo. In: \_\_\_\_\_ **Corrosão e Degradação em Estruturas de Concreto: Teoria, Controle e Técnicas de Análise e Intervenção**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2018. p. 190-240.
- RILEM. Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, Systèmes de Construction et Ouvrages. **RILEM TC 129-MHT: Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures - Part 4: Tensile strength**, Viena, 2000.
- RILEM. Réunion Internationale des laboratoires et experts des matériaux systèmes de construction et ouvrages. **Recommendation of RILEM TC 200-HTC: mechanical concrete properties at high temperatures - modelling and applications. Part 1: Introduction - General presentation**, Viena, 2007.
- SAINT-PIERRE, F. et al. Concrete Quality Designation based on Ultrasonic Pulse Velocity. **Construction and Building Materials**, p. 6, August 2016.

- SIKA. **Ficha do Produto - Sika ViscoCrete 3535CB**. Osasco: Sika, 2014.
- SIKA. **Ficha Técnica de Produto - Sikament RM-300**. Osasco: Sika, 2019.
- SILVA, J. M. D. **Análise temporal da dispersão de nanotubos de carbono para aplicação de cimento Portland**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2019.
- SOBOLKINA, A. et al. Dispersion of carbon nanotubes and its influence on the mechanical properties of the cement matrix. **Cement & Concrete Composites**, p. 10, Agosto 2012.
- SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: PINI, 2009.
- TOBÓN, J. I.; MEDOZA-REALIS, O. A.; GALLEGO, G. S. The mechanical properties of Portland cement mortars blended with carbon nanotubes and nanosilica: a study by experimental design. **Dyna**, p. 6, Maio 2016.
- VAISMAN, L.; WAGNER, H. D.; MARON, G. The role of surfactants in dispersion of carbon nanotubes. **Advances in colloid and interface science**, p. 10, Janeiro 2007.
- VESMAWALA, G. R. et al. Effectiveness of polycarboxylate as a dispersant of carbon. **Materials Today: Proceedings**, p. 5, 5 Janeiro 2020.
- VIANA, T. M. et al. Behaviour of ultra-high performance concretes incorporating carbon. **Construction and Building Materials**, p. 8, 7 Setembro 2020.
- WANG, Z. et al. Corrosion behavior of steel rebar embedded in hybrid CNTs-OH/polyvinyl alcohol modified concrete under accelerated chloride attack. **Cement and Concrete Composites**, p. 9, 2019.
- WENDT, S. C. **Análise da mudança de cor em concretos submetidos a altas temperaturas como indicativo de temperaturas alcançadas e da degradação térmica**. Porto Alegre: Universidade do Rio Grande do Sul, 2006.
- XIE, H.; CAI, A.; WANG, X. Thermal diffusivity and conductivity of multiwalled carbon nanotube arrays. **Solid State Phys**, p. 4, 2007.
- YAO, Y.; LU, H. Mechanical properties and failure mechanism of carbon nanotube. **Construction and Building Materials**, p. 12, 27 Maio 2021.
- YU, S. H. et al. Influence of dispersants on the properties of CNTs reinforced cement-based materials. **Construction and Building Materials**, p. 9, November 2016.
- ZHOU, C. et al. Enhanced mechanical properties of cement paste by hybrid graphene oxide/carbon nanotubes. **Construction and Building Materials**, p. 10, Dezembro 2016.
- ZOU, B. et al. Effect of ultrasonication energy on engineering properties of carbon nanotube reinforced cement pastes. **Carbon**, p. 9, Janeiro 2015.

## 7 APÊNDICE A – RESULTADOS INDIVIDUAIS DE CADA CORPO DE PROVA

Tabela 13 - Resultados de massa específica de cada corpo de prova

<b>MASSA ESPECÍFICA (g/cm<sup>3</sup>)</b>			
<b>TEMPERATURA AMBIENTE</b>			
CP	REF	NTC FUN	NTC NF
1	2,71	2,47	2,39
2	2,37	2,41	2,37
3	2,82	2,40	2,38
4	2,53	2,40	2,56
5	2,60	2,41	2,37
6	2,70	2,39	2,18
7	2,51	2,37	2,56
8	2,50	2,42	2,24
9	2,43	2,39	2,44
<b>TEMPERATURA - 300°C</b>			
CP	REF	NTC FUN	NTC NF
7	2,34	2,32	CP Perdido
8	2,28	2,32	2,25
9	2,44	2,32	2,25
<b>TEMPERATURA - 600°C</b>			
CP	REF	NTC FUN	NTC NF
7	2,44	2,30	2,30
8	2,37	2,20	2,31
9	2,56	2,34	2,29
<b>TEMPERATURA - 900°C</b>			
CP	REF	NTC FUN	NTC NF
7	2,26	2,22	2,65
8	2,24	2,33	2,57
9	2,25	2,45	2,18

Tabela 14 - Resultados de índice de vazios de cada corpo de prova

<b>ÍNDICE DE VAZIOS (%)</b>			
<b>TEMPERATURA AMBIENTE</b>			
CP	REF	NTC FUN	NTC NF
1	0,99	1,46	1,99
2	1,40	1,69	1,85
3	2,19	1,80	1,77
4	0,86	1,67	2,18
5	1,08	1,77	1,70
6	2,10	1,52	1,49
7	1,50	1,76	1,82
8	1,24	1,44	1,43
9	0,60	1,73	1,69
<b>TEMPERATURA - 300°C</b>			
CP	REF	NTC FUN	NTC NF
7	1,31	1,31	CP Perdido
8	1,07	1,29	1,36
9	1,39	1,44	1,38
<b>TEMPERATURA - 600°C</b>			
CP	REF	NTC FUN	NTC NF
7	5,77	5,23	5,40
8	5,14	5,68	5,08
9	5,42	4,63	5,41
<b>TEMPERATURA - 900°C</b>			
CP	REF	NTC FUN	NTC NF
7	13,77	13,46	18,72
8	13,70	14,77	17,84
9	14,14	16,16	15,77

Tabela 15 - Resultados de absorção de cada corpo de prova

<b>ABSORÇÃO (%)</b>			
<b>TEMPERATURA AMBIENTE</b>			
CP	REF	NTC FUN	NTC NF
1	0,36	0,59	0,83
2	0,59	0,70	0,78
3	0,78	0,75	0,74
4	0,34	0,69	0,85
5	0,41	0,74	0,72
6	0,78	0,64	0,69
7	0,60	0,74	0,71
8	0,50	0,59	0,64
9	0,25	0,72	0,69
<b>TEMPERATURA - 300°C</b>			
CP	REF	NTC FUN	NTC NF
7	0,56	0,56	CP Perdido
8	0,47	0,56	0,61
9	0,57	0,62	0,61
<b>TEMPERATURA - 600°C</b>			
CP	REF	NTC FUN	NTC NF
7	2,36	2,27	2,34
8	2,17	2,58	2,20
9	2,12	1,98	2,36
<b>TEMPERATURA - 900°C</b>			
CP	REF	NTC FUN	NTC NF
7	6,10	6,06	7,05
8	6,11	6,34	6,94
9	6,28	6,60	7,24

Tabela 16 - Resultados de velocidade de propagação de onda ultrassônica de cada corpo de prova

<b>VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDA ULTRASSÔNICA</b>			
<b>(m/s)</b>			
<b>TEMPERATURA AMBIENTE</b>			
<b>CP</b>	<b>REF</b>	<b>NTC FUN</b>	<b>NTC NF</b>
1	4405	4115	4132
2	4310	4049	4255
3	4310	4132	4292
4	4505	4132	4274
5	4386	4115	4405
6	4484	4310	4132
7	4608	4082	4219
8	4292	4405	4405
9	4587	4149	4310
<b>TEMPERATURA - 300°C</b>			
<b>CP</b>	<b>REF</b>	<b>NTC FUN</b>	<b>NTC NF</b>
1	2247	1724	1972
2	2123	1848	1957
3	2110	1961	1969
4	2169	2000	2119
5	2208	1905	1957
6	2342	1946	1786
7	2088	2105	1898
8	2415	2037	1887
9	2212	1845	1880
<b>TEMPERATURA - 600°C</b>			
<b>CP</b>	<b>REF</b>	<b>NTC FUN</b>	<b>NTC NF</b>
1	816	1212	883
2	1060	1149	1168
3	837	808	789
4	843	781	732
5	841	644	782
6	902	711	1134
7	870	868	917
8	803	892	847
9	847	786	819

Tabela 17 - Resultados de resistência à compressão de cada corpo de prova

<b>RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)</b>							
TEMPERATURA AMBIENTE				TEMPERATURA - 300°C			
CP	REF	NTC FUN	NTC NF	CP	REF	NTC FUN	NTC NF
1	51,66	44,52	43,30	1	33,88	33,11	20,07
2	51,76	36,47	36,78	2	33,67	28,07	16,66
3	51,20	40,40	44,42	3	34,64	28,07	17,42
TEMPERATURA - 600°C				TEMPERATURA - 900°C			
CP	REF	NTC FUN	NTC NF	CP	REF	NTC FUN	NTC NF
1	15,94	15,49	14,26	1	8,2	7,03	6,62
2	20,02	14,21	11,56	2	8,05	8,51	6,37
3	12,84	17,68	13,55	3	7,49	7,28	5,5

Tabela 18 - Resultados de resistência à tração de cada corpo de prova

<b>RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa)</b>							
TEMPERATURA AMBIENTE				TEMPERATURA - 300°C			
CP	REF	NTC FUN	NTC NF	CP	REF	NTC FUN	NTC NF
1	8,23	9,69	7,35	1	5,14	4,97	5,13
2	8,19	7,35	8,20	2	4,07	3,51	5,70
3	8,82	8,24	7,36	3	5,21	4,46	4,09
TEMPERATURA - 600°C				TEMPERATURA - 900°C			
CP	REF	NTC FUN	NTC NF	CP	REF	NTC FUN	NTC NF
1	2,85	1,72	3,88	1	2,00	1,54	1,18
2	2,80	2,22	2,52	2	1,97	1,53	1,48
3	2,62	2,27	2,88	3	1,73	1,41	0,85

Tabela 19 - Resultados de perda de massa de cada corpo de prova

<b>PERDA DE MASSA (%)</b>			
<b>TEMPERATURA - 300°C</b>			
CP	REF	NTC FUN	NTC NF
1	7,76	7,79	7,24
2	8,01	8,06	7,49
3	7,93	7,22	7,44
4	7,86	7,26	7,90
5	8,10	8,14	8,71
6	7,98	7,36	7,72
7	8,30	7,19	7,72
8	8,00	7,40	7,72
9	8,25	7,71	7,63
<b>TEMPERATURA - 600°C</b>			
CP	REF	NTC FUN	NTC NF
1	9,05	9,30	8,66
2	9,12	8,93	8,40
3	9,42	8,96	8,57
4	9,32	10,91	8,82
5	9,12	8,78	8,68
6	9,01	8,71	9,01
7	9,03	8,84	8,75
8	8,85	8,56	9,27
9	9,83	8,61	8,88
<b>TEMPERATURA - 900°C</b>			
CP	REF	NTC FUN	NTC NF
1	10,93	10,04	11,27
2	11,40	10,45	11,11
3	10,84	10,80	11,54
4	10,87	10,88	13,75
5	10,89	10,53	10,90
6	11,12	10,28	11,30
7	11,19	10,49	11,51
8	11,51	10,55	10,48
9	11,12	10,42	10,65

## 8 APÊNDICE B – ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Figura 41 – Perda de massa - 300°C

### ANOVA a um fator (não-paramétrica)

Kruskal-Wallis

	$\chi^2$	gl	p
PERDA DE MASSA 300	8.59	2	0.014

### Comparações múltiplas Dwass-Steel-Critchlow-Fligner

Comparações múltiplas - PERDA DE MASSA 300

		W	p
REF	NTC FUN	-3.31	0.051
REF	NTC NF	-3.69	0.025
NTC FUN	NTC NF	1.31	0.622

Figura 42 – Perda de massa - 600°C

### ANOVA a um fator (não-paramétrica)

Kruskal-Wallis

	$\chi^2$	gl	p
PERDA DE MASSA 600	8.82	2	0.012

### Comparações múltiplas Dwass-Steel-Critchlow-Fligner

Comparações múltiplas - PERDA DE MASSA 600

		W	p
REF	NTC FUN	-2.94	0.095
REF	NTC NF	-4.00	0.013
NTC FUN	NTC NF	-1.19	0.679

Figura 43 – Perda de massa 900°C

### ANOVA a um fator (não-paramétrica)

Kruskal-Wallis

	$\chi^2$	gl	p
PERDA DE MASSA 900	13.8	2	0.001

### Comparações múltiplas Dwass-Steel-Critchlow-Fligner

Comparações múltiplas - PERDA DE MASSA 900

		W	p
REF	NTC FUN	-4.810	0.002
REF	NTC NF	0.875	0.810
NTC FUN	NTC NF	4.183	0.009

Figura 44 – Massa específica - Temperatura Ambiente

## ANOVA a um fator

ANOVA a um fator (Welch)

	<b>F</b>	<b>gl1</b>	<b>gl2</b>	<b>p</b>
MASSA TA	5.61	2	11.5	0.020

Descritivas de Grupo

	<b>Traço</b>	<b>N</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio-padrão</b>	<b>Erro-padrão</b>
MASSA TA	REF	9	2.57	0.1455	0.04851
	NTC FUN	9	2.41	0.0278	0.00928
	NTC NF	9	2.39	0.1264	0.04212

## Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	<b>W</b>	<b>p</b>
MASSA TA	0.948	0.188

Nota. Um p-value pequeno sugere a violação do pressuposto da normalidade

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	<b>F</b>	<b>gl1</b>	<b>gl2</b>	<b>p</b>
MASSA TA	5.47	2	24	0.011

[3]

## Testes Post Hoc

Teste Post-hoc de Games-Howell

		<b>REF</b>	<b>NTC FUN</b>	<b>NTC NF</b>
REF	Diferença média	—	0.168*	0.1867*
	p-value	—	0.021	0.027
NTC FUN	Diferença média		—	0.0189
	p-value		—	0.901
NTC NF	Diferença média			—
	p-value			—

Nota. \* p < .05, \*\* p < .01, \*\*\* p < .001

Figura 45 – Massa específica - 300°C

**ANOVA a um fator (não-paramétrica)**

Kruskal-Wallis

	$\chi^2$	gl	p
MASSA ESPECÍFICA 300	4.52	2	0.104

**Comparações múltiplas Dwass-Steel-Critchlow-Fligner**

Comparações múltiplas - MASSA ESPECÍFICA 300

		W	p
REF	NTC FUN	-0.984	0.766
REF	NTC NF	-2.513	0.177
NTC FUN	NTC NF	-2.828	0.112

Figura 46 – Massa específica - 600°C

## ANOVA a um fator

ANOVA a um fator (Welch)

	<b>F</b>	<b>gl1</b>	<b>gl2</b>	<b>p</b>
MASSA 600	3.28	2	2.74	0.187

Descritivas de Grupo

	<b>Traço</b>	<b>N</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio-padrão</b>	<b>Erro-padrão</b>
MASSA 600	REF	3	2.46	0.0961	0.05548
	NTC FUN	3	2.28	0.0721	0.04163
	NTC NF	3	2.30	0.0100	0.00577

## Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	<b>W</b>	<b>p</b>
MASSA 600	0.953	0.720

Nota. Um p-value pequeno sugere a violação do pressuposto da normalidade

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	<b>F</b>	<b>gl1</b>	<b>gl2</b>	<b>p</b>
MASSA 600	3.06	2	6	0.121

[3]

## Testes Post Hoc

Teste Post-Hoc de Tukey - MASSA 600

		<b>REF</b>	<b>NTC FUN</b>	<b>NTC NF</b>
REF	Diferença média	—	0.177*	0.1567
	p-value	—	0.048	0.074
NTC FUN	Diferença média		—	-0.0200
	p-value		—	0.935
NTC NF	Diferença média			—
	p-value			—

Nota. \* p < .05, \*\* p < .01, \*\*\* p < .001

Figura 47 – Massa específica - 900°C

## ANOVA a um fator

ANOVA a um fator (Welch)

	F	gl1	gl2	p
MASSA 900	1.51	2	2.69	0.363

Descritivas de Grupo

	Traço	N	Média	Desvio-padrão	Erro-padrão
MASSA 900	REF	3	2.25	0.01000	0.00577
	NTC FUN	3	2.33	0.11504	0.06642
	NTC NF	3	2.47	0.25146	0.14518

## Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	W	p
MASSA 900	0.918	0.378

Nota. Um p-value pequeno sugere a violação do pressuposto da normalidade

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	F	gl1	gl2	p
MASSA 900	6.16	2	6	0.035

[3]

## Testes Post Hoc

Teste Post-hoc de Games-Howell

		REF	NTC FUN	NTC NF
REF	Diferença média	—	-0.0833	-0.217
	p-value	—	0.537	0.450
NTC FUN	Diferença média		—	-0.133
	p-value		—	0.712
NTC NF	Diferença média			—
	p-value			—

Nota. \* p < .05, \*\* p < .01, \*\*\* p < .001

Figura 48 – Índice de vazios - Temperatura Ambiente

## ANOVA a um fator

ANOVA a um fator (Welch)

	<b>F</b>	<b>gl1</b>	<b>gl2</b>	<b>p</b>
VAZIOS TA	2.60	2	13.7	0.110

Descritivas de Grupo

	<b>Traço</b>	<b>N</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio-padrão</b>	<b>Erro-padrão</b>
VAZIOS TA	REF	9	1.33	0.537	0.1790
	NTC FUN	9	1.65	0.139	0.0463
	NTC NF	9	1.77	0.232	0.0773

## Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	<b>W</b>	<b>p</b>
VAZIOS TA	0.938	0.112

Nota. Um p-value pequeno sugere a violação do pressuposto da normalidade

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	<b>F</b>	<b>gl1</b>	<b>gl2</b>	<b>p</b>
VAZIOS TA	5.83	2	24	0.009

[3]

## Testes Post Hoc

Teste Post-hoc de Games-Howell

		<b>REF</b>	<b>NTC FUN</b>	<b>NTC NF</b>
REF	Diferença média	—	-0.320	-0.440
	p-value	—	0.246	0.105
NTC FUN	Diferença média		—	-0.120
	p-value		—	0.404
NTC NF	Diferença média			—
	p-value			—

Nota. \* p < .05, \*\* p < .01, \*\*\* p < .001

Figura 49 – Índice de vazios - 300°C

## ANOVA a um fator

ANOVA a um fator (Welch)

	F	gl1	gl2	p
VAZIOS 300	0.641	2	2.80	0.590

Descritivas de Grupo

	Traço	N	Média	Desvio-padrão	Erro-padrão
VAZIOS 300	REF	3	1.26	0.1665	0.09615
	NTC FUN	3	1.35	0.0814	0.04702
	NTC NF	2	1.37	0.0141	0.01000

## Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	W	p
VAZIOS 300	0.966	0.862

Nota. Um p-value pequeno sugere a violação do pressuposto da normalidade

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	F	gl1	gl2	p
VAZIOS 300	3.81	2	5	0.099

[3]

## Testes Post Hoc

Teste Post-Hoc de Tukey - VAZIOS 300

		REF	NTC FUN	NTC NF
REF	Diferença média	—	-0.0900	-0.1133
	p-value	—	0.642	0.577
NTC FUN	Diferença média		—	-0.0233
	p-value		—	0.974
NTC NF	Diferença média			—
	p-value			—

Nota. \* p < .05, \*\* p < .01, \*\*\* p < .001

Figura 50 – Índice de vazios - 600°C

## ANOVA a um fator

ANOVA a um fator (Welch)

	F	gl1	gl2	p
VAZIOS 600	0.301	2	3.51	0.758

Descritivas de Grupo

	Traço	N	Média	Desvio-padrão	Erro-padrão
VAZIOS 600	REF	3	5.44	0.316	0.182
	NTC FUN	3	5.18	0.527	0.304
	NTC NF	3	5.30	0.188	0.108

## Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	W	p
VAZIOS 600	0.982	0.973

*Nota.* Um p-value pequeno sugere a violação do pressuposto da normalidade

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	F	gl1	gl2	p
VAZIOS 600	1.07	2	6	0.402

[3]

## Testes Post Hoc

Teste Post-Hoc de Tukey - VAZIOS 600

		REF	NTC FUN	NTC NF
REF	Diferença média	—	0.263	0.147
	p-value	—	0.677	0.881
NTC FUN	Diferença média		—	-0.117
	p-value		—	0.922
NTC NF	Diferença média			—
	p-value			—

*Nota.* \* p < .05, \*\* p < .01, \*\*\* p < .001

Figura 51 – Índice de vazios - 900°C

## ANOVA a um fator

ANOVA a um fator (Welch)

	F	gl1	gl2	p
VAZIOS 900	7.04	2	2.81	0.081

Descritivas de Grupo

	Traço	N	Média	Desvio-padrão	Erro-padrão
VAZIOS 900	REF	3	13.9	0.236	0.137
	NTC FUN	3	14.8	1.350	0.780
	NTC NF	3	17.4	1.514	0.874

## Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	W	p
VAZIOS 900	0.928	0.461

Nota. Um p-value pequeno sugere a violação do pressuposto da normalidade

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	F	gl1	gl2	p
VAZIOS 900	2.14	2	6	0.199

[3]

## Testes Post Hoc

Teste Post-Hoc de Tukey - VAZIOS 900

		REF	NTC FUN	NTC NF
REF	Diferença média	—	-0.927	-3.57 *
	p-value	—	0.625	0.023
NTC FUN	Diferença média		—	-2.65
	p-value		—	0.074
NTC NF	Diferença média			—
	p-value			—

Nota. \* p < .05, \*\* p < .01, \*\*\* p < .001

Figura 52 – Absorção - Temperatura ambiente

## ANOVA a um fator

ANOVA a um fator (Welch)

	F	gl1	gl2	p
ABSORÇÃO TA	5.82	2	14.7	0.014

Descritivas de Grupo

	TRAÇO	N	Média	Desvio-padrão	Erro-padrão
ABSORÇÃO TA	REF	9	0.512	0.1902	0.0634
	NTC FUN	9	0.684	0.0631	0.0210
	NTC NF	9	0.739	0.0690	0.0230

## Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	W	p
ABSORÇÃO TA	0.963	0.441

Nota. Um p-value pequeno sugere a violação do pressuposto da normalidade

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	F	gl1	gl2	p
ABSORÇÃO TA	8.44	2	24	0.002

[3]

## Testes Post Hoc

Teste Post-hoc de Games-Howell

		REF	NTC FUN	NTC NF
REF	Diferença média	—	-0.172	-0.2267 *
	p-value	—	0.066	0.018
NTC FUN	Diferença média		—	-0.0544
	p-value		—	0.219
NTC NF	Diferença média			—
	p-value			—

Nota. \* p < .05, \*\* p < .01, \*\*\* p < .001

Figura 53 – Absorção de água - 300°C

## ANOVA a um fator

ANOVA a um fator (Welch)

	<b>F</b>	<b>gl1</b>	<b>gl2</b>	<b>p</b>
ABSORÇÃO 300	NaN	2	NaN	NaN

Descritivas de Grupo

	<b>TRAÇO</b>	<b>N</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio-padrão</b>	<b>Erro-padrão</b>
ABSORÇÃO 300	REF	3	0.533	0.0551	0.0318
	NTC FUN	3	0.580	0.0346	0.0200
	NTC NF	2	0.610	0.0000	0.0000

## Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	<b>W</b>	<b>p</b>
ABSORÇÃO 300	0.928	0.494

*Nota.* Um p-value pequeno sugere a violação do pressuposto da normalidade

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	<b>F</b>	<b>gl1</b>	<b>gl2</b>	<b>p</b>
ABSORÇÃO 300	5.44	2	5	0.056

[3]

## Testes Post Hoc

Teste Post-Hoc de Tukey - ABSORÇÃO 300

		<b>REF</b>	<b>NTC FUN</b>	<b>NTC NF</b>
REF	Diferença média	—	-0.0467	-0.0767
	p-value	—	0.413	0.198
NTC FUN	Diferença média		—	-0.0300
	p-value		—	0.720
NTC NF	Diferença média			—
	p-value			—

*Nota.* \* p < .05, \*\* p < .01, \*\*\* p < .001

Figura 54 - Absorção de água - 600°C

## ANOVA a um fator

ANOVA a um fator (Welch)

	F	gl1	gl2	p
ABSORÇÃO 600	0.371	2	3.54	0.714

Descritivas de Grupo

	TRAÇO	N	Média	Desvio-padrão	Erro-padrão
ABSORÇÃO 600	REF	3	2.22	0.1266	0.0731
	NTC FUN	3	2.28	0.3001	0.1732
	NTC NF	3	2.30	0.0872	0.0503

## Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	W	p
ABSORÇÃO 600	0.977	0.950

Nota. Um p-value pequeno sugere a violação do pressuposto da normalidade

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	F	gl1	gl2	p
ABSORÇÃO 600	1.44	2	6	0.309

[3]

## Testes Post Hoc

Teste Post-Hoc de Tukey - ABSORÇÃO 600

		REF	NTC FUN	NTC NF
REF	Diferença média	—	-0.0600	-0.0833
	p-value	—	0.925	0.863
NTC FUN	Diferença média		—	-0.0233
	p-value		—	0.988
NTC NF	Diferença média			—
	p-value			—

Nota. \* p < .05, \*\* p < .01, \*\*\* p < .001

Figura 55 - Absorção de água - 900°C

## ANOVA a um fator

ANOVA a um fator (Welch)

	<b>F</b>	<b>gl1</b>	<b>gl2</b>	<b>p</b>
ABSORÇÃO 900	31.9	2	3.59	0.005

Descritivas de Grupo

	<b>TRAÇO</b>	<b>N</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio-padrão</b>	<b>Erro-padrão</b>
ABSORÇÃO 900	REF	3	6.16	0.101	0.0584
	NTC FUN	3	6.33	0.270	0.1559
	NTC NF	3	7.08	0.152	0.0876

## Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	<b>W</b>	<b>p</b>
ABSORÇÃO 900	0.981	0.971

Nota. Um p-value pequeno sugere a violação do pressuposto da normalidade

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	<b>F</b>	<b>gl1</b>	<b>gl2</b>	<b>p</b>
ABSORÇÃO 900	0.876	2	6	0.464

[3]

## Testes Post Hoc

Teste Post-Hoc de Tukey - ABSORÇÃO 900

		<b>REF</b>	<b>NTC FUN</b>	<b>NTC NF</b>
REF	Diferença média	—	-0.170	-0.913**
	p-value	—	0.545	0.002
NTC FUN	Diferença média		—	-0.743**
	p-value		—	0.007
NTC NF	Diferença média			—
	p-value			—

Nota. \* p < .05, \*\* p < .01, \*\*\* p < .001

Figura 56 – VPU - Temperatura ambiente

## ANOVA a um fator

ANOVA a um fator (Welch)

	<b>F</b>	<b>gl1</b>	<b>gl2</b>	<b>p</b>
VPU TA	11.2	2	15.9	<.001

Descritivas de Grupo

	<b>Traço</b>	<b>N</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio-padrão</b>	<b>Erro-padrão</b>
VPU TA	REF	9	4432	120.0	40.0
	NTC FUN	9	4165	115.3	38.4
	NTC NF	9	4269	99.7	33.2

## Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	<b>W</b>	<b>p</b>
VPU TA	0.931	0.074

Nota. Um p-value pequeno sugere a violação do pressuposto da normalidade

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	<b>F</b>	<b>gl1</b>	<b>gl2</b>	<b>p</b>
VPU TA	0.406	2	24	0.671

[3]

## Testes Post Hoc

Teste Post-Hoc de Tukey - VPU TA

		<b>REF</b>	<b>NTC FUN</b>	<b>NTC NF</b>
REF	Diferença média	—	266***	163*
	p-value	—	<.001	0.014
NTC FUN	Diferença média		—	-104
	p-value		—	0.142
NTC NF	Diferença média			—
	p-value			—

Nota. \* p < .05, \*\* p < .01, \*\*\* p < .001

Figura 57 – VPU - 300°C

## ANOVA a um fator

ANOVA a um fator (Welch)

	<b>F</b>	<b>gl1</b>	<b>gl2</b>	<b>p</b>
VPU 300	19.8	2	15.8	< .001

Descritivas de Grupo

	<b>Traço</b>	<b>N</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio-padrão</b>	<b>Erro-padrão</b>
VPU 300	REF	9	2213	108.9	36.3
	NTC FUN	9	1930	114.7	38.2
	NTC NF	9	1936	91.0	30.3

## Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	<b>W</b>	<b>p</b>
VPU 300	0.976	0.754

*Nota.* Um p-value pequeno sugere a violação do pressuposto da normalidade

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	<b>F</b>	<b>gl1</b>	<b>gl2</b>	<b>p</b>
VPU 300	0.315	2	24	0.733

[3]

## Testes Post Hoc

Teste Post-Hoc de Tukey - VPU 300

		<b>REF</b>	<b>NTC FUN</b>	<b>NTC NF</b>
REF	Diferença média	—	283***	276.56***
	p-value	—	< .001	< .001
NTC FUN	Diferença média		—	-6.00
	p-value		—	0.992
NTC NF	Diferença média			—
	p-value			—

*Nota.* \*  $p < .05$ , \*\*  $p < .01$ , \*\*\*  $p < .001$

Figura 58 – VPU - 600°C

**ANOVA a um fator (não-paramétrica)**

Kruskal-Wallis

	$\chi^2$	gl	p
VPU 600	0.599	2	0.741

**Comparações múltiplas Dwass-Steel-Critchlow-Fligner**

Comparações múltiplas - VPU 600

		W	p
REF	NTC FUN	-1.061	0.734
REF	NTC NF	0.000	1.000
NTC FUN	NTC NF	0.812	0.834

Figura 59 – Resistência à compressão - Temperatura Ambiente

## ANOVA a um fator

ANOVA a um fator (Welch)

	<b>F</b>	<b>gl1</b>	<b>gl2</b>	<b>p</b>
Res. Compressão TA	16.1	2	2.70	0.032

Descritivas de Grupo

	<b>Traço</b>	<b>N</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio-padrão</b>	<b>Erro-padrão</b>
Res. Compressão TA	REF	3	51.5	0.299	0.172
	NTC FUN	3	40.5	4.025	2.324
	NTC NF	3	41.5	4.126	2.382

## Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	<b>W</b>	<b>p</b>
Res. Compressão TA	0.927	0.454

*Nota.* Um p-value pequeno sugere a violação do pressuposto da normalidade

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	<b>F</b>	<b>gl1</b>	<b>gl2</b>	<b>p</b>
Res. Compressão TA	3.01	2	6	0.125

[3]

## Testes Post Hoc

Teste Post-Hoc de Tukey - Res. Compressão TA

		<b>REF</b>	<b>NTC FUN</b>	<b>NTC NF</b>
REF	Diferença média	—	11.1*	10.04*
	p-value	—	0.015	0.024
NTC FUN	Diferença média		—	-1.04
	p-value		—	0.924
NTC NF	Diferença média			—
	p-value			—

*Nota.* \*  $p < .05$ , \*\*  $p < .01$ , \*\*\*  $p < .001$

Figura 60 – Resistência à compressão - 300°C

## ANOVA a um fator

ANOVA a um fator (Welch)

	F	gl1	gl2	p
RES. COMPRESSÃO 300	91.8	2	2.94	0.002

Descritivas de Grupo

	TRAÇO	N	Média	Desvio-padrão	Erro-padrão
RES. COMPRESSÃO 300	REF	3	34.1	0.510	0.295
	NTC FUN	3	29.8	2.910	1.680
	NTC NF	3	18.1	1.790	1.034

## Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	W	p
RES. COMPRESSÃO 300	0.886	0.183

Nota. Um p-value pequeno sugere a violação do pressuposto da normalidade

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	F	gl1	gl2	p
RES. COMPRESSÃO 300	5.29	2	6	0.047

[3]

## Testes Post Hoc

Teste Post-hoc de Games-Howell

		REF	NTC FUN	NTC NF
REF	Diferença média	—	4.31	16.0**
	p-value	—	0.212	0.005
NTC FUN	Diferença média		—	11.7*
	p-value		—	0.015
NTC NF	Diferença média			—
	p-value			—

Nota. \* p < .05, \*\* p < .01, \*\*\* p < .001

Figura 61- Resistência à compressão - 600°C

## ANOVA a um fator

ANOVA a um fator (Welch)

	<b>F</b>	<b>gl1</b>	<b>gl2</b>	<b>p</b>
Res. Compressão 600	2.19	2	3.69	0.236

Descritivas de Grupo

	<b>Traço</b>	<b>N</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio-padrão</b>	<b>Erro-padrão</b>
Res. Compressão 600	REF	3	16.3	3.60	2.079
	NTC FUN	3	15.8	1.75	1.013
	NTC NF	3	13.1	1.40	0.808

## Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	<b>W</b>	<b>p</b>
Res. Compressão 600	0.986	0.988

*Nota.* Um p-value pequeno sugere a violação do pressuposto da normalidade

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	<b>F</b>	<b>gl1</b>	<b>gl2</b>	<b>p</b>
Res. Compressão 600	1.21	2	6	0.361

[3]

## Testes Post Hoc

Teste Post-Hoc de Tukey - Res. Compressão 600

		<b>REF</b>	<b>NTC FUN</b>	<b>NTC NF</b>
REF	Diferença média	—	0.473	3.14
	p-value	—	0.970	0.327
NTC FUN	Diferença média		—	2.67
	p-value		—	0.429
NTC NF	Diferença média			—
	p-value			—

*Nota.* \* p < .05, \*\* p < .01, \*\*\* p < .001

Figura 62 - Resistência à compressão - 900°C

## ANOVA a um fator

ANOVA a um fator (Welch)

	F	gl1	gl2	p
Res. Compressão 900	8.07	2	3.66	0.046

Descritivas de Grupo

	Traço	N	Média	Desvio-padrão	Erro-padrão
Res. Compressão 900	REF	3	7.91	0.374	0.216
	NTC FUN	3	7.61	0.792	0.457
	NTC NF	3	6.16	0.588	0.339

## Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	W	p
Res. Compressão 900	0.943	0.610

Nota. Um p-value pequeno sugere a violação do pressuposto da normalidade

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	F	gl1	gl2	p
Res. Compressão 900	1.47	2	6	0.302

[3]

## Testes Post Hoc

Teste Post-Hoc de Tukey - Res. Compressão 900

		REF	NTC FUN	NTC NF
REF	Diferença média	—	0.307	1.75 *
	p-value	—	0.817	0.029
NTC FUN	Diferença média		—	1.44
	p-value		—	0.061
NTC NF	Diferença média			—
	p-value			—

Nota. \* p < .05, \*\* p < .01, \*\*\* p < .001

Figura 63 - Resistência à tração – Temperatura ambiente

## ANOVA a um fator

ANOVA a um fator (Welch)

	<b>F</b>	<b>gl1</b>	<b>gl2</b>	<b>p</b>
Res. Tração TA	2.17	2	3.57	0.242

Descritivas de Grupo

	<b>Traço</b>	<b>N</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio-padrão</b>	<b>Erro-padrão</b>
Res. Tração TA	REF	3	8.41	0.353	0.204
	NTC FUN	3	8.43	1.181	0.682
	NTC NF	3	7.64	0.488	0.282

## Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	<b>W</b>	<b>p</b>
Res. Tração TA	0.914	0.344

Nota. Um p-value pequeno sugere a violação do pressuposto da normalidade

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	<b>F</b>	<b>gl1</b>	<b>gl2</b>	<b>p</b>
Res. Tração TA	2.24	2	6	0.188

[3]

## Testes Post Hoc

Teste Post-Hoc de Tukey - Res. Tração TA

		<b>REF</b>	<b>NTC FUN</b>	<b>NTC NF</b>
REF	Diferença média	—	-0.0133	0.777
	p-value	—	1.000	0.474
NTC FUN	Diferença média		—	0.790
	p-value		—	0.463
NTC NF	Diferença média			—
	p-value			—

Nota. \* p < .05, \*\* p < .01, \*\*\* p < .001

Figura 64 - Resistência à tração - 300°C

## ANOVA a um fator

ANOVA a um fator (Welch)

	F	gl1	gl2	p
Res.Tração 300	0.529	2	3.96	0.626

Descritivas de Grupo

	Traço	N	Média	Desvio-padrão	Erro-padrão
Res.Tração 300	REF	3	4.81	0.639	0.369
	NTC FUN	3	4.31	0.741	0.428
	NTC NF	3	4.97	0.816	0.471

## Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	W	p
Res.Tração 300	0.854	0.081

Nota. Um p-value pequeno sugere a violação do pressuposto da normalidade

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	F	gl1	gl2	p
Res.Tração 300	0.0692	2	6	0.934

[3]

## Testes Post Hoc

Teste Post-Hoc de Tukey - Res.Tração 300

		REF	NTC FUN	NTC NF
REF	Diferença média	—	0.493	-0.167
	p-value	—	0.705	0.959
NTC FUN	Diferença média		—	-0.660
	p-value		—	0.549
NTC NF	Diferença média			—
	p-value			—

Nota. \* p < .05, \*\* p < .01, \*\*\* p < .001

Figura 65 - Resistência à tração - 600°C

## ANOVA a um fator

ANOVA a um fator (Welch)

	<b>F</b>	<b>gl1</b>	<b>gl2</b>	<b>p</b>
Res. Tração 600	5.88	2	3.09	0.089

Descritivas de Grupo

	<b>Traço</b>	<b>N</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio-padrão</b>	<b>Erro-padrão</b>
Res. Tração 600	REF	3	2.76	0.121	0.0698
	NTC FUN	3	2.07	0.304	0.1756
	NTC NF	3	3.09	0.705	0.4068

## Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	<b>W</b>	<b>p</b>
Res. Tração 600	0.953	0.726

*Nota.* Um p-value pequeno sugere a violação do pressuposto da normalidade

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	<b>F</b>	<b>gl1</b>	<b>gl2</b>	<b>p</b>
Res. Tração 600	4.53	2	6	0.063

[3]

## Testes Post Hoc

Teste Post-Hoc de Tukey - Res. Tração 600

		<b>REF</b>	<b>NTC FUN</b>	<b>NTC NF</b>
REF	Diferença média	—	0.687	-0.337
	p-value	—	0.226	0.649
NTC FUN	Diferença média		—	-1.023
	p-value		—	0.070
NTC NF	Diferença média			—
	p-value			—

*Nota.* \* p < .05, \*\* p < .01, \*\*\* p < .001

Figura 66 - Resistência à tração - 900°C

## ANOVA a um fator

ANOVA a um fator (Welch)

	F	gl1	gl2	p
Res. Tração 900	9.53	2	3.26	0.043

Descritivas de Grupo

	Traço	N	Média	Desvio-padrão	Erro-padrão
Res. Tração 900	REF	3	1.90	0.1480	0.0854
	NTC FUN	3	1.49	0.0723	0.0418
	NTC NF	3	1.17	0.3151	0.1819

## Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	W	p
Res. Tração 900	0.958	0.781

Nota. Um p-value pequeno sugere a violação do pressuposto da normalidade

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	F	gl1	gl2	p
Res. Tração 900	1.67	2	6	0.265

[3]

## Testes Post Hoc

Teste Post-Hoc de Tukey - Res. Tração 900

		REF	NTC FUN	NTC NF
REF	Diferença média	—	0.407	0.730*
	p-value	—	0.112	0.011
NTC FUN	Diferença média		—	0.323
	p-value		—	0.211
NTC NF	Diferença média			—
	p-value			—

Nota. \* p < .05, \*\* p < .01, \*\*\* p < .001