

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

Programa de Pós-Graduação em Construção Civil

Luísa Araújo Rodrigues

**RETRAÇÃO, FLUÊNCIA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CONCRETOS  
PRODUZIDOS COM NANOTUBOS DE CARBONO SINTETIZADOS  
DIRETAMENTE SOBRE CLÍNQUER**

Belo Horizonte  
2023

Luísa Araújo Rodrigues

**RETRAÇÃO, FLUÊNCIA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CONCRETOS  
PRODUZIDOS COM NANOTUBOS DE CARBONO SINTETIZADOS  
DIRETAMENTE SOBRE CLÍNQUER**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestra em Construção Civil. Área de concentração: Tecnologia na Construção Civil. Linha de pesquisa: Materiais de Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. José Márcio Fonseca Calixto

Coorientadora: Prof. Dra. Adriana Guerra Gumieri

Belo Horizonte  
2023

R696r

Rodrigues, Luísa Araújo.

Retração, fluência e propriedades mecânicas de concretos produzidos com nanotubos de carbono sintetizados diretamente sobre clínquer [recurso eletrônico] / Luísa Araújo Rodrigues – 2023.

1 recurso online (149 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: José Márcio Fonseca Calixto.

Coorientadora: Adriana Guerra Gumieri.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices: f. 123-149.

Bibliografia: f. 114-122.

1. Construção civil – Teses. 2. Materiais de construção – Teses. 3. Concreto – Aditivos – Teses. 4. Concreto – Propriedades mecânicas – Teses. 5. Nanotubos de carbono – Teses. I. Calixto, José Márcio Fonseca, 1957-. II. Gumieri, Adriana Guerra. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 691(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL  
MESTRADO EM CONSTRUÇÃO CIVIL



## FOLHA DE APROVAÇÃO

RETRAÇÃO, FLUÊNCIA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM  
NANOTUBOS DE CARBONO SINTETIZADOS DIRETAMENTE SOBRE O CLÍNQUER

**LUÍSA ARAUJO RODRIGUES**

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Mestrado em CONSTRUÇÃO CIVIL, como requisito para obtenção do grau de Mestre em CONSTRUÇÃO CIVIL, área de concentração TECNOLOGIA NA CONSTRUÇÃO CIVIL.

Aprovada em 03 de outubro de 2023, pela banca constituída pelos membros:

Prof. José Márcio Fonseca Calixto - Orientador  
UFMG



Documento assinado digitalmente  
**JOSE MARCIO FONSECA CALIXTO**  
Data: 23/04/2024 13:13:03-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Adriana Guerra Gumieri** Assinado de forma digital por Adriana Guerra Gumieri  
Dados: 2023.10.03 17:26:08 -03'00'

Profª. Adriana Guerra Gumieri - Coorientadora  
UFMG



Documento assinado digitalmente  
**LUIZ ORLANDO LADEIRA**  
Data: 04/10/2023 20:20:00-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Luiz Orlando Ladeira  
UFMG

Prof. Tarcizo Cruz de Souza  
Gerdau Graphene



Documento assinado digitalmente  
**TARCIZO DA CRUZ COSTA DE SOUZA**  
Data: 05/10/2023 08:01:42-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profª. Nicole Pagan Hasparyk  
Furnas Centrais Elétricas



Documento assinado digitalmente  
**NICOLE PAGAN HASPARYK ANDRADE**  
Data: 06/10/2023 17:22:39-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Belo Horizonte, 03 de outubro de 2023.

## AGRADECIMENTOS

Apesar de muitas pedras ao longo do caminho, cheguei ao fim e não poderia deixar de agradecer à todas as pessoas que foram importantes nessa jornada.

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus e a Nossa Senhora por todas as bênçãos, inclusive a aprovação no mestrado. Obrigada por me darem a fé, a saúde e a força necessárias para chegar até aqui. Além de todas as dificuldades enfrentadas normalmente durante um mestrado, ainda enfrentei uma pandemia e nunca conseguirei agradecer o suficiente por ter toda a minha família presente comigo compartilhando essa conquista.

Sou e serei eternamente grata aos meus pais Paulo e Mayza, que nunca mediram esforços para darem o melhor para nossa família, e sempre me mostraram a importância da educação. Obrigada por desejarem o melhor para mim e por nunca me deixarem desistir. Vocês são a minha base e tudo que souo devo a vocês. Um agradecimento especial ao meu pai, mas agora como profissional. Vivenciei minha vida toda sua dedicação ao trabalho e à engenharia e minha meta é ter 10% do seu conhecimento e competência.

Ao meu irmão, Bernardo, que me incentivava do jeito dele, perguntando “e o mestrado, como tá?”. Você é exemplo de dedicação, inteligência e resiliência.

Minha gratidão ao meu orientador, Professor José Márcio Calixto, pela paciência, ensinamentos e pelo tempo dedicado a mim. Obrigada por ter acreditado e depositado sua confiança ao longo desses anos. Meu obrigada também ao Tarcizo Cruz, que sempre se mostrou disposto e paciente a orientar e compartilhar seu conhecimento.

Às amigas que ganhei durante o caminho, Anna e Laís, vocês foram essenciais. Levarei vocês comigo para sempre. Nossa amizade sempre será além do mestrado.

Aos amigos e amigas que mesmo não entendendo o que eu estava falando, muitas vezes escutaram minhas aflições e comemorações.

À equipe do Laboratório de Furnas, por todo o apoio para que os ensaios pudessem acontecer, especialmente aos laboratoristas Vander Oliveira, Paulo Arcanjo e Alcício José da Costa, e aos engenheiros Alfredo Liduário, Nicole Hasparyk, Solanda de Oliveira e Alexandre Castro.

Por fim, agradeço a FUNDEP e novamente aos meus pais pelo apoio financeiro.

*“Mestre não é quem sempre ensina, mas quem de repente aprende.”*

*Guimarães Rosa*

## RESUMO

O concreto é um compósito trifásico, e se apresenta nanoestruturado. Os processos que ocorrem em nanoescala interferem diretamente em seu desempenho. Importantes pesquisas vêm sendo desenvolvidas utilizando a nanotecnologia em materiais de construção. Nanotubos de carbono (NTC) são estruturas em formato cilíndrico, constituídos por folhas de grafeno que podem se apresentar em uma camada, os nanotubos de carbono de paredes simples, ou em camadas sobrepostas, os nanotubos de carbono de paredes múltiplas. NTC vem sendo aplicados em pastas, argamassas e concretos como forma de melhorar o desempenho destes. Neste trabalho foi avaliado o comportamento de concretos do tipo bombeado produzidos com NTC sintetizados diretamente sobre o clínquer. Para este estudo, foi utilizado o cimento CP V – ARI, que foi substituído em parte pelo clínquer nanoestruturado nas quantidades de 0,2% e 0,4% em relação à massa de material cimentício total. O desempenho desses concretos foi comparado com um concreto de referência, sem a incorporação do clínquer nanoestruturado. Avaliou-se a influência da adição dos NTC na trabalhabilidade, na retração autógena, na fluência, na resistência à compressão, no módulo de elasticidade, na resistência à tração por compressão diametral, na resistência à tração na flexão e no teste de dano de rigidez. A avaliação dos resultados mostra que os melhores desempenhos nas propriedades mecânicas foram obtidos nos concretos contendo 0,2% de NTC, apesar de não apresentarem ganhos significativos. Nos ensaios de retração por secagem e fluência básica, a incorporação de NTC mostrou-se promissora resultando em valores de 9% e 14% menores aos 90 dias, respectivamente, para o teor de 0,4% de NTC.

**Palavras-chave:** concreto; clínquer nanoestruturado; nanotubos de carbono; desempenho mecânico; retração; fluência.

## ABSTRACT

Concrete is a nanostructured three-phase composite. Processes that take place at the nanoscale directly interfere with its performance. Important research has been developed using nanotechnology in building materials. Carbon nanotubes (CNTs) are cylinders in shape formed by graphene sheets. They can be presented in one layer, the single-walled carbon nanotubes, or in superimposed layers, the multi-walled carbon nanotubes. CNTs have been applied to pastes, mortars, and concrete as a way to improve their performance. In this work, the behavior of concretes produced with CNTs synthesized directly on clinker was evaluated. For this study, CP V – ARI cement was used, which was partially replaced by nanostructured clinker containing 0.2% and 0.4% carbon nanotubes to the total mass of cementitious materials. The performance of these concretes was compared with a reference concrete, without nanotubes. The influence of the addition of CNTs on workability, autogenous shrinkage, creep, compressive strength, elastic modulus, splitting, and flexural tensile strength as well as in the stiffness damage test was evaluated. The analysis of the results of mechanical properties shows that the best performance was obtained in concretes containing 0.2% of NTC, despite not presenting significant gains. In the drying shrinkage and basic creep tests, the incorporation of NTCs proved to be promising resulting in values 9% and 14% lower at 90 days, respectively, for concretes with 0.4% of CNTs.

**Keywords:** concrete; nanostructured clinker; carbon nanotubes; mechanical properties; shrinkage and creep.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Tamanhos de partículas e área superficial específica de materiais relacionados ao concreto .....	25
Figura 2.2 - Evolução média de resistência à compressão dos diferentes tipos de cimento Portland.....	29
Figura 2.3 - Representação esquemática de diferentes alótropos de carbono .....	33
Figura 2.4 - Nanotubos de carbono de paredes simples .....	34
Figura 2.5 - Nanotubos de carbono de paredes múltiplas .....	34
Figura 3.1 - Organograma da disposição do programa experimental.....	46
Figura 3.2 - Curvas de composição granulométrica do agregado miúdo .....	48
Figura 3.3 - Curva de distribuição granulométrica do agregado graúdo .....	49
Figura 3.4 - Fluxograma de obtenção do clínquer nanoestruturado .....	51
Figura 3.5 - Informações do clínquer nanoestruturado utilizado na pesquisa .....	52
Figura 3.6 - Análise termogravimétrica do clínquer nanoestruturado do lote CNTC00319 ....	53
Figura 3.7 - Imagens de MEV do clínquer nanoestruturado do lote CNTC00120.....	53
Figura 3.8 - Imagem de MET do clínquer nanoestruturado do lote CNTC00120.....	54
Figura 3.9 - Distribuição dos diâmetros dos NTC utilizados na pesquisa.....	54
Figura 3.10 - Betoneira utilizada para mistura dos materiais .....	57
Figura 3.11 - Realização do ensaio de abatimento de tronco de cone.....	58
Figura 3.12 - Medidor utilizado.....	59
Figura 3.13 - Adensamento dos corpos de prova com vibrador de imersão .....	60
Figura 3.14 - Extensômetros posicionados no corpo de prova para o ensaio de retração autógena .....	60
Figura 3.15 – Posicionamento do extensômetro no ensaio de fluência.....	61
Figura 3.16 - Corpos de prova logo após a moldagem.....	61
Figura 3.17 – Retificação dos corpos de prova .....	62
Figura 3.18 – Corpos de prova cilíndricos preparados para ensaios de propriedades mecânicas .....	62
Figura 3.19 - Ensaio de resistência à compressão .....	64
Figura 3.20 - Ensaio de módulo de elasticidade .....	65
Figura 3.21 - Ensaio de tração na flexão .....	66
Figura 3.22 - Tiras de madeira para auxílio no ensaio .....	67
Figura 3.23 - Tiras de madeira posicionadas nos corpos de prova.....	67

Figura 3.24 - Ensaio de resistência à tração por compressão diametral .....	68
Figura 3.25 - Extensômetros posicionados no corpo de prova para o ensaio de retração autógena .....	70
Figura 3.26 - Leitura da retração autógena.....	70
Figura 3.27 - Corpos de prova utilizados para o ensaio de retração hidráulica.....	71
Figura 3.28 - Aparelho medidor utilizado no ensaio de retração hidráulica .....	71
Figura 3.29 - Corpo de prova sendo medido no aparelho medidor .....	71
Figura 3.30 - Sistema de ensaio de fluência básica .....	73
Figura 3.31 - Índice de rigidez .....	76
Figura 4.1 - Slump Test .....	77
Figura 4.2 - Resultados do slump test do concreto.....	78
Figura 4.3 - Resultados do ensaio do teor de ar incorporado .....	79
Figura 4.4 - Resultados de resistência à compressão por idade.....	80
Figura 4.5 - Resultados de módulo de elasticidade por idade .....	82
Figura 4.6 - Corpos de prova após a realização do ensaio de resistência à tração por compressão diametral .....	83
Figura 4.7 - Resultados de resistência à tração por compressão diametral por idade .....	84
Figura 4.8 - Corpo de prova após a realização do ensaio de resistência à tração na flexão .....	85
Figura 4.9 - Resultados de resistência à tração na flexão por idade .....	86
Figura 4.10 - Correlação módulo de elasticidade e resistência à compressão - CREF .....	87
Figura 4.11 - Correlação módulo de elasticidade e resistência à compressão - CNTC0,2.....	88
Figura 4.12 - Correlação módulo de elasticidade e resistência à compressão - CNTC0,4.....	88
Figura 4.13 - Correlação resistência à tração por compressão diametral e resistência à compressão – CREF .....	89
Figura 4.14 - Correlação resistência à tração por compressão diametral e resistência à compressão - CNTC0,2 .....	90
Figura 4.15 - Correlação resistência à tração por compressão diametral e resistência à compressão - CNTC0,4 .....	90
Figura 4.16 - Correlação resistência à tração na flexão e resistência à compressão - CREF ...	91
Figura 4.17 - Correlação resistência à tração na flexão e resistência à compressão – CNTC0,2 .....	92
Figura 4.18 - Correlação resistência à tração na flexão e resistência à compressão – CNTC0,4 .....	92
Figura 4.19 - Retração autógena para CREF .....	93

Figura 4.20 - Retração autógena para CNTC0,2 .....	93
Figura 4.21 - Retração autógena para CNTC0,4 .....	94
Figura 4.22 – Resultados do ensaio de retração autógena.....	95
Figura 4.23 - Retração por secagem para CREF .....	96
Figura 4.24 - Retração por secagem para CNTC0,2.....	96
Figura 4.25 - Retração por secagem para CNTC0,4.....	97
Figura 4.26 - Resultados do ensaio de retração por secagem.....	98
Figura 4.27 - Fluência básica para CREF.....	99
Figura 4.28 - Fluência básica para CNTC0,2 .....	99
Figura 4.29 - Fluência básica para CNTC0,4 .....	100
Figura 4.30 - Resultados do ensaio de fluência básica .....	101
Figura 4.31 - Resultados para o coeficiente de fluência do CREF.....	102
Figura 4.32 - Coeficiente de fluência para CNTC0,2.....	102
Figura 4.33 - Coeficiente de fluência para CNTC0,4.....	103
Figura 4.34 - Resultados de PDI aos 28 dias .....	105
Figura 4.35 - Resultados de SDI aos 28 dias .....	105
Figura 4.36 - Resultado do teste de dano de rigidez (SDT) para CREF aos 28 dias.....	106
Figura 4.37 - Resultado do teste de dano de rigidez (SDT) para CNTC0,2 aos 28 dias .....	107
Figura 4.38 - Resultado do teste de dano de rigidez (SDT) para CNTC0,4 aos 28 dias .....	107
Figura 4.39 - Comparativo do ciclo 1 dos testes do dano de rigidez.....	108
Figura 4.40 - Comparativo do ciclo 2 dos testes do dano de rigidez.....	108
Figura 4.41 - Comparativo do ciclo 3 dos testes do dano de rigidez.....	109
Figura 4.42 - Comparativo do ciclo 4 dos testes do dano de rigidez.....	109
Figura 4.43 - Comparativo do ciclo 5 dos testes do dano de rigidez.....	110
Figura 8.1 – Boxplot para o fator concentração de NTC para a resistência à compressão dos concretos.....	134
Figura 8.2 - Boxplot para o fator idade para a resistência à compressão dos concretos .....	134
Figura 8.3 - Média da resistência à compressão nas interações dos fatores para a variável resistência à compressão dos concretos.....	135
Figura 8.4 - Boxplot para o fator teor de NTC na variável módulo de elasticidade.....	138
Figura 8.5 - Boxplot para o fator idade na variável módulo de elasticidade.....	138
Figura 8.6 - Gráfico de interação dos fatores concentração de NTC e idade dos concretos na variável módulo de elasticidade .....	139

Figura 8.7 - Boxplot para o fator concentração para a variável resistência à tração por compressão diametral .....	142
Figura 8.8 - Boxplot para o fator idade para a variável resistência à tração na compressão diametral .....	142
Figura 8.9 - Gráfico de interação dos fatores concentração de NTC e idade do concreto na resposta para a resistência à tração por compressão diametral.....	143
Figura 8.10 - Boxplot para o fator concentração de NTC para a variável resistência à tração na flexão .....	146
Figura 8.11 - Boxplot para o fator idade para a variável resistência à tração na flexão.....	146
Figura 8.12 - Distribuição da resistência à tração na flexão nos corpos de prova condicionados aos fatores de concentração de NTC e idade do concreto .....	147
Figura 8.13 - Média da resistência à tração na flexão nas interações dos fatores para a variável resistência à à tração dos concretos .....	148

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Tipos de cimento Portland comercializados no Brasil .....	27
Tabela 2.2 - Requisitos físicos e mecânicos .....	28
Tabela 2.3 - Comparação de propriedades mecânicas dos nanotubos.....	34
Tabela 2.4 - Classes de consistência.....	37
Tabela 3.1 - Caracterização do agregado miúdo .....	47
Tabela 3.2 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo .....	48
Tabela 3.3 – Caracterização do agregado graúdo.....	49
Tabela 3.4 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo .....	49
Tabela 3.5 – Caracterização do cimento Portland .....	50
Tabela 3.6 – Composição química do cimento Portland .....	50
Tabela 3.7 - Dosagens estudadas e propriedades do concreto.....	56
Tabela 3.8 – Quantidade de corpos de prova moldados para cada ensaio.....	63
Tabela 4.1 - Resumo de resistência à compressão por idade.....	80
Tabela 4.2 - Resumo dos resultados de módulo de elasticidade por idade .....	81
Tabela 4.3 - Resumo dos resultados de resistência à tração por compressão diametral por idade .....	83
Tabela 4.4 - Resumo dos resultados de resistência à tração na flexão por idade .....	85
Tabela 4.5 - Valores do coeficiente de fluência ao longo do tempo .....	103
Tabela 4.6 - Resumo dos resultados de PDI e SDI aos 28 dias .....	104
Tabela 4.7 - Classificação do nível de dano do concreto .....	106
Tabela 8.1 - Valores de resistência à compressão para CREF .....	123
Tabela 8.2 - Valores de resistência à compressão para CNTC0,2.....	123
Tabela 8.3 - Valores de resistência à compressão para CNTC0,4.....	124
Tabela 8.4 - Valores de módulo de elasticidade para CREF .....	124
Tabela 8.5 - Valores de módulo de elasticidade para CNTC0,2 .....	124
Tabela 8.6 - Valores de módulo de elasticidade para CNTC0,4 .....	125
Tabela 8.7 - Valores de resistência à tração por compressão diametral para CREF .....	125
Tabela 8.8 - Valores de resistência à tração por compressão diametral para CNTC0,2 .....	125
Tabela 8.9 - Valores de resistência à tração por compressão diametral para CNTC0,4 .....	126
Tabela 8.10 - Valores de resistência à tração na flexão para CREF.....	126
Tabela 8.11 - Valores de resistência à tração na flexão para CNTC0,2 .....	126
Tabela 8.12 - Valores de resistência à tração na flexão para CNTC0,4 .....	127

Tabela 8.13 - Comparativo dos valores de retração hidráulica .....	127
Tabela 8.14 – Comparativo dos valores de retração autógena .....	128
Tabela 8.15 – Valores de leitura do ensaio de fluência para CREF .....	129
Tabela 8.16 - Valores de leitura do ensaio de fluência para CNTC0,2 .....	130
Tabela 8.17 - Valores de leitura do ensaio de fluência para CNTC0,4 .....	130
Tabela 8.18 - Comparativo dos valores de fluência .....	131
Tabela 8.19 - Valores de PDI obtidos no teste de dano de rigidez.....	132
Tabela 8.20 - Valores de SDI obtidos no teste de dano de rigidez.....	132
Tabela 8.21 - Resumo dos valores de resistência à compressão e número de frequência de replicação condicionado aos fatores .....	133
Tabela 8.22 - Teste para significância dos fatores para a variável resistência à compressão dos concretos .....	135
Tabela 8.23 - Comparação múltipla entre os níveis do fator idade para a variável resistência à compressão dos concretos .....	136
Tabela 8.24 - Média e indicativo de diferença significativa dos níveis do fator idade para a variável resistência à compressão dos concretos .....	136
Tabela 8.25 - Comparação múltipla entre os níveis do fator concentração de NTC para a variável resistência à compressão dos concretos .....	137
Tabela 8.26 - Média e indicativo de diferença significativa dos níveis do fator concentração de NTC para a variável resistência à compressão dos concretos .....	137
Tabela 8.27 - Resumo dos valores em GPa dos módulos de elasticidade e do número e frequência de replicação condicionado aos fatores .....	137
Tabela 8.28 - Teste para significância dos fatores na variável módulo de elasticidade dos concretos .....	140
Tabela 8.29 - Comparação múltipla entre os níveis do fator idade para a variável módulo de elasticidade dos concretos .....	140
Tabela 8.30 - Média e indicativo de diferença significativa dos níveis do fator idade para a variável módulo de elasticidade dos concretos.....	141
Tabela 8.31 - Resumo dos valores de resistência à tração por compressão diametral (em MPa) e do número e frequência de replicação condicionado aos fatores.....	141
Tabela 8.32 - Teste para significância dos fatores para a variável resistência à tração por compressão diametral .....	143
Tabela 8.33 - Comparação múltipla entre os níveis do fator idade para a variável resistência à tração por compressão diametral .....	144

Tabela 8.34 - Média e indicativo de diferença significativa dos níveis do fator idade para a variável resistência à tração por compressão diametral.....	144
Tabela 8.35 - Resumo do valor da resistência à tração na flexão (MPa) e do número e frequência de replicação condicionado aos fatores .....	145
Tabela 8.36 - Teste para significância dos fatores para a variável resistência à tração na flexão .....	147
Tabela 8.37 - Comparação múltipla entre os níveis do fator idade para a variável resistência à tração na flexão considerando a interação da concentração de NTC no concreto .....	149
Tabela 8.38 - Média e indicativo de diferença significativa dos níveis do fator idade para a variável resistência à tração na flexão considerando a interação da concentração de NTC no concreto .....	149

## LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Reações químicas no forno de cimento .....	26
Quadro 2.2 - Principais compostos do cimento Portland .....	26
Quadro 3.1 - Características do clínquer nanoestruturado .....	51
Quadro 3.2 – Dados do aditivo ViscoCrete®-6900 .....	55

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
a/c	Relação água/cimento
ANOVA	<i>Analysis of variance</i>
ARI	Alta resistência inicial
BET	Ensaio de área superficial
CNTC0,2	Concreto contendo 0,2% de NTC
CNTC0,4	Concreto contendo 0,4% de NTC
CPB	Cimento Portland branco não estrutural
CPP	Cimento para poços petrolíferos
CPV ARI	Cimento Portland do tipo V - Alta resistência inicial
CREF	Concreto de referência
CTNano	Centro de Tecnologia em Nanomateriais e Grafeno
CVD	<i>Chemical vapor deposition</i>
DRX	Difração de raio-X
GO	Goiás
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
NBR	Norma Brasileira Registrada
NM	Norma Mercosul
NTC	Nanotubos de carbono
NTCPM	Nanotubos de carbono de paredes múltiplas
NTCPS	Nanotubos de carbono de paredes simples
PDI	<i>Plastic deformation index</i>
SDI	<i>Stiffness damage index</i>
SDT	<i>Stiffness damage test</i>
TG	Técnica de termogravimetria
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais

## LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem ou por cento
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de alumínio
C <sub>2</sub> S	Silicato dicálcico
C <sub>3</sub> A	Aluminato tricálcico
C <sub>3</sub> S	Silicato tricálcico
C <sub>4</sub> AF	Ferroaluminato tetracálcico
CaO	Óxido de cálcio
CaSO <sub>4</sub>	Sulfato de cálcio
Co	Cobalto
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono (gás carbônico)
Fe	Ferro
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de ferro
K	Potássio
MgO	Óxido de magnésio
Na	Sódio
Ni	Níquel
SiO <sub>2</sub>	Óxido de silício
SO <sub>3</sub>	Trióxido de enxofre
TiO <sub>2</sub>	Óxido de titânio
ε	Letra grega <i>epsilon</i> - deformação
π	Letra grega <i>pi</i> - relação direta entre perímetro e diâmetro de uma circunferência
σ	Letra grega <i>sigma</i> - tensão

## LISTA DE UNIDADES

cm	centímetro
cm <sup>2</sup>	centímetro quadrado
cm <sup>3</sup>	centímetro cúbico
g	grama
GPa	giga Pascal
kg	quilograma
L	litro
m <sup>2</sup>	metro quadrado
m <sup>3</sup>	metro cúbico
min	minuto
mm	milímetro
MPa	mega Pascal
N	Newton
nm	nanômetro (10 <sup>-9</sup> metros)
°C	grau Celcius
s	segundo
TPa	tera Pascal
µm	micrômetro (10 <sup>-6</sup> metros)

## SUMÁRIO

---

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>22</b>
<b>1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....</b>	<b>22</b>
<b>1.2 JUSTIFICATIVA .....</b>	<b>23</b>
<b>1.3 OBJETIVO .....</b>	<b>24</b>
1.3.1 OBJETIVO GERAL .....	24
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	24
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>25</b>
<b>2.1 MATERIAIS CONSTITUINTES DE CONCRETOS CONTENDO NANOTUBOS DE CARBONO .....</b>	<b>26</b>
2.1.1 CIMENTO PORTLAND .....	26
2.1.2 AGREGADOS .....	30
2.1.3 ADITIVOS.....	31
2.1.4 NANOTUBOS DE CARBONO .....	32
<b>2.2 COMPORTAMENTO DO CONCRETO CONTENDO NANOTUBOS DE CARBONO NO ESTADO FRESCO .....</b>	<b>36</b>
2.2.1 TRABALHABILIDADE.....	36
2.2.2 TEOR DE AR INCORPORADO.....	39
<b>2.3 COMPORTAMENTO DO CONCRETO CONTENDO NANOTUBOS DE CARBONO NO ESTADO ENDURECIDO.....</b>	<b>40</b>
<b>3. PROGRAMA EXPERIMENTAL, MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>46</b>
<b>3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>46</b>
<b>3.2 MATERIAIS .....</b>	<b>47</b>
3.2.1 AGREGADO MIÚDO .....	47
3.2.2 AGREGADO GRAÚDO.....	48
3.2.3 CIMENTO PORTLAND .....	50
3.2.4 CLÍNQUER NANOESTRUTURADO.....	51
3.2.5 ADITIVO.....	55
<b>3.3 MÉTODOS .....</b>	<b>55</b>

3.3.1 DOSAGENS ESTUDADAS .....	55
3.3.2 PRODUÇÃO DOS CONCRETOS .....	56
3.3.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS NO ESTADO FRESCO .....	57
3.3.4 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA .....	59
3.3.5 ENSAIOS DOS CONCRETOS NO ESTADO ENDURECIDO .....	63
<b>4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>77</b>
<b>4.1 RESULTADOS E ANÁLISE DOS ENSAIOS DOS CONCRETOS NO ESTADO FRESCO .....</b>	<b>77</b>
4.1.1 ENSAIO DE ABATIMENTO DE TRONCO DE CONE .....	77
4.1.2 ENSAIO DE TEOR DE AR INCORPORADO .....	78
<b>4.2 RESULTADOS E ANÁLISE DOS ENSAIOS DOS CONCRETOS NO ESTADO ENDURECIDO .....</b>	<b>79</b>
4.2.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS .....	79
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>111</b>
<b>6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>113</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>114</b>
<b>8. APÊNDICE .....</b>	<b>123</b>

# 1 INTRODUÇÃO

---

## 1.1 Considerações iniciais

Desde 2005, Sobolev e Gutiérrez previam que a próxima revolução industrial seria a nanotecnologia. Apesar da ciência ligada à nanotecnologia ser recente, os dispositivos e objetos ligados a essa tecnologia existem na Terra desde o início da vida. Exemplo disso é o desempenho mecânico de biomateriais como ossos ou conchas de moluscos, que ocorre devido à presença de nanocristais de compostos de cálcio.

O concreto, material mais onipresente do mundo, é um material compósito nanoestruturado e multifásico que se degrada com o tempo. É composto por uma fase amorfa, cristais de tamanho nanométrico a micrométrico e água. As propriedades e os mecanismos de degradação deste material ocorrem em várias escalas de comprimento (nano, micro e macro). O silicato de cálcio hidratado (C-S-H), é a “cola” que mantém o concreto unido e é um nanomaterial. Os processos que ocorrem em nanoescala interferem diretamente nas propriedades do desempenho do concreto (SANCHEZ e SOBOLEV, 2010).

Em 1991, Sumio Iijima sintetizou pela primeira vez os nanotubos de carbono (NTC), e os descreveu como moléculas de carbono com propriedades especiais. Desde então são feitos vários estudos para avaliar sua aplicação em diversas áreas. No setor construtivo, os nanotubos de carbono se destacam devido às suas propriedades mecânicas, elétricas e térmicas.

O número de trabalhos publicados sobre o uso de NTC na área de engenharia civil é grande. Tratando-se de materiais cimentícios, a maioria dos trabalhos aborda a aplicação de NTC em pastas ou argamassas; porém, a utilização em concretos ainda é pouco explorada. Os trabalhos tratam, em sua maioria, da mistura física dos NTC, o que altera a trabalhabilidade das pastas, argamassas e concretos. Os NTC têm a tendência de aglomerar-se, causando dificuldade de dispersão na mistura. Diante de tal desafio, pesquisadores do CTNano desenvolveram o nanotubo de carbono sintetizado diretamente sobre o clínquer, ou seja, um tipo de cimento nanoestruturado (LADEIRA *et al.*, 2016).

Neste sentido, esta dissertação tem como tema a análise do comportamento de concretos fabricados com a mistura de NTC sintetizados diretamente sobre clínquer, onde parte do cimento utilizado na produção dos concretos foi substituída por clínquer nanoestruturado de

forma a obter-se diferentes teores de NTC. O desempenho destes foi comparado com um concreto de referência, que não continha nanotubos.

## **1.2 Justificativa**

Estados Unidos e Canadá consideram o investimento no estudo das estruturas de concreto como um dos mais importantes investimentos na ciência e tecnologia para obter e manter a qualidade de vida de seu povo e a liderança de seu parque industrial. Entende-se que o concreto é um material atual e de importância vital para a economia e o negócio da construção. (HELENE e ANDRADE, 2010)

Considerando que o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), um importante composto do concreto, é um nanomaterial e que resultados observados pela adição de partículas micrométricas no concreto são satisfatórios, partículas ainda menores, em escala nanométrica, prometem dar ao concreto resultados ainda melhores. Segundo Sanchez e Sobolev (2010), o comportamento do concreto pode ser manipulado por meio da incorporação de nanopartículas e nanotubos.

Em 2013, os autores Madhavi *et al.* já apontavam que os nanotubos de carbono (NTC) mostravam a capacidade de aprimorar as propriedades mecânicas do concreto. Estudar essa aplicação pode resultar em materiais mais fortes e duráveis, fundamentais para a segurança e a longevidade das estruturas construídas. Além disso, a busca por soluções sustentáveis na construção civil é uma prioridade global. O estudo dos nanotubos de carbono no concreto pode levar a materiais mais eficientes, com menor consumo de cimento e, conseqüentemente, com menor impacto ambiental, contribuindo para práticas construtivas mais sustentáveis.

Baseando-se na revisão bibliográfica sobre o tema, foi observada a necessidade de expandir os conhecimentos sobre o comportamento do concreto com a incorporação de nanotubos de carbono. Com o desenvolvimento do clínquer nanoestruturado no CTNano, viu-se a possibilidade de melhorar as propriedades mecânicas do concreto, sem a dificuldade da dispersão do nanomaterial.

## 1.3 Objetivo

### 1.3.1 Objetivo geral

A presente dissertação teve como objetivo geral analisar o comportamento de concretos produzidos com nanotubos de carbono (NTC) sintetizados diretamente sobre o clínquer. Foram utilizados teores de 0,2% e 0,4% de NTC em relação à massa total de material cimentício. O comportamento destes foi comparado com um concreto de referência sem nanotubos.

### 1.3.2 Objetivos específicos

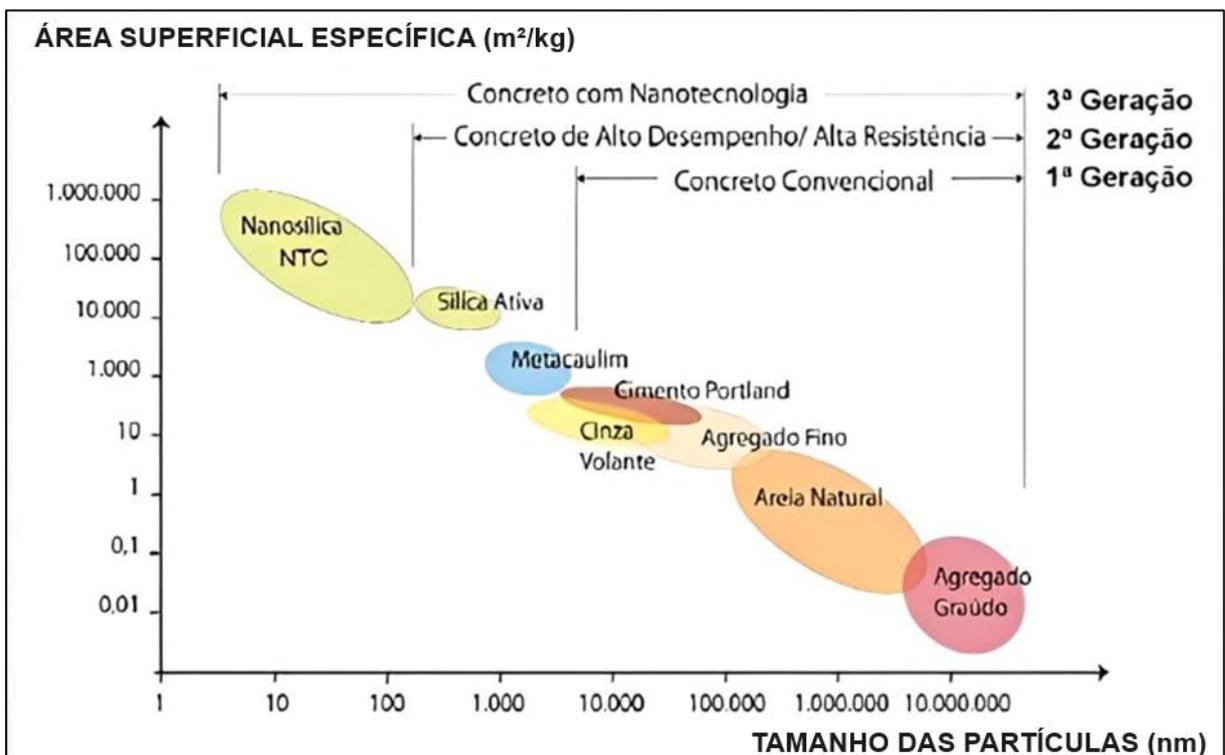
Os objetivos específicos desta pesquisa foram:

- Analisar a trabalhabilidade dos concretos no estado fresco por meio do ensaio de abatimento de tronco de cone e de teor de ar incorporado.
- Avaliar a retração autógena e por secagem bem como a fluência básica dos concretos.
- Avaliar, nas idades de 3, 7 e 28 dias, as propriedades mecânicas, como a resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade e resistência à tração na flexão dos concretos.
- Analisar, na idade de 28 dias, parâmetros relacionados à rigidez do material por meio do ensaio de dano de rigidez.
- Comparar os resultados obtidos com os resultados encontrados na literatura.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Sanchez e Sobolev (2010) relatam que o uso de nanopartículas não é recente. Durante milênios as nanopartículas foram adicionadas à produção de cerâmica sem o conhecimento de suas funções; porém, o uso consciente e científico de partículas em tamanho nanométrico começou nas últimas décadas e o constitui a nanotecnologia. As nanopartículas tem uma elevada área de superfície em relação ao seu volume fornecendo enorme potencial para reatividade química. A Figura 2.1 compara as áreas superficiais específicas de materiais relacionados ao concreto.

Figura 2.1 - Tamanhos de partículas e área superficial específica de materiais relacionados ao concreto



Fonte: Adaptado de Sobolev e Gutiérrez (2005 *apud* Medeiros *et al.* 2015)

A revisão bibliográfica apresentada a seguir se refere exclusivamente a concretos contendo nanotubos de carbono. Essa revisão inclui os materiais constituintes bem como as propriedades tanto no estado fresco quanto no estado endurecido.

## 2.1 Materiais constituintes de concretos contendo nanotubos de carbono

### 2.1.1 Cimento Portland

Segundo Kihara e Centurione (2005) cimentos são substâncias ligantes capazes de unir fragmentos ou massas de materiais sólidos em um corpo compacto. Dentre esses ligantes, o cimento Portland é o aglomerante utilizado na construção civil. O cimento Portland é produzido através do aquecimento da mistura de calcário e argila ou materiais semelhantes em sua composição e reatividade, normalmente em uma temperatura aproximada de 1450 °C. Nessa fusão o clínquer é produzido e misturado com sulfato de cálcio e moído finamente, produzindo o cimento (TAYLOR, 1997). As reações químicas que acontecem no forno de cimento poder expressas como mostra o Quadro 2.1.

Quadro 2.1 – Reações químicas no forno de cimento

Elementos constituintes		Compostos resultantes
Calcário	→	CaO + CO <sub>2</sub>
Argila	→	SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Argila + Calcário	→	$\left\{ \begin{array}{l} 3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \\ 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \\ 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \\ 4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \end{array} \right.$

Fonte: Mehta e Monteiro (2014)

Os principais constituintes do cimento são os quatro compostos mostrados no Quadro 2.1. O Quadro 2.2 mostra os seus nomes e abreviaturas utilizadas.

Quadro 2.2 - Principais compostos do cimento Portland

Nome do composto	Composição em óxidos	Abreviatura
Silicato tricálcico	3CaO.SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S
Silicato dicálcico	2CaO.SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S
Aluminato tricálcico	3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A
Ferroaluminato tetracálcico	4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> AF

Fonte: Neville (2016)

Até a década de 1970 havia no Brasil praticamente um único tipo de cimento Portland. Com a evolução dos conhecimentos técnicos sobre o assunto, novos tipos começaram a ser fabricados. Atualmente o mercado nacional dispõe de onze tipos básicos de cimento Portland, os quais estão apresentados no Tabela 2.1. Esses tipos se diferenciam de acordo com a proporção de clínquer, de gesso e de adições, tais como escórias, pozolanas e fíler calcário, acrescentadas no processo de moagem. A Tabela 2.1 também mostra a quantidade de cada componente em cada

tipo de cimento. Além dos apresentados no quadro, também são produzidos o cimento Portland branco não estrutural (CPB) e cimentos para poços petrolíferos (CPP-Classe G).

Tabela 2.1 – Tipos de cimento Portland comercializados no Brasil

Nome Técnico do Cimento Portland	Sigla	Classes	Sufixo	Conteúdo dos componentes (%)			
				Clínquer + gesso	Escória	Pozolana	Fíler calcário
Comum	CP I			95 – 100		0 – 5	
	CP I-S			90 – 94	0	0	6 – 10
Composto com escória granulada de alto forno	CP II-E			51 – 94	6 – 34	0	0 – 15
Composto com material pozolânico	CP II-Z	25, 32 ou 40		71 – 94	0	6 – 14	0 – 15
Composto com material carbonático	CP II-F		RS ou BC	75 – 89	0	0	11 – 25
Alto Forno	CP III			25 – 65	35 – 75	0	0 – 10
Pozolânico	CP IV			45 – 85	0	15 – 50	0 – 10
Alta Resistência Inicial	CP V <sup>a</sup>	ARI		90 – 100	0	0	0 – 10
Branco	Estrutural	25, 32 ou 40		75 – 100	-	-	0 – 25
	Não estrutural	CPB		50 – 74	-	-	26 – 50

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

Fonte: ABNT NBR 16697 (2018)

Cada cimento deve atender aos valores determinados na norma NBR 16697 (ABNT, 2018) de resíduo na peneira com aberturas de 75 µm, tempo de início de pega, expansibilidade a quente, resistência à compressão nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias e índice de brancura. A Tabela 2.2 apresenta essas exigências físico-mecânicas dos cimentos.

De forma geral, todos os tipos de cimento Portland são adequados a todos os tipos de estruturas e aplicações. De acordo com Battagin (2011), existem, entretanto, alguns tipos de cimento que são mais recomendáveis para determinadas aplicações. Os cimentos CP I e CP II são destinados a aplicações gerais, enquanto o CP III, CP IV e CP V são melhores aproveitados em situações específicas.

O cimento utilizado nessa pesquisa é o CP V – ARI, portanto o próximo tópico abordará suas características e especificidades.

Tabela 2.2 - Requisitos físicos e mecânicos

Sigla	Classe	Finura Resíduo na peneira 75 µm (%)	Tempo de início de pega (min)	Expansi bilidade a quente (mm)	Resistência à compressão (MPa)				Índice de brancura
					1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	
CP I	25	≤ 12,0	≥ 60	≤ 5	-	≥ 8	≥ 15	≥ 25	-
CP I-S	32	≤ 12,0	≥ 60	≤ 5	-	≥ 10	≥ 20	≥ 32	-
CP II-E									
CP II-F	40	≤ 10,0	≥ 60	≤ 5	-	≥ 15	≥ 25	≥ 40	-
CP II-Z									
CP III	25	≤ 8,0	≥ 60	≤ 5	-	≥ 8	≥ 15	≥ 25	-
	32	≤ 8,0	≥ 60	≤ 5	-	≥ 10	≥ 20	≥ 32	-
CP IV	40	≤ 8,0	≥ 60	≤ 5	-	≥ 12	≥ 23	≥ 40	-
CP V	ARI	≤ 6,0	≥ 60	≤ 5	≥ 14	≥ 24	≥ 34	-	-
CPB	25	≤ 12 <sup>a</sup>	≥ 60	≤ 5		≥ 8	≥ 15	≥ 25	
Estrutural	32	≤ 12 <sup>a</sup>	≥ 60	≤ 5		≥ 10	≥ 20	≥ 32	≥ 78
	40	≤ 12 <sup>a</sup>	≥ 60	≤ 5		≥ 15	≥ 25	≥ 40	
CPB Não estrutural	-	≤ 12 <sup>a</sup>	≥ 60	≤ 5	-	≥ 5	≥ 7	≥ 10	≥ 82

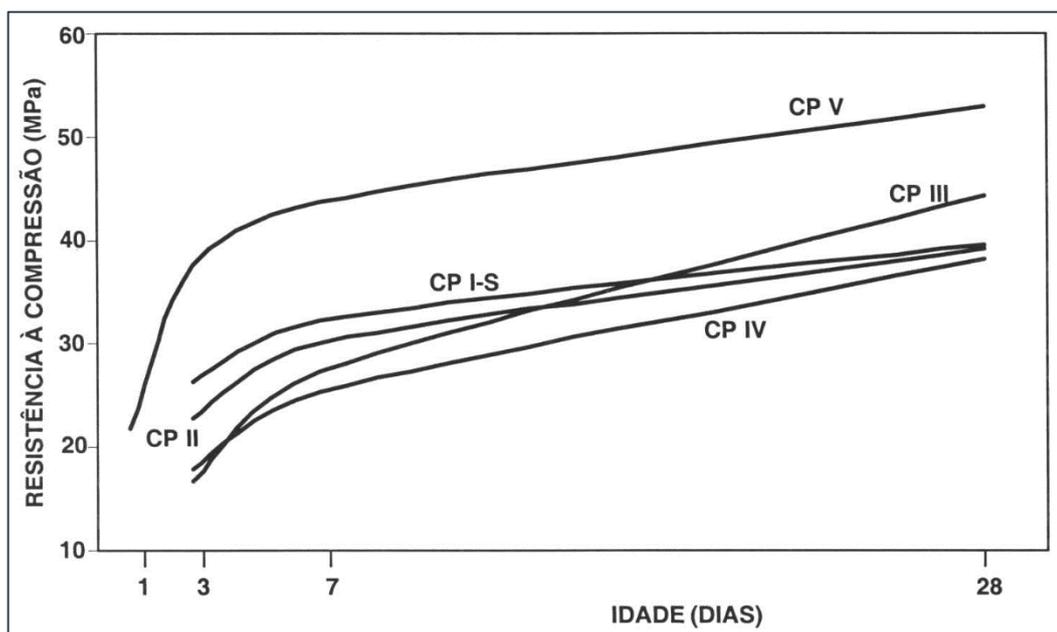
<sup>a</sup> Resíduo na peneira 45 µm.

Fonte: ABNT NBR 16697 (2018)

### *Cimento Portland CP V-ARI*

O cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI) tem como principal característica o fato de atingir altas resistências nos primeiros dias de aplicação. A Figura 2.2 mostra a evolução da resistência média dos diferentes tipos de cimento, ilustrando o rápido ganho de resistência do CP V. A alta resistência inicial é consequência de uma dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer, além da moagem mais fina do cimento. (ABCP BT-106, 2002)

Figura 2.2 - Evolução média de resistência à compressão dos diferentes tipos de cimento Portland



Fonte: ABCP (1996, *apud* BT-106, 2002)

De acordo com Battagin e Battagin (2010), o cimento CP V-ARI é o mais adequado para aplicações onde é necessária a elevada resistência nas primeiras idades, como em pré-moldados e aplicação de protensão. Kihara e Centurione (2005) citam que o CP V ARI também é utilizado quando é necessário que a desforma seja rápida.

Os concretos em que se utiliza o cimento de alta resistência inicial exigem mais água para que a consistência seja a mesma de outros tipos de cimento; por isso, de acordo com Battagin (2011), seu emprego exige cautela do ponto de vista de buscar indiscriminadamente resistências mais altas às primeiras idades sem que haja prática da boa engenharia, podendo resultar em manifestações patológicas como, por exemplo, fissuras causadas pela maior retração por secagem em condições ambientais inapropriadas.

#### *Hidratação do cimento Portland*

O cimento Portland anidro não aglomera areia e rocha: ele só adquire propriedade adesiva quando misturado à água. Isso acontece porque a reação química do cimento com a água (a hidratação do cimento), resulta em produtos que possuem características de pega e endurecimento. Como o cimento Portland é uma mistura heterogênea de vários compostos, o processo de hidratação é resultado de uma série de reações simultâneas dos compostos anidros

com a água, sendo que esses compostos não reagem com a mesma velocidade. (MEHTA e MONTEIRO, 2014)

Ainda segundo Mehta e Monteiro (2014), a hidratação dos aluminatos ocorre a uma velocidade muito mais rápida do que a hidratação dos silicatos. Os aluminatos são os principais responsáveis pelas características de enrijecimento (perda de consistência) e pega (solidificação) da pasta de cimento Portland. Já os silicatos, que formam aproximadamente 75% do cimento Portland comum, são responsáveis pelas características de endurecimento (desenvolvimento de resistência).

### 2.1.2 Agregados

Agregados são fragmentos de rochas, chamados de “pedras” e “areias” (FARIAS e PALMEIRA, 2010). Segundo Sbrighi Neto (2011), “agregado é um material granular sem volume ou forma definidos, e de dimensões e propriedades adequadas à fabricação de concretos e argamassas de cimento Portland”.

No início do século XX, acreditava-se que o papel dos agregados era apenas de enchimento. Com a aplicação do concreto em larga escala, percebeu-se a importância técnica, econômica e social deste material e seu entendimento foi necessário. Verificou-se que muitas propriedades do concreto são influenciadas pelas características dos agregados, como: porosidade, composição granulométrica, absorção d'água, estabilidade, forma e textura superficial dos grãos, resistência mecânica, módulo de elasticidade e substâncias deletérias presentes (SBRIGHI NETO, 2011).

Os agregados podem ser classificados de acordo com sua origem e sua dimensão. Quanto à origem, podem ser naturais, britados, artificiais ou reciclados. Quanto à sua dimensão, podem ser grãos ou miúdos. De acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009), os agregados grãos possuem grãos que passam pela peneira de abertura 152 mm e ficam retidos na peneira de abertura 4,75 mm. Já os agregados miúdos são aqueles que possuem grãos que passam pela peneira de abertura 4,75 mm e ficam retidos na peneira de abertura 150 µm

Os agregados constituem pelo menos 75% do volume do concreto; portanto, sua qualidade é de grande importância. Características dos agregados como massa específica aparente, porosidade,

absorção, composição granulométrica, forma e textura influenciam nas propriedades do concreto (FARIAS e PALMEIRA, 2010).

A composição granulométrica mostra a distribuição dos grãos que constitui o agregado e geralmente é expressa em porcentagem individual ou acumulada retida em cada uma das peneiras estabelecidas na NBR 7211 (ABNT, 2009). A norma apresenta curvas de distribuição granulométrica correspondentes à zona utilizável e à zona ótima, que limita a granulometria dos agregados para concretos convencionais. Entende-se que areias muito grossas tendem a produzir concretos não trabalháveis enquanto as muito finas aumentam o consumo de água (e conseqüentemente, o consumo de cimento) e são antieconômicas. Uma distribuição granulométrica equilibrada produzirá concretos mais trabalháveis e econômicos, além de menos porosos (SBRIGHI NETO, 2011).

De acordo com Pimenta *et al.* (2007), a definição da dimensão máxima característica dos agregados deve levar em conta as dimensões da peça a ser concretada, a densidade e espaçamento das armaduras e a presença de embutidos. Teoricamente, quanto maior a dimensão do agregado, menor será o consumo de cimento pois a área superficial total dos grãos dos agregados será menor. Por outro lado, a utilização de agregados com dimensão máxima característica maior pode levar a uma elevação dos custos de beneficiamento e estocagem dos agregados, assim como custos de produção, transporte, lançamento e adensamento do concreto.

### 2.1.3 Aditivos

Os aditivos têm sido empregados na construção civil desde longa data e atualmente sua indústria prepara produtos que permitem obter concretos com características requeridas pelos usuários, em sua maior parte, mais duráveis e com maior rendimento. Os aditivos, que podem ser utilizados no estado sólido ou líquido, são produtos químicos adicionados ao concreto em quantidades não superiores a 5% em relação à massa de cimento (exceto em casos especiais) durante a mistura com o objetivo de obter uma alteração específica nas propriedades normais do concreto (NEVILLE, 2016).

Empregados corretamente, os aditivos podem modificar ou melhorar a trabalhabilidade, a pega e o endurecimento do cimento, o conteúdo de ar ou gases no concreto, a resistência às ações físicas, mecânicas e químicas e a resistência mecânica do concreto. Além disso, o uso de

aditivos também melhora a regularidade na fabricação do concreto, amplia seu campo de aplicação e pode-se otimizar a relação qualidade/preço por aumentar o rendimento (MARTIN, 2005).

No Brasil, a norma NBR 11768 (ABNT, 2019) define aditivos como produtos adicionados ao concreto em pequenas quantidades e que modificam algumas de suas propriedades. Essa norma os classifica em:

- Aditivo redutor de água / plastificante (PR, PA, PN);
- Aditivo de alta redução de água / superplastificante tipo I (SP-I R, SP-I A, SP-I N);
- Aditivo de alta redução de água / superplastificante tipo II (SP-II R, SP-II A, SP-II N);
- Aditivo incorporador de ar (IA);
- Aditivo acelerador de pega (AP);
- Aditivo acelerador de resistência (AR);
- Aditivo retardador de pega (RP),

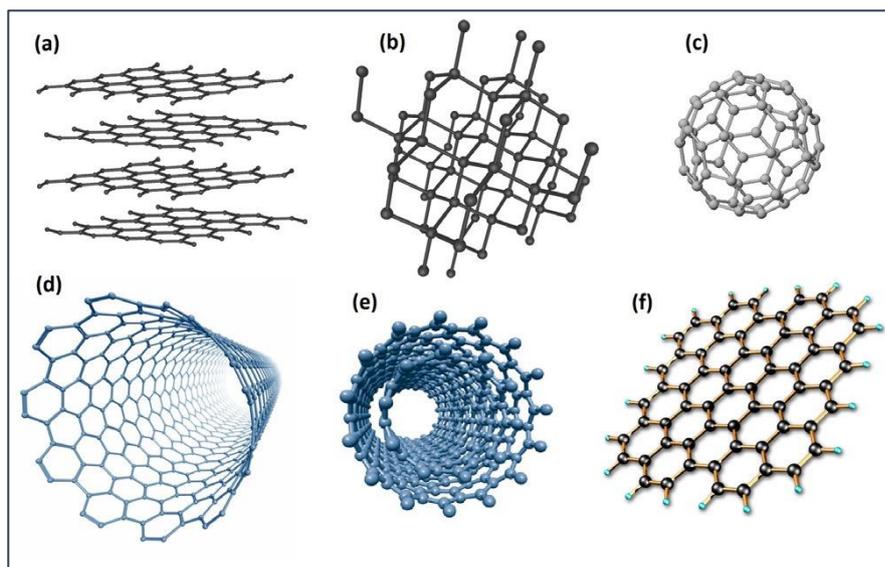
onde R significa aditivo retardador, A significa aditivo acelerador e N significa aditivo de pega normal.

Os efeitos específicos dos aditivos dependem de diversos fatores, sendo alguns deles: tipo e quantidade de cimento, adições, tipo e características dos agregados. Por isso é necessário realizar testes prévios com os materiais utilizados. Deve-se lembrar que os aditivos melhoram a qualidade do concreto, mas não podem ser a solução para transformar um concreto ruim em um concreto bom (MARTIN, 2005).

#### 2.1.4 Nanotubos de carbono

Segundo Zarbin e Oliveira (2013), a última década do século XX foi marcada pelo crescimento da área de conhecimento em nanociência e nanotecnologia, que promete verdadeira revolução científica e tecnológica. Dentre os materiais dessa área, os mais conhecidos são os materiais de carbono, dentre os quais os nanotubos de carbono (NTC) e o grafeno são os mais representativos. A Figura 2.3 apresenta algumas estruturas alótropas do carbono atualmente conhecidas, como o (a) grafite, (b) diamante, (c) fulereno, (d) nanotubo de carbono de parede simples, (e) nanotubo de carbono de parede múltipla e (f) grafeno.

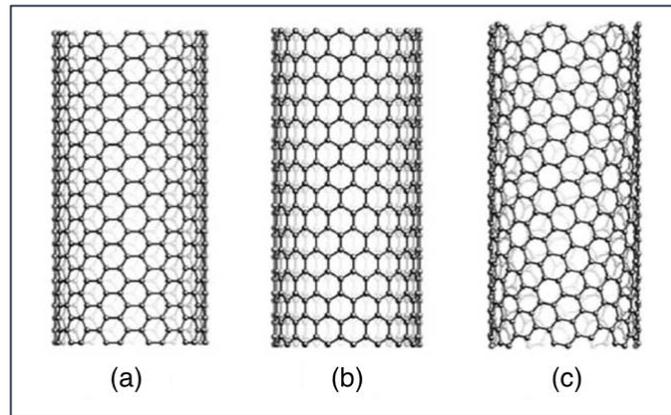
Figura 2.3 - Representação esquemática de diferentes alótropos de carbono



Fonte: Zarbin e Oliveira (2013)

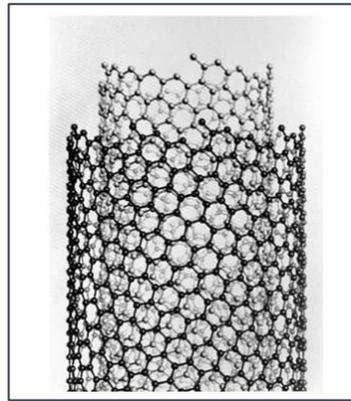
Utilizando processo de pirólise de grafite em plasma sob atmosfera controlada de hélio, os NTC, constituídos arranjos hexagonais de carbono na forma de pequenos cilindros, foram sintetizados pela primeira vez em 1991 pelo pesquisador japonês Sumio Iijima (2002). Eles usualmente têm uma faixa de diâmetro de poucos angstroms a dezenas de nanômetros e podem ter comprimento acima de alguns micrometros. Do ponto de vista estrutural, os NTC podem ser de parede simples ou parede múltipla (HERBST, MACEDO E ROCCO, 2004). Os NTC de parede simples consistem em uma única folha de grafeno enrolada sobre si mesma para formar um tubo cilíndrico e pode ter mais de uma geometria, como ilustrado na Figura 2.4, onde (a) é do tipo *armchair*, (b) *zig-zag* e (c) *chiral*. Essas diferenças estruturais podem resultar em um comportamento mecânico, elétrico ou térmico diferente (ZARBIN e OLIVEIRA, 2013). Já os NTC de paredes múltiplas consistem em um conjunto de nanotubos concêntricos, como mostrado na Figura 2.5.

Figura 2.4 - Nanotubos de carbono de paredes simples



Fonte: Iijima (2002)

Figura 2.5 - Nanotubos de carbono de paredes múltiplas



Fonte: Iijima (2002)

Apesar de suas pequenas dimensões, os NTC possuem propriedades bastante imperativas. De acordo com Zarbin e Oliveira (2013), os nanotubos possuem resistência extremamente elevada devido à ligação  $sp^2$  entre os átomos de carbono, que é a mais forte existente na natureza. Isso faz com que suas propriedades sejam comparadas com as do aço, como mostra a Tabela 2.3. Além disso, esses mesmos autores indicam que os módulos de Young medidos em nanotubos são na faixa de 1 TPa, ou seja, mais de 5 vezes superiores ao aço. Outras propriedades que chamam a atenção para os NTC são suas características semicondutoras e sua condutividade térmica.

Tabela 2.3 - Comparação de propriedades mecânicas dos nanotubos

Material	Módulo de Young (TPa)	Resistência à tração (GPa)	Alongamento até a ruptura (%)
NTCPS	1	10 a 52	16
NTCPM	0,8-0,9	11 a 63	12
Aço	0,2	0,65 a 1	15

Fonte: Adaptado de Shah *et al.* (2009)

Desde a descoberta os NTC vêm sendo sintetizados também por vários métodos, como a síntese catalítica, deposição química da fase vapor (CVD), decomposição de monóxido de carbono em altas pressões e altas temperaturas e a erosão a laser (HERBST, MACEDO E ROCCO, 2004). O processo utilizado nos NTC deste trabalho, a técnica CVD, será apresentada no tópico a seguir.

#### *Síntese por decomposição química da fase vapor (CVD)*

Segundo Siddique e Mehta (2013), o método de decomposição química da fase vapor (CVD) mostrou-se o mais promissor em termos econômicos. Nesse processo, a fonte precursora de carbono é gasosa e constituída basicamente de hidrocarbonetos leves, como metano, acetileno, etileno, etanol, monóxido de carbono, etc. Esses hidrocarbonetos, em altas temperaturas (entre 600 °C e 1000 °C) e em ambiente controlado, sofre uma reação de termo decomposição. A reação de termo decomposição ou pirólise é catalisada pela presença de nanopartículas de metais de transição como Fe, Ni ou Co, gerando no local carbono livre e espécies Cx – Hy responsáveis pelo crescimento de nanotubos de carbono sobre a superfície do catalisador. As propriedades dos NTC dependerão do tamanho, forma, dispersão, estruturas e propriedades superficiais do catalisador utilizado no processo. O diâmetro do nanotubo obtido será aproximadamente do mesmo diâmetro da partícula catalisadora (MELO, 2009).

Segundo Souza (2015), apesar de muitas pesquisas estarem relacionadas à produção de NTC com alto índice de pureza, a utilização desse material em matrizes cimentícias (pastas, argamassas e concretos) levou alguns pesquisadores ao desenvolvimento de um método de síntese de NTC diretamente sobre o clínquer de cimento Portland utilizando o método de CVD como princípio.

Ladeira *et al.* (2015) obtiveram a patente em que o método de síntese de NTC em clínquer de cimento Portland e outros materiais cimentícios é descrito. A patente descreve:

“...descreve-se um método de síntese de nanotubos de carbono por deposição química da fase vapor. Neste método o clínquer de cimento é usado como matriz cerâmica para catalisar o processo ou para ancorar as nanopartículas dos metais de transição. O uso do clínquer de cimento como um substrato para ancorar as nanopartículas do metal de transição permite a geração de nanotubos de carbono nas partículas e grãos do clínquer de cimento, e também permite a produção de um tipo de cimento nanoestruturado com

nanotubos de carbono onde a síntese e integração dos nanotubos de carbono no clínquer são realizadas em uma única etapa contínua em grande escala. A invenção também propõe, como parte do processo de síntese de nanotubos de carbono em clínquer de cimento, várias opções para enriquecer o último com metais de transição, a fim de integrar opcionalmente a produção do referido composto nanoestruturado na indústria convencional do cimento...”

Apesar da dificuldade de dispersão, a incorporação de nanotubos de carbono em materiais cimentícios vem sendo estudada devido às suas propriedades mecânicas. Segundo Hawreen e Bogas (2018), os nanotubos de carbono têm potencial para diminuir a propagação de microfissuras no concreto. Além disso, os NTC podem contribuir para aumentar a resistência à flexão, reduzir a absorção de água, carbonatação e penetração de íons cloreto.

## **2.2 Comportamento do concreto contendo nanotubos de carbono no estado fresco**

### **2.2.1 Trabalhabilidade**

De acordo com Guimarães (2005), é importante que certas propriedades do concreto fresco sejam estabelecidas a fim de atingir a trabalhabilidade suficiente para realizar as etapas de transporte, lançamento, adensamento e acabamento, mantendo-o homogêneo. Para isso, a mistura no estado fresco deve-se manter fluida e coesa durante essas etapas.

A trabalhabilidade do concreto fresco tem efeito direto na capacidade de bombeamento e na construtibilidade, porque determina a facilidade com que o concreto pode ser manipulado sem que haja segregação. Um concreto de difícil lançamento e adensamento aumenta o custo de manipulação e tem pouca resistência e durabilidade. Por outro lado, dosagens que tendem a segregar e exsudar geram custos mais altos no acabamento e resulta em um concreto menos durável. Por isso, segundo Mehta e Monteiro (2014), a consistência do concreto fresco não deve ir além da necessária para a facilidade de aplicação, compactação e acabamento. Para concretos que requerem alta consistência no momento do lançamento, deve-se considerar o uso de aditivos redutores de água e retardadores de pega.

Os concretos são classificados por sua consistência no estado fresco, determinada a partir do ensaio de abatimento pela NBR 16889 (ABNT, 2020). Cada classe é indicada para um tipo de aplicação para o concreto. A classificação se encontra na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Classes de consistência

Classe	Abatimento (mm)	Aplicações típicas
S10	$10 \leq A < 50$	Concreto extrusado, vibro prensado ou centrifugado
S50	$50 \leq A < 100$	Alguns tipos de pavimentos e de elementos de fundações
S100	$100 \leq A < 160$	Elementos estruturais, com lançamento convencional do concreto
S160	$160 \leq A < 220$	Elementos estruturais com lançamento bombeado do concreto
S220	$\geq 220$	Elementos estruturais esbeltos ou com alta densidade de armaduras

Fonte: NBR 8953 (ABNT, 2015)

A maioria das pesquisas envolvendo NTC em materiais cimentícios relata dificuldades de dispersão. Segundo Jung et al. (2022), esse desafio ocorre devido às suas características hidrofóbicas, alta área de superfície específica e força de van der Waals.

Wille e Loh (2010) analisaram a influência de NTC de paredes múltiplas em concretos de ultra alto desempenho (concretos com resistência acima de 200 MPa). As amostras também continham sílica ativa e pó de vidro e foram utilizados dois tipos de areia: uma com diâmetro máximo de 0,2 mm e outra com diâmetro máximo de 0,8 mm. A relação a/c utilizada foi de 0,22. Devido a tendência de aglomeração dos nanotubos de carbono, dispersaram o material em aditivo superplastificante a base de poliéter carboxilato. Utilizando a quantidade de 0,022% de NTC em relação à massa de cimento, o ensaio de espalhamento apresentou resultado de 277 mm. Comparando com o resultado do concreto de referência, que apresentou 281 mm de espalhamento, não representou alteração significativa na trabalhabilidade do concreto.

Marcondes (2012) avaliou a mistura física 0,3% de nanotubos de carbono de paredes múltiplas (em relação à massa de cimento) em concretos utilizando três tipos de dispersão: utilizando o produto AQUACYL AQ301, que contém os NTC já dispersos em meio aquoso, NTC dispersos previamente em água e aditivo pelo próprio autor e NTC em pó, sem pré-dispersão. Foi utilizada relação a/c de 0,55, 1% de aditivo superplastificante e cimento CP V-ARI, com traço de 1:2,25:2,75 e consumo de cimento fixado em 352 kg/m<sup>3</sup> de concreto. Os resultados do ensaio de abatimento demonstraram que a forma de dispersão e a presença de NTC no concreto influenciam na consistência. O concreto contendo o produto AQUACYL AQ301 e o concreto com adição de NTC em pó obtiveram redução no *slump test* do concreto, reduzindo seu abatimento de 20 cm para 3 cm e 7 cm, respectivamente. Já o concreto contendo NTC disperso por ultrassom apresentou consistência de 18 cm, que é semelhante à do concreto de referência. O autor indica que o uso de NTC no concreto só é possível com o uso de aditivos químicos, já

que ocorre redução do abatimento devido a maior superfície específica do material (250-300 m<sup>2</sup>/g).

Rhee e Roh (2013) avaliaram o concreto contendo nanotubos de carbono de paredes múltiplas em quantidades de 0, 0,25%, 0,5%, 0,75%, 1,0%, 1,25% e 1,5% em relação à massa de cimento. Os nanotubos passaram por moagem em moinho de bolas por 7 horas e foram introduzidos ao concreto de duas formas: com dispersão e sem dispersão. A dispersão foi feita em solução de formaldeído de naftaleno sulfonato seguida de sonicação em ultrassom por 20 minutos. Os autores observaram que o *slump* diminuiu significativamente à medida que a quantidade de NTC aumentou, e isso ficou mais evidente na mistura onde o NTC não foi disperso em solução. Enquanto o *slump* do concreto de referência foi de 250 mm, o do concreto contendo 1,5% de NTC foi de aproximadamente 25 mm.

Tonder e Mafokoane (2014) empregaram nanotubos de carbono de paredes múltiplas (mistura física) no concreto afim de verificar a ação destes na zona de transição entre a pasta e o agregado. Utilizaram quantidades de 0,05%, 0,1% e 0,2% de NTC em relação à massa de materiais secos. Apesar de não citar os resultados, os autores concluíram que quando a quantidade de NTC aumentava, o concreto perdeu a trabalhabilidade devido à dificuldade de dispersão uniforme das nanopartículas.

Carriço *et al.* (2018) analisaram o concreto contendo a mistura física de NTC nos teores de 0,05% e 0,1% em relação à massa de cimento. Foram utilizados três tipos de nanotubos de carbono funcionalizados, que diferem entre si de acordo com o modo de funcionalização. As relações a/c dos concretos variaram de acordo com o tipo de NTC, e foram de 0,35, 0,45 e 0,55, assim como o consumo de cimento, que foi de 380, 400 e 450 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente. Os resultados mostraram que a adição dos NTC não causou variações significativas nas propriedades do concreto fresco. Todos os concretos tiveram a mesma classificação (S3), variando menos de 1,5 cm de uma amostra para outra (o menor *slump* obtido foi de 12,5 cm, e o maior, de 14 cm).

Dois tipos de concreto foram analisados por Borges (2019). Foram moldados concretos convencionais e autoadensável contendo 0,15% e 0,3% de NTC em relação à massa de cimento. Para o concreto convencional, o consumo de cimento ficou próximo de 290 kg/m<sup>3</sup> para todos os traços, e a relação a/c utilizada foi de 0,60. Para o concreto autoadensável, o consumo de cimento ficou próximo de 400 kg/m<sup>3</sup>, e a relação a/c foi de 0,45. Nesse caso, os NTC foram

sintetizados diretamente sobre o clínquer de cimento. Foi observado que os NTC, em ambos os teores, não influenciaram a trabalhabilidade do concreto.

Concretos com nanotubos de carbono de forma funcionalizada e não funcionalizada foram produzidos por Hawreen e Bogas (2019) com concentrações de NTC variando entre 0,05% e 0,5%. Também foram variadas a relação a/c (0,35, 0,45 e 0,55) e o consumo de cimento (de 380 a 450 kg/m<sup>3</sup>). Os autores observaram discreto aumento na trabalhabilidade do concreto com o aumento da quantidade de NTC, o que sugere que a dispersão, feita de forma física e química, foi eficiente. O *slump* variou de 12 cm (para concreto contendo 0,05% de NTC) a 15 cm (para concreto contendo 0,5%). Tal diferença pode ter acontecido devido ao uso de aditivo superplastificante, que foi usado de forma proporcional à massa de NTC.

Em sua pesquisa, Silveira (2020) utilizou nanotubos de carbono nos teores de 0,5%, 0,75% e 1,0% em relação à massa de cimento em um concreto autoadensável, com relação a/c de 0,45, consumo de cimento de 409 kg/m<sup>3</sup>. A autora observou que a adição de NTC não influenciou a trabalhabilidade dos concretos com 0,5% e 1,0% de NTC, já que os valores de espalhamento se encaixaram na classe de espalhamento SF3, assim como o concreto de referência. Já o traço com 0,75% de NTC apresentou redução de 10% de trabalhabilidade, se encaixando na classe SF2.

MacLoad *et al.* (2020) analisaram os efeitos de uma solução com NTC pré-dispersos nas propriedades do concreto fresco e endurecido. Foram usadas quantidades de 2,5%, 5% e 10% de aditivo contendo os NTC em relação à massa de cimento e dois diferentes tipos de cimento: cimento de uso geral e cimento de alta resistência inicial (ARI). O artigo não especifica o teor real de NTC utilizado em cada mistura. Os autores chegaram à conclusão que os NTC aumentaram significativamente o *slump* dos concretos utilizando cimento ARI; porém no concreto de referência sem NTC não foi empregado nenhum aditivo.

### 2.2.2 Teor de ar incorporado

Controlar o teor de ar é de extrema importância no controle de qualidade do concreto. Esse controle serve tanto para verificar limites máximos e mínimos desejáveis de ar incorporado, quanto para identificar teores de vazios de ar no concreto. (BARBAR, 2016)

Existem dois procedimentos para determinar o teor de ar incorporado no concreto fresco no Brasil: método gravimétrico, descrito pela norma NBR 9833 (ABNT, 2008) e método pressométrico, descrito na norma NBR NM 47 (ABNT, 2002).

Na pesquisa citada no item 2.2.1, Hawreen e Bogas (2019) identificaram pouca diferença entre os resultados para o teor de ar incorporado. Os autores observaram que o aumento de nanotubos de 0,05% para 0,5% melhorou o ar incorporado, que pode ter sido resultado da menor dispersão do NTC e da maior quantidade de aditivo. Além disso, os autores também concluíram que os NTCs funcionalizados tiveram menor influência no teor de ar incorporado.

Borges (2019), citado no item 2.2.1, observou que o teor de ar incorporado aumentou à medida que a quantidade de NTC aumentava, tanto no concreto convencional quanto no concreto autoadensável. Para o concreto convencional, os resultados de teor de ar incorporado foram de 1,8%, 2,0% e 3,0% para os concretos contendo 0, 0,15% e 0,30% de NTC, respectivamente. Para o concreto autoadensável, os resultados foram 1,7%, 2,5% e 3,0% para as mesmas quantidades de NTC.

Silveira (2020), também citado no item 2.2.1, encontrou resultados similares aos encontrados por Borges (2019). A autora observou que há tendência de aumento do teor de ar incorporado na medida em que o teor de NTC aumenta. Para o concreto de referência (sem NTC) e para concretos com 0,5%, 0,75% e 1% de NTC, os resultados encontrados para teor de ar incorporado foram 1,9%, 2,2%, 1,8% e 3,0%, respectivamente.

### **2.3 Comportamento do concreto contendo nanotubos de carbono no estado endurecido**

Apesar da dificuldade de dispersão, a incorporação de nanotubos de carbono em materiais cimentícios vem sendo estudada devido às suas propriedades mecânicas. Segundo Hawreen e Bogas (2018), os nanotubos de carbono têm potencial para diminuir a propagação de microfissuras no concreto. Além disso, os NTC podem contribuir para aumentar a resistência à flexão, reduzir a absorção de água, carbonatação e penetração de íons cloreto.

Wille e Loh (2010), conforme apresentado no item 2.2.1, analisaram a influência de NTC de paredes múltiplas em concretos de ultra alto desempenho. Em seus resultados, não foram observadas variações significativas na resistência à compressão dos concretos contendo NTC

em relação aos concretos de referência. Enquanto o concreto de referência apresentou resistência de 200 MPa, o concreto contendo NTC apresentou resistência de 194 MPa.

Marcondes (2012) avaliou a mistura física de NTC em concretos usando diferentes métodos, conforme exposto no item 2.2.1. Os resultados do estudo demonstraram que em todos os concretos contendo NTC houve melhora significativa na resistência à compressão. O traço com maior elevação da resistência foi o traço em que os NTC foram dispersos em água e aditivo, onde obteve aumento de 37% na resistência quando comparada ao traço de referência (de 25,77 MPa passou para 35,08 MPa).

Hamzaoui *et al.* (2012) avaliaram a resistência à compressão de argamassas e concretos contendo NTC de paredes múltiplas dispersos em solução líquida a fim de descobrir o teor ótimo. Para argamassas as porcentagens de NTC utilizados foram de 0,01%, 0,02%, 0,03%, 0,04%, 0,05% e 0,06% e para concretos, 0,003%, 0,004%, 0,006% e 0,01%, com consumo de 310 kg/m<sup>3</sup> de cimento. Aos 90 dias a resistência à compressão da argamassa aumentou 21,2% na porcentagem de 0,01%. Já no concreto, o ganho de resistência foi de 17,65% na substituição de 0,03%. Os autores relataram que o aumento da quantidade de NTC na argamassa e no concreto fez com que sua resistência diminuísse e concluíram o que os teores ótimos foram de 0,01% para argamassas e 0,003% para concreto.

Rhee e Roh (2013) analisaram as propriedades mecânicas de concretos contendo nanotubos de carbono de paredes múltiplas conforme apresentado no item 2.2.1. Para a resistência à compressão, os autores observaram um aumento de até 72% no concreto contendo 1,0% de NTC quando dispersos. Para menores quantidades de NTC também foi possível observar aumento na resistência à compressão, e isto ocorreu tanto nos concretos onde o NTC foi disperso quanto onde não houve dispersão. Os autores observaram que quando a quantidade de NTC passou de 1,0%, o aumento de resistência diminuiu e atribuíram esse fato à interferência de NTC na interface de ligação entre os agregados e a pasta. Para as propriedades de resistência à tração e módulo de elasticidade os autores não observaram alterações significativas.

Madhavi *et al.* (2013) adicionaram ao concreto nanotubos de carbono funcionalizados de paredes múltiplas com diâmetro de 20 a 40 nm e comprimento de 1 a 10 µm. A relação a/c utilizada foi de 0,4 e o traço foi de 1:1,26:2,48 (cimento: areia: brita). As porcentagens adicionadas foram de 0,015%, 0,030% e 0,045% em relação à massa de cimento. A dispersão

dos NTC foi feita por meio de surfactante e sonicação e não foi observada mudança na trabalhabilidade do concreto. A resistência à compressão foi medida em cubos de 15 x 15 x 15 cm e a resistência à tração por compressão diametral em cilindros de 15 x 30 cm. Os resultados mostraram que após 28 dias as resistências à compressão e à tração aumentaram significativamente com o aumento da quantidade de nanotubos. Para as quantidades de 0,015%, 0,030% e 0,045%, na resistência à compressão os aumentos foram de 2,75%, 16,38% e 26,69%, respectivamente. Já na resistência à tração, os ganhos foram ainda maiores: 30,84%, 45,37% e 66,30% respectivamente. Os autores justificam os aumentos de resistência devido ao preenchimento de vazios do concreto pelos nanotubos de carbono.

Tonder e Mafokoane (2014) empregaram nanotubos de carbono de paredes múltiplas (mistura física) no concreto a fim de verificar a ação destes na zona de transição entre a pasta e o agregado. Foram utilizadas quantidades de 0,05%, 0,1% e 0,2% de NTC em relação à massa de materiais secos. Ao analisarem a resistência à compressão e à tração do concreto aos 28 dias, concluíram que a quantidade de 0,1% de NTC resultou no melhor efeito. Apesar disso, observaram que a trabalhabilidade do concreto diminuiu com o aumento da quantidade de NTC. Os autores concluíram que os NTC diminuem a zona de transição entre o concreto e o agregado.

Carriço *et al.* (2018) analisaram o concreto contendo a mistura física de NTC nos teores de 0,05% e 0,1% em relação à massa de cimento, conforme já citado no item 2.2.1. Os resultados encontrados mostraram que a incorporação de NTC, no teor de 0,1%, aumentou a resistência à compressão em aproximadamente 20%. De acordo com os autores, isso ocorreu devido aos efeitos fíler, de pontos de nucleação e de ponte proporcionados pela presença dos NTC na composição dos concretos estudados.

Concretos com nanotubos de carbono de forma funcionalizada e não funcionalizada foram produzidos por Hawreen e Bogas (2019) com concentrações de NTC variando entre 0,05% e 0,5%. Também foram variadas a relação a/c (0,55, 0,45 e 0,35) e o consumo de cimento (de 380 a 450 kg/m<sup>3</sup>). Foram avaliadas a resistência à compressão dos concretos produzidos, nas idades de 7, 28 e 90 dias e o módulo de elasticidade na idade de 28 dias. Exceto em concretos com elevada dosagem de NTC (0,5% em relação a massa de cimento), a resistência à compressão foi melhorada nos concretos contendo NTC, independentemente da relação a/c e do tipo de NTC. Aos 28 dias, o incremento da resistência à compressão no NTC chegou ao máximo de 21% no concreto com a/c de 0,55 e teor de NTC de 0,1%. Por outro lado, esse

aumento foi somente até 8% também aos 28 dias no concreto de a/c igual a 0,35 e teor de NTC de 0,05%. Esse aumento de resistência, segundo os autores, pode ser atribuído ao preenchimento dos espaços vazios (efeito *filler*) e aos efeitos de nucleação de mais compostos e de ponte com a presença dos NTC. Por outro lado, os resultados para o módulo de elasticidade, na idade de 28 dias, revelaram que a presença dos NTC promoveu pequeno aumento nos valores para concretos de mesmo consumo de cimento e relação a/c, independentemente do teor de NTC e de serem funcionalizados ou não. Os autores explicam que o módulo de elasticidade é dependente principalmente da natureza mineralógica do agregado graúdo que nesse caso era a mesma para todos os concretos independentemente da presença ou não dos NTC.

Neste mesmo estudo, Hawreen e Bogas (2019) avaliaram a retração total (autógena + por secagem) dos concretos nas idades de 2, 7, 27, 90, 180 e 365 dias bem como a fluência total (básica + por secagem) até a idade de 365 dias. O ensaio de fluência foi feito somente para os concretos com relação a/c de 0,55 e consumo de cimento de 380 kg/m<sup>3</sup>. Esse ensaio se iniciou na idade de 28 dias e a tensão aplicada correspondeu a 20 % da resistência à compressão dos concretos naquela idade. Os resultados mostraram que os NTC foram eficientes em reduzir a retração total dos concretos produzidos em todas as idades avaliadas. Tal redução teve a mesma explicação do aumento da resistência à compressão: preenchimento de vazios e efeitos de nucleação e de ponte proporcionados pelo NTC. Os pesquisadores concluíram que a incorporação de NTC foi capaz de reduzir em até 18% a fluência total do concreto durante o período de 1 ano. Segundo os autores, essa redução pode ser atribuída aos mesmos efeitos citados para a resistência à compressão proporcionados pelos NTC. O efeito de ponte deve ser mais relevante para maior relação tensão aplicada/resistência do concreto, pois mais microfissuras são desenvolvidas. Os efeitos de enchimento e nucleação podem funcionar como barreiras adicionais ao movimento da água no interior do concreto, bem como na formação de uma matriz mais densa o que por sua vez melhora o efeito de restrição à deformação.

Borges (2019) analisou o uso de NTC em dois tipos de concretos: convencional e autoadensável. Foi verificado, para o maior teor de NTC no concreto autoadensável, um aumento de 36% na resistência à tração aos 3 dias e de 31% aos 28 dias. Para a resistência à compressão não foi verificada melhoria significativa de resultados.

Mohsen *et al.* (2019) avaliaram o efeito da mistura física de NTC na resistência à tração na flexão, na capacidade de deformação e na permeabilidade do concreto. Foram produzidos

concretos com 0, 0,03%, 0,08%, 0,15% e 0,25% de NTC em relação à massa de cimento. Para uma melhor dispersão do material, foi utilizada uma técnica de sonicação durante 30 minutos. As propriedades foram avaliadas aos 28 dias e foi verificado aumento de mais de 100% na resistência à flexão dos concretos com teores de 0,15% e 0,25% de NTC. Os resultados revelaram também maior ductilidade das vigas de concreto contendo NTC. Os testes de permeabilidade mostraram que o coeficiente de permeabilidade diminuiu em pelo menos 45% com a adição de NTC. Os autores atribuem os resultados ao aumento da densidade do concreto após a adição de NTC.

Silveira (2020), avaliou a resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e modelo de elasticidade de concretos autoadensável contendo NTC. Os resultados revelaram que concretos autoadensáveis contendo teores de NTC maiores que 0,5% não apresentaram ganhos significativos no desempenho. A autora também concluiu que o possível teor ótimo de NTC para esses concretos está entre 0,30 e 0,50%.

Na pesquisa de MacLeod *et al.* (2020), o concreto fabricado com cimento de uso geral na idade de 1 dia apresentou ganho máximo de 12,2% de resistência à compressão com 5% de aditivo contendo NTC; já o concreto com cimento de alta resistência inicial atingiu um ganho de 45,8% para a adição de 10% de aditivo contendo NTC na idade de 1 dia. O artigo não especifica o teor real de NTC utilizados em cada mistura. Aos 7 dias, foi encontrado um ganho máximo de 35,6% de resistência à compressão com 5% de aditivo contendo NTC para o concreto com cimento de uso geral e 16% com 10% de aditivo contendo NTC para o concreto com esse cimento. Aos 28 dias, observaram um ganho de mais de 21% da resistência do concreto com 5% de aditivo contendo NTC e o cimento de uso geral e de 37% para o concreto com 10% de aditivo contendo NTC e cimento ARI. Porém é importante frisar que no concreto de referência sem NTC não foi empregado nenhum aditivo.

Os autores Jung *et al.* (2022) utilizaram sílica ativa e NTC para produzirem concretos de ultra alta performance. Foi utilizada suspensão de NTC pré-dispersos, onde 60 gramas de NTC foram adicionados a 1 litro de água destilada. A relação a/c foi mantida em 0,24, mas parte do líquido foi substituído pela solução contendo NTC, resultando em concentrações de 0,2%, 0,5% e 0,8% em relação à massa. Tanto na resistência à compressão, quanto no módulo de elasticidade, a incorporação de NTC resultou em melhorias. Nas misturas contendo 0,2% e 0,5% de NTC foram obtidas resistência à compressão 4,1% e 14,2% maior; no módulo de elasticidade o

aumento foi de 17,5% e 23,6% respectivamente. A amostra contendo 0,8% de NTC teve aumentos menos significativos, sendo de 9,2% para a resistência à compressão e 11,5% para o módulo de elasticidade. Ao avaliar a retração autógena aos 28 dias, os autores observaram redução de 16% para o concreto contendo 0,2% de NTC e 34% para o concreto contendo 0,8%, que foi semelhante para o concreto contendo 0,5% de NTC. Os autores explicam que os NTCs dispersos no concreto agem como agente nucleante no gel C-S-H, fornecendo locais para hidratação. A formação de C-S-H e a microestrutura resistente à tração reduzem a retração em idades iniciais.

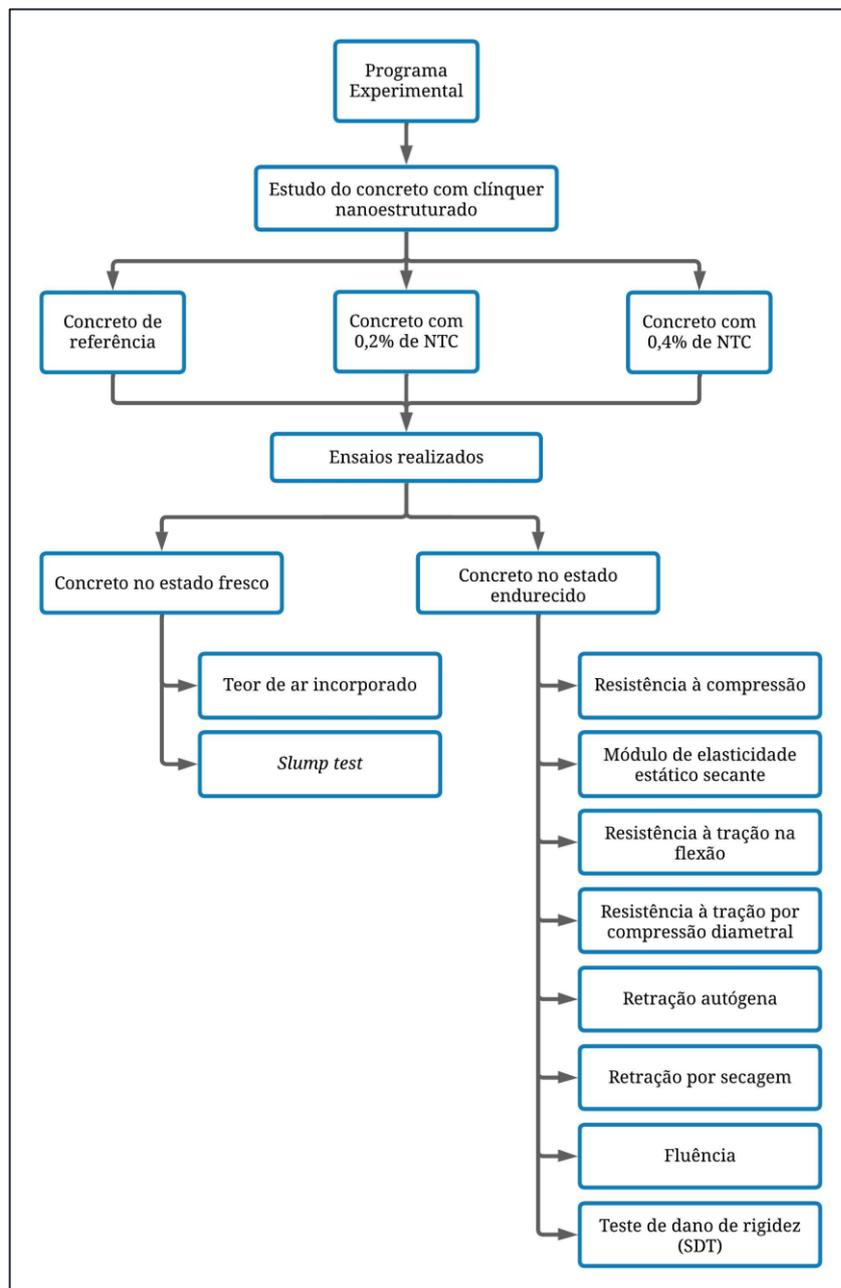
Pesquisas acerca do comportamento de NTC em concretos não são numerosas. Buscando contribuir para o conhecimento do efeito da presença dos NTC no desempenho de concretos, foram realizados ensaios para analisar a trabalhabilidade e as propriedades mecânicas e visco-elásticas do material.

### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL, MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Programa Experimental

As caracterizações dos materiais e os ensaios foram realizados nos laboratórios de FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A. conforme as normas brasileiras referentes a esses ensaios. A Figura 3.1 apresenta o organograma da disposição do programa experimental.

Figura 3.1 - Organograma da disposição do programa experimental



## 3.2 Materiais

Os materiais utilizados na pesquisa foram adquiridos em Goiânia e caracterizados no Laboratório da ELETROBRAS Furnas de acordo com as normas da ABNT. Os materiais e suas caracterizações estão relacionados a seguir.

### 3.2.1 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado foi areia natural quartzosa originada na região de Goiânia, classificada com areia média. Como mostrado na Tabela 3.1, o agregado atendeu às especificações da norma NBR 7211 (ABNT, 2009). A Tabela 3.2 e a Figura 3.2 mostram a distribuição granulométrica da areia, onde observa-se que o material está quase totalmente em zona ótima de utilização.

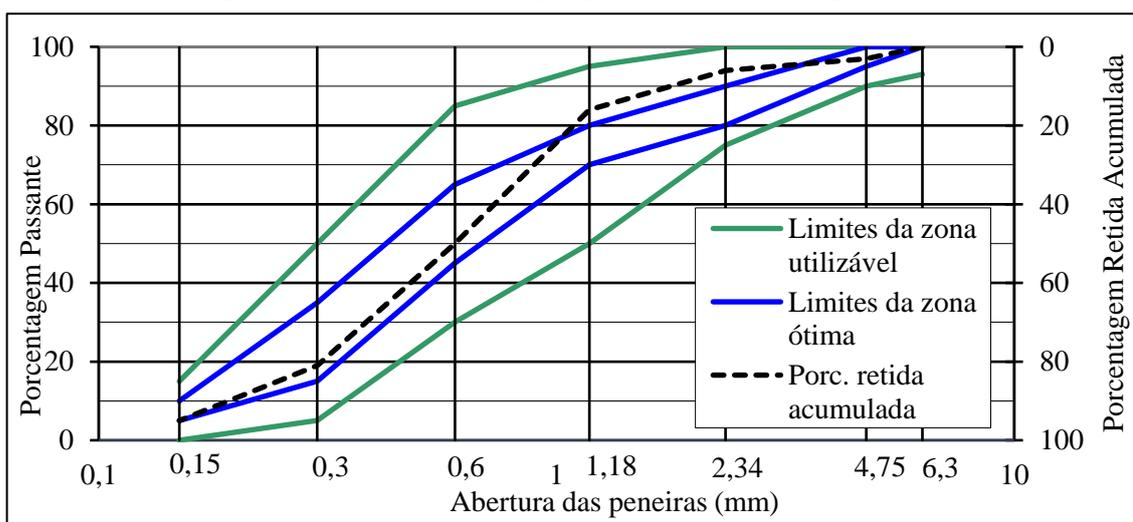
Tabela 3.1 - Caracterização do agregado miúdo

Ensaio realizado	Método de Ensaio	Resultado de Ensaio	Exigência de acordo com a NBR 7211:2009
Absorção de água (%)	NBR NM 30 (ABNT, 2000)	0,5	-
Módulo de finura	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	2,51	-
Teor de argila e materiais friáveis (%)	NBR 7218 (ABNT, 2010)	0,04	≤ 3,0%
Impurezas orgânicas (+/- clara)	NBR NM 49 (ABNT, 2001)	+ clara	Em relação à solução padrão, não pode ser mais escura.
Massa específica S.S.S. (g/cm <sup>3</sup> )	NBR NM 52 (ABNT, 2003)	2,57	-

Tabela 3.2 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo

Peneiras utilizadas		Massa retida (g)	Porcentagem retida individual (%)	Porcentagem retida acumulada (%)	Limites NBR 7211 (ABNT, 2009) – Retida acumulada	
Pol. ou número	Abertura (mm)				Zona utilizável	Zona ótima
3/8"	9,5	0	0	0	0 – 0	0 – 0
1/4"	6,3	0	0	0	0 – 7	0 – 0
4	4,75	21,5	3,4	3	0 – 10	0 – 5
8	2,34	15,2	2,4	6	0 – 25	10 – 20
16	1,18	66,4	10,4	16	5 – 50	20 – 30
30	0,6	213,5	33,3	50	15 – 70	35 – 55
50	0,3	199,0	31,1	81	50 – 95	65 – 85
100	0,15	94,7	14,8	95	85 – 100	90 – 95
Fundo (g)		30,5	4,8	100	-	-

Figura 3.2 - Curvas de composição granulométrica do agregado miúdo



### 3.2.2 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado foi a brita do tipo litológico granito, de dimensão máxima característica de 19 mm, originada na região de Goiânia. Como mostrado na Tabela 3.3, o agregado graúdo atendeu às especificações da norma NBR 7211 (ABNT, 2009). A Tabela 3.4 e a Figura 3.3 mostram a distribuição granulométrica da brita.

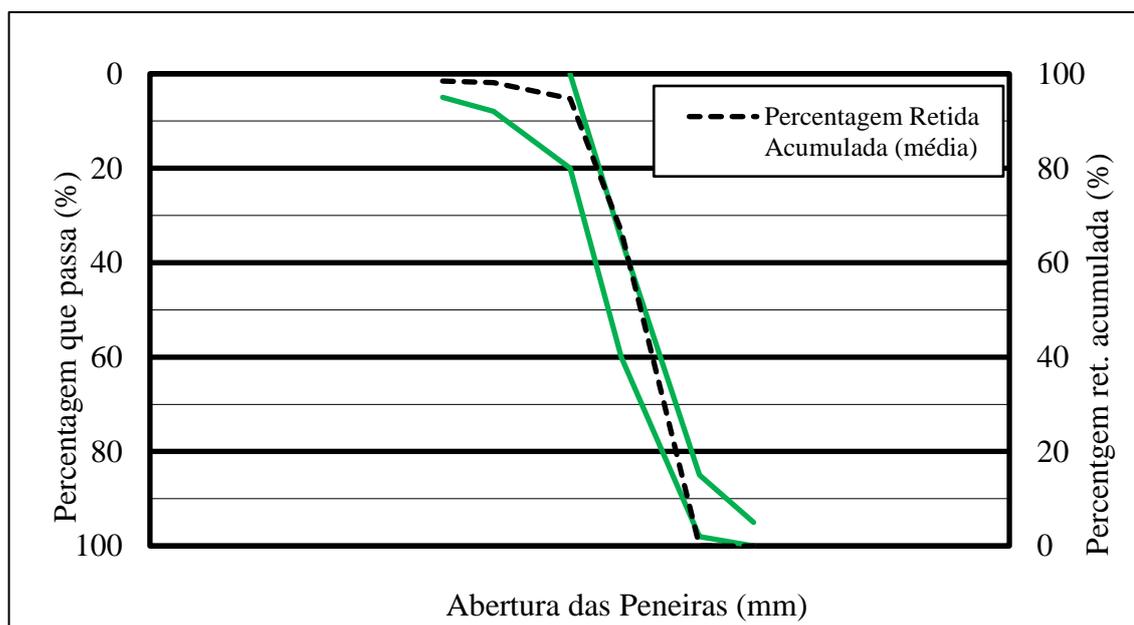
Tabela 3.3 – Caracterização do agregado graúdo

Ensaio realizado	Método de Ensaio	Resultado de Ensaio	Exigência de acordo com a NBR 7211:2009
Absorção de água (%)	NBR NM 53 (ABNT, 2009)	0,4	-
Módulo de finura	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	6,94	-
Índice de forma médio	NBR 7809 (ABNT, 2019)	2,2	≤ 3,0
Massa específica S.S.S. (g/cm <sup>3</sup> )	NBR NM 53 (ABNT, 2009)	2,82	-

Tabela 3.4 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo

Peneiras utilizadas		Massa retida (g)	Porcentagem retida individual (%)	Porcentagem retida acumulada (%)
Número	Abertura (mm)			
1"	25,4	0	0	0
3/4"	19	0	0	0
1/2"	12,5	2670,0	66,7	67
3/8"	9,5	1125,0	28,1	95
1/4"	6,3	135,0	3,4	98
3/16"	4,75	12,5	0,4	98
Fundo (g)		62,5	1,6	100

Figura 3.3 - Curva de distribuição granulométrica do agregado graúdo



### 3.2.3 Cimento Portland

O CP V–ARI foi o cimento utilizado e as Tabelas 3.5 e 3.6 apresentam os resultados de sua caracterização e sua composição química, respectivamente. Observa-se dessas caracterizações, que foram realizadas no Laboratório de Furnas, que o cimento utilizado satisfaz às exigências normativas.

Tabela 3.5 – Caracterização do cimento Portland

Ensaio realizado	Método de Ensaio	Resultado de Ensaio		Exigência de acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018)
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	NBR NM 23 (ABNT, 2000)	3,05		-
Finura por meio do peneirador aerodinâmico (Retido # 200)	NBR 12826 (ABNT, 2014)	0,2		-
Área específica – Método de Blaine (g/cm <sup>2</sup> )	NBR 16372 (ABNT, 2015)	4710		-
Água de consistência – Pasta (%)	NBR 16606 (ABNT, 2018)	29,4		-
Determinação do tempo de pega (min)	NBR 16607 (ABNT, 2018)	Início: 120 min Fim: 200 min		≥ 60 min ≤ 600 min
Resistência à compressão da argamassa (MPa)	NBR 7215 (ABNT, 2019)	1 dia	14,0	≥ 14,0
		3 dias	26,7	≥ 24,0
		7 dias	32,4	≥ 34,0

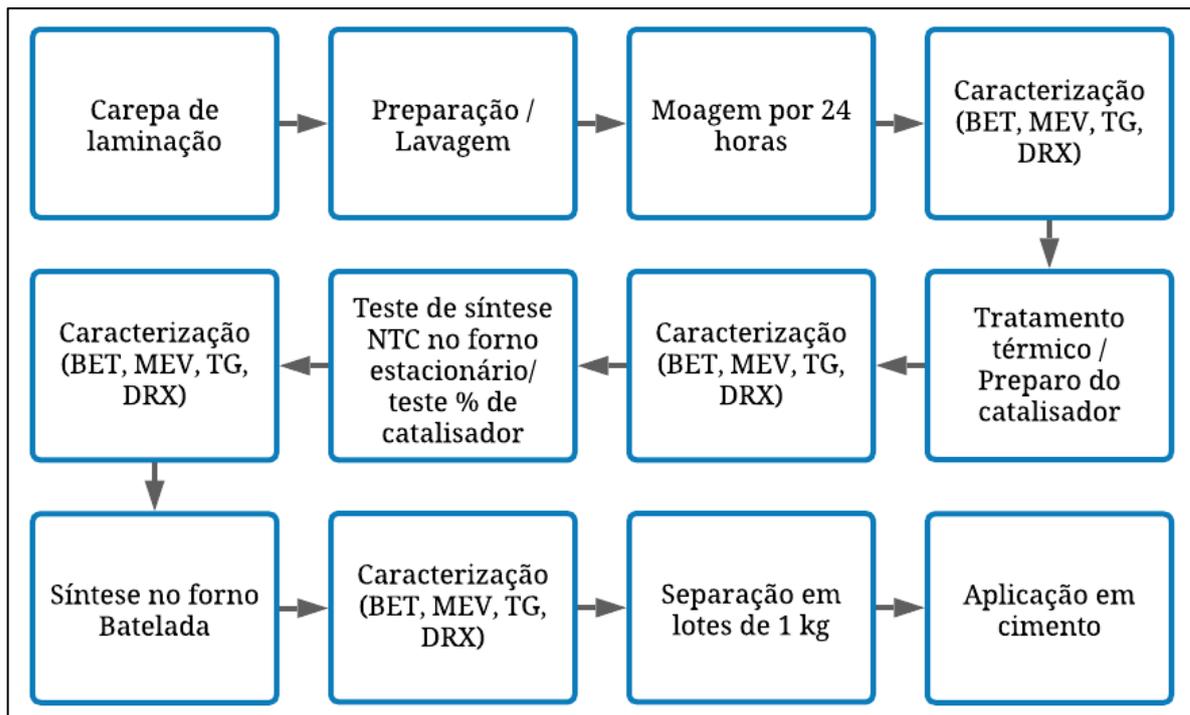
Tabela 3.6 – Composição química do cimento Portland

Componentes Químicos	Resultado de Ensaio	Exigência de acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018)
Perda ao fogo	6,77 %	≤ 6,5 %
Resíduo insolúvel	-	≤ 3,5 %
Sulfato de cálcio (CaSO <sub>4</sub> )	4,79 %	-
Trióxido de enxofre (SO <sub>3</sub> )	2,82 %	≤ 4,5 %
Óxido de magnésio (MgO)	1,22 %	≤ 6,5 %
Dióxido de silício (SiO <sub>2</sub> )	19,86 %	-
Óxido de ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	2,69 %	-
Óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	4,22 %	-
Óxido de cálcio (CaO)	61,90 %	-
Óxido de titânio (TiO <sub>2</sub> )	0,28 %	-
Álcali solúveis – Sódio (Na)	0,09 %	-
Álcali solúveis – Potássio (K)	0,33 %	-

### 3.2.4 Clínquer nanoestruturado

A síntese de NTC foi feita utilizando um clínquer de cimento Portland fornecido pela InterCement®. A Figura 3.4 mostra o fluxograma do processo de obtenção do clínquer nanoestruturado, utilizado no Centro de Tecnologia em Nanomateriais e Grafeno (CTNano), da UFMG.

Figura 3.4 -Fluxograma de obtenção do clínquer nanoestruturado



Fonte: CTNano/UFMG

O clínquer nanoestruturado utilizado possuía um rendimento de NTC de 15% ( $\pm 2$ ) e foi fabricado em janeiro de 2020. O Quadro 3.1 e a Figura 3.5 mostram as informações do lote CNT00120 utilizado na pesquisa.

Quadro 3.1 - Características do clínquer nanoestruturado

<b>Ficha técnica do clínquer nanoestruturado</b>	
Lote	CNT00120
Forma	Pó
Diâmetro	Entre 16 nm a 85 nm
Rendimento	15% ( $\pm 2$ )
Processo de síntese	Processo batelada rotativo tipo CVD
Morfologia	Nanotubos de carbono de paredes múltiplas e Nanofibras

Figura 3.5 - Informações do clínquer nanoestruturado utilizado na pesquisa

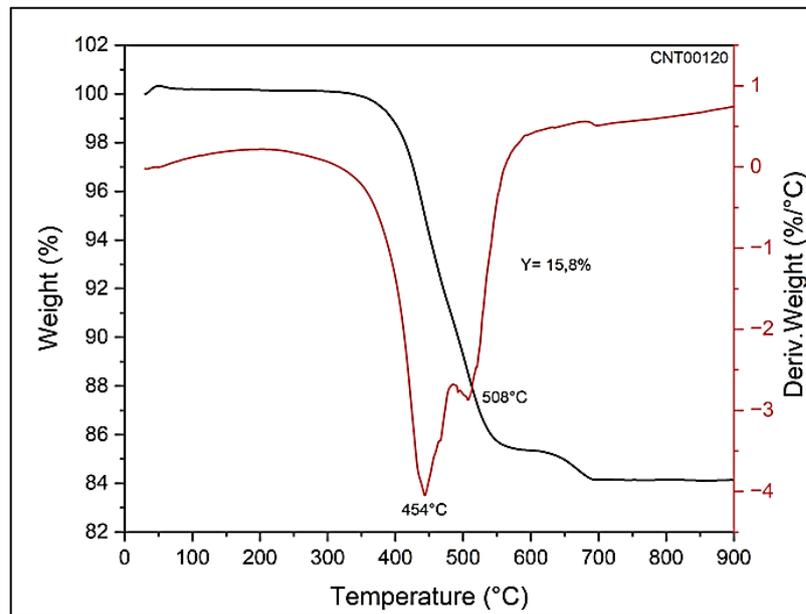


### *Análise termogravimétrica*

A técnica de termogravimetria (TG) mostra a variação da massa de um determinado material em função da temperatura ou do tempo, em um ambiente controlado de ar ou nitrogênio (atmosfera inerte). No caso de uma análise realizada em materiais de carbono, evidencia-se uma perda de massa característica devido a oxidação do carbono (CTNano/UFGM). Como são conhecidas na literatura, as faixas esperadas de queima para os nanotubos de carbono ocorrem entre 450°C e 600°C, sendo que, quanto maior a temperatura (acima de 600°C), maior a ocorrência de nanofibras de carbono na amostra. Estruturas degradadas abaixo de 400°C podem configurar presença de carbono amorfo ou estruturas com muitos defeitos.

No gráfico da Figura 3.6 é mostrada a análise termogravimétrica do clínquer nanoestruturado produzido. Esta análise mostra o percentual de queima de carbono da amostra quando exposto a uma atmosfera de oxigênio por um determinado tempo. Essa perda de massa corresponde ao percentual de rendimento de NTC obtido no processo de síntese. O rendimento de NTC do lote CNT00120 foi de aproximadamente 15 % no total, com dois picos de oxidação nas temperaturas: de 454°C (pico mais preponderante) e de 508°C.

Figura 3.6 - Análise termogravimétrica do clínquer nanoestruturado do lote CNTC00319

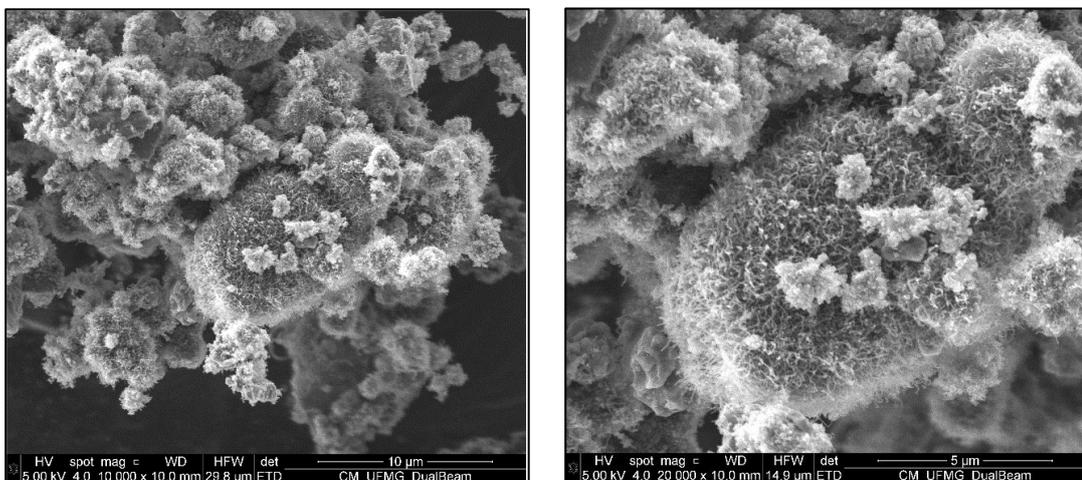


Fonte: CTNano/UFGM

### *Microscopia eletrônica de varredura – MEV*

A análise morfológica do lote CNTC00120 foi feita por meio de microscopia eletrônica de varredura de elétrons (MEV). A Figura 3.7 ilustra como os NTC estão dispostos nas partículas de clínquer. Nota-se que grande parte das partículas de clínquer estão recobertas pelas nanoestruturas. Apesar disso, pode-se observar algumas partículas sem sinais de recobrimento.

Figura 3.7 - Imagens de MEV do clínquer nanoestruturado do lote CNTC00120

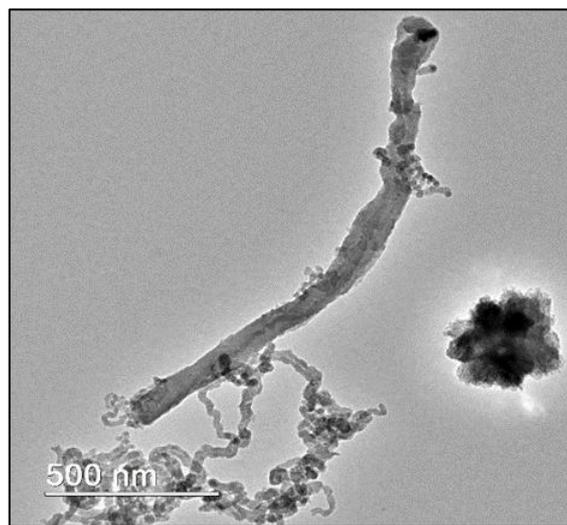


Fonte: CTNano/UFGM

### *Microscopia eletrônica de transmissão – MET*

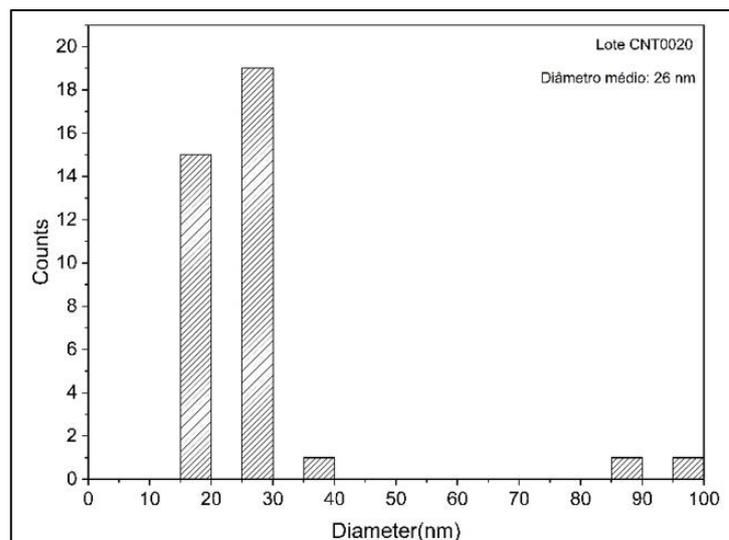
A estrutura interna, formação de paredes, diâmetro interno e externo são algumas características possíveis de serem avaliadas pela técnica de MET (CTNano/UFMG). De acordo com as imagens da Figura 3.8, a morfologia do material sintetizado sobre o clínquer compreende nanotubos e nanofibras de carbono. A distribuição dos diâmetros dos NTC está apresentada no histograma da figura 3.9. O diâmetro médio calculado do lote utilizado foi de 26 nm.

Figura 3.8 - Imagem de MET do clínquer nanoestruturado do lote CNTC00120



Fonte: CTNano/UFMG

Figura 3.9 - Distribuição dos diâmetros dos NTC utilizados na pesquisa



Fonte: CTNano/UFMG

### 3.2.5 Aditivo

Foi utilizado o aditivo superplastificante de alto desempenho ViscoCrete® - 6900, da marca Sika®. De acordo com sua ficha técnica, o aditivo age através da adsorção superficial e do efeito estérico, promovendo a separação das partículas de aglomerante e garantindo aumento no ganho de resistência inicial, redução de água, efeito plastificante, melhoria na produtividade e no comportamento de retração. O Quadro 3.2 a seguir mostra os dados do produto de acordo com o fabricante.

Quadro 3.2 – Dados do aditivo ViscoCrete®-6900

Dados do aditivo	
Base química	Solução de policarboxilato em meio aquoso
Aspecto / Cor	Líquido marrom claro
Densidade	1,10 ± 0,02 kg/L
Valor do pH	5,5 ± 1,0
Dosagem recomendada	0,3 a 1,5% sobre o peso de aglomerantes (cimento e adições, se houver)
Dispensador	Adicionar na água de amassamento ou diretamente à mistura de concreto fresco

## 3.3 Métodos

### 3.3.1 Dosagens estudadas

A fim de se obter um concreto bombeável de classe S160, a dosagem foi ajustada para que o abatimento fosse de 160 a 210 mm, resistência média à compressão ( $f_{cm}$ ) de 40 MPa aos 28 dias e que o concreto mantivesse boa aparência, sem exsudação ou segregação. Considerando a relação a/c em 0,45, o traço em massa em 1: 4,514 e a quantidade de aditivo em 0,4% em relação à massa de material cimentício total (cimento + clínquer nanoestruturado) para o concreto de referência (CREF), foram feitos dois traços contendo nanotubos de carbono, tendo a quantidade de aditivo e de agregado ajustados a partir de sua umidade. Os teores de NTC em relação à massa total de cimento anidro foram de 0,2% (CNTC0,2) e 0,4% (CNTC0,4). Nos concretos com NTC, as quantidades de aditivo e de agregados foram ajustadas em função da umidade desses últimos, já que esses concretos foram fabricados em datas distintas. Na Tabela 3.7 estão apresentadas as dosagens estudadas para as propriedades do concreto desta pesquisa.

Tabela 3.7 - Dosagens estudadas e propriedades do concreto

Concreto		CREF	CNTC0,2	CNTC0,4
Porcentagem de NTC (%) (em massa)		0	0,2	0,4
Dados de Composição (kg/m <sup>3</sup> )	Cimento	400	394,67	389,33
	Clínquer Nanoestruturado	0	5,33	10,67
	NTC	0	0,8	1,6
	Água	180	181	180
	Areia Natural	738	745	737
	Brita 19 mm	1066	1076	1065
	Aditivo Superplastificante	1,6	1,613	1,597
Propriedades do Concreto Fresco	Abatimento (cm)	21	21	21
	Ar Incorporado (%)	2,85	2,34	2,86
	Massa Unitária (kg/m <sup>3</sup> )	2395	2426	2390

### 3.3.2 Produção dos concretos

Os concretos foram produzidos no Laboratório de Furnas, localizado na BR-153, em Aparecida de Goiânia – GO em diferentes dias. Inicialmente foi feita a mistura do cimento com o clínquer nanoestruturado. Após a realização da mistura, foram produzidos, primeiramente, os concretos de referência e os concretos contendo 0,2% e 0,4% de NTC empregados nos ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade, resistência à tração por compressão diametral e resistência à tração na flexão. Em segundo momento, foi produzido o concreto referente aos ensaios de retração, fluência e teste de dano de rigidez.

Para a produção dos concretos foi utilizada uma betoneira com capacidade de 600 litros. A mistura do cimento com o clínquer nanoestruturado foi feita colocando os dois materiais durante 10 minutos na betoneira apresentada na Figura 3.10, também de 600 litros, que foi tampada com um plástico para evitar que a dispersão dos materiais.

Figura 3.10 - Betoneira utilizada para mistura dos materiais



### 3.3.3 Ensaio de caracterização dos concretos no estado fresco

No estado fresco dos concretos foram realizados os seguintes ensaios: abatimento de tronco de cone e teor de ar incorporado pelo método pressométrico.

#### *Abatimento de tronco de cone*

Realizado de acordo com a norma NBR NM 67 (ABNT, 1998), esse ensaio tem como objetivo determinar a consistência do concreto fresco através da medida de seu assentamento. O método só é aplicável em concretos que apresentem abatimento igual ou superior a 10 mm e não é aplicável caso o agregado graúdo apresente dimensão máxima maior que 37,5 mm. Foi possível realizar no concreto em estudo pois o assentamento era superior a 20 mm, e o agregado graúdo utilizado possuía dimensão máxima de 19 mm.

Nesse ensaio foram utilizados um molde com forma de tronco de cone com diâmetro inferior de  $200 \pm 2$  mm, diâmetro superior de  $100 \pm 2$  mm e altura  $300 \text{ mm} \pm 2$  mm, uma haste de compactação com diâmetro de 16 mm e comprimento de 600 mm e uma placa metálica quadrada para apoio do molde com dimensão de no mínimo 500 mm.

O molde e a placa da base foram umedecidos e o concreto foi colocado no tronco de cone de *Abrams* em três camadas, cada uma com aproximadamente um terço da altura do molde. Cada camada foi compactada com 25 golpes da haste de compactação. A superfície foi rasada, a placa da base foi limpa e o molde foi retirado na direção vertical cuidadosamente. O abatimento do concreto foi determinado medindo a diferença entre a altura do molde e a altura do eixo do concreto espalhado, como mostra a Figura 3.11.

Figura 3.11 - Realização do ensaio de abatimento de tronco de cone



### *Teor de ar incorporado*

O ensaio foi determinado de acordo com a NBR 16887 (ABNT, 2020), que estabelece o método para a determinação do teor de ar incorporado no concreto fresco a partir da mudança de volume do concreto devido a uma mudança de pressão.

O medidor utilizado é mostrado na Figura 3.12. O ensaio consiste em igualar as pressões de um volume de ar conhecido a uma pressão conhecida em uma câmara de ar estanque, com um volume de ar desconhecido na amostra do concreto.

Figura 3.12 - Medidor utilizado



Primeiramente, o concreto foi colocado no recipiente e vibrado com o uso de vibrador de imersão. Após o adensamento, a superfície do concreto foi rasada com uma régua metálica. O equipamento foi fechado, assim como a válvula de ar principal e as chaves A e B foram abertas. Injetou-se água por uma das chaves até que a água saísse pela outra chave. Bateu-se no recipiente com um martelo de borracha até que todo o ar fosse expulso.

Após a preparação do ensaio, a válvula de saída de ar foi fechada e bombeou-se ar para a câmara até que a linha do manômetro estivesse junto com a linha de pressão inicial. O sistema foi deixado em repouso por alguns segundos, as chaves foram fechadas e a válvula de ar principal foi aberta. Após bater levemente no recipiente com um martelo de borracha, a porcentagem de ar na escala foi lida e a pressão aliviada ao abrir as chaves.

### 3.3.4 Moldagem dos corpos de prova

Para a moldagem dos corpos de prova, o concreto foi retirado da betoneira e colocado em um carrinho de mão. Após aplicado o desmoldante nos moldes, os corpos de prova foram moldados de acordo com a

NBR 5738 (ABNT, 2015), utilizando vibrador de imersão para o adensamento. A Figura 3.13 mostra o adensamento dos corpos de prova prismáticos.

Figura 3.13 - Adensamento dos corpos de prova com vibrador de imersão



Antes da concretagem dos corpos de prova para o ensaio de retração autógena, foram posicionados extensômetros do tipo corda vibrante no concreto, de modo que seus eixos coincidisse com o eixo dos moldes, como mostra a Figura 3.14.

Figura 3.14 - Extensômetros posicionados no corpo de prova para o ensaio de retração autógena



Antes da concretagem dos corpos de prova para o ensaio de fluência básica, foram embutidos extensômetros elétricos medidores de deformação, que foram posicionados no eixo dos moldes e na posição vertical, conforme mostra a Figura 3.15. Após moldados, os corpos de prova

permaneceram na sala de dosagem cobertos com plástico por cima para evitar a perda de umidade, como mostra a Figura 3.16.

Figura 3.15 – Posicionamento do extensômetro no ensaio de fluência



Figura 3.16 - Corpos de prova logo após a moldagem



Após 24 horas os corpos de prova foram levados para a câmara úmida para a cura, onde a temperatura e a umidade eram mantidas em 23,5 °C e 97% respectivamente. Os corpos de prova permaneceram ali até a data de ensaio, quando foram retirados, identificados. Os corpos de prova cilíndricos foram retificados, como mostra a Figura 3.17, garantindo uma superfície lisa

e plana. Após a retificação, os corpos de prova foram embalados com plástico para evitar que houvesse perda de umidade e que se espalhassem fragmentos ao acontecer a ruptura, como ilustra a Figura 3.18.

Figura 3.17 – Retificação dos corpos de prova



Figura 3.18 – Corpos de prova cilíndricos preparados para ensaios de propriedades mecânicas



Tabela 3.8 – Quantidade de corpos de prova moldados para cada ensaio

Idade	Resistência à compressão <sup>1</sup>	Módulo de elasticidade <sup>1</sup>	Resistência à tração por compressão diametral <sup>1</sup>	Resistência à tração na flexão <sup>2</sup>
3 dias	3	3	3	3
7 dias	3	3	3	3
28 dias	3	3	3	3

Idade	Retração autógena <sup>2</sup>	Retração por secagem <sup>3</sup>	Fluência <sup>4</sup>	Teste de dano de rigidez <sup>1</sup>
3 dias	2	2	-	-
7 dias	-	-	2	-
28 dias	-	-	-	3

<sup>1</sup> Corpos de prova cilíndricos 100 x 200 mm

<sup>2</sup> Corpos de prova prismáticos 150 x 150 x 600 mm

<sup>3</sup> Corpos de prova prismáticos 75 x 75 x 285 mm

<sup>4</sup> Corpos de prova cilíndricos 150 x 450 mm

### 3.3.5 Ensaio dos concretos no estado endurecido

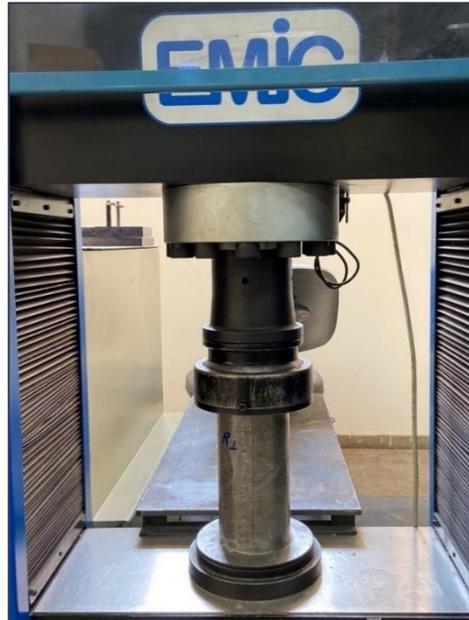
No estado endurecido foram feitos os seguintes ensaios: resistência à compressão, módulo de elasticidade, resistência à tração por compressão diametral e resistência à tração na flexão nas idades de 3, 7 e 28 dias. Aos 28 dias também foi feito o teste de dano de rigidez. Para cada idade e cada ensaio foram moldados três corpos de prova. Os ensaios de retração autógena, retração por secagem e fluência foram rastreados até a idade de 90 dias através de três corpos de prova para casa. Todos os ensaios foram realizados de acordo com suas respectivas normas.

#### *Resistência à compressão*

Foram obtidos seis resultados de resistência à compressão para cada idade e cada traço: três dos corpos de prova direcionados a este ensaio, e mais três dos corpos de prova direcionados ao ensaio de módulo de elasticidade, que depois foram rompidos.

O ensaio foi feito de acordo com a norma NBR 5739 (ABNT, 2018), utilizando prensa servo hidráulica EMIC DL 100000 (capacidade de 1000 kN). A Figura 3.19 mostra a realização do ensaio e a prensa utilizada.

Figura 3.19 - Ensaio de resistência à compressão



De acordo com a norma, o cálculo da resistência é feito de acordo com a Equação 3.1.

Equação 3.1 - Cálculo da resistência à compressão

$$f_c = \frac{4F}{\pi \times D^2}$$

onde:

- $f_c$  é a resistência à compressão, em megapascals (MPa);
- $F$  é a força máxima alcançada, em Newtons (N);
- $D$  é o diâmetro do corpo de prova, em milímetros (mm).

#### *Módulo de elasticidade*

O módulo de elasticidade foi determinado de acordo com o método da NBR 8522 (ABNT, 2021), utilizando extensômetros do tipo LVDT e a metodologia A da norma. A Figura 3.20 mostra a realização do ensaio.

Figura 3.20 - Ensaio de módulo de elasticidade



O módulo de elasticidade inicial  $E_{ci}$  de cada corpo de prova é calculado de acordo com a Equação 3.2:

Equação 3.2 - Cálculo do módulo de elasticidade inicial

$$E_{ci} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} 10^{-3} = \frac{\sigma_b - 0,5}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} 10^{-3}$$

onde:

- $\sigma_b$  é a tensão maior, considerada com 30% da resistência à compressão, em MPa;
- 0,5 é o valor da tensão básica, em MPa;
- $\varepsilon_b$  é a deformação específica do concreto, sob a tensão maior;
- $\varepsilon_a$  é a deformação específica do concreto sob a tensão básica.

### *Resistência à tração na flexão*

Existem três tipos de ensaios para determinação da resistência à tração: tração direta, tração na flexão e tração por compressão diametral. Nesse estudo foram realizados os ensaios de resistência à tração na flexão e à tração por compressão diametral.

O ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado de acordo com a norma NBR 12142 (ABNT, 2010) utilizando corpos-de-prova prismáticos de dimensões 15 x 15 x 60 cm. Os corpos-de-prova foram posicionados de forma que ficassem centralizados, conforme mostra a Figura 3.21.

Figura 3.21 - Ensaio de tração na flexão



Após a realização do ensaio foi medido o corpo-de-prova em sua seção de ruptura e calculada a resistência à tração de acordo com a Equação 3.3:

Equação 3.3 - Cálculo da resistência à tração

$$f_{ct,f} = \frac{F \cdot l}{b \cdot d^2}$$

Caso a ruptura ocorra fora do terço médio, a uma distância não superior a 5% de  $l$ , a resistência à tração na flexão deve ser calculada pela Equação 3.4:

Equação 3.4 - Cálculo da resistência à flexão caso a ruptura ocorra fora do terço médio

$$f_{ct,f} = \frac{3 \cdot F \cdot a}{b \cdot d^2}$$

onde:

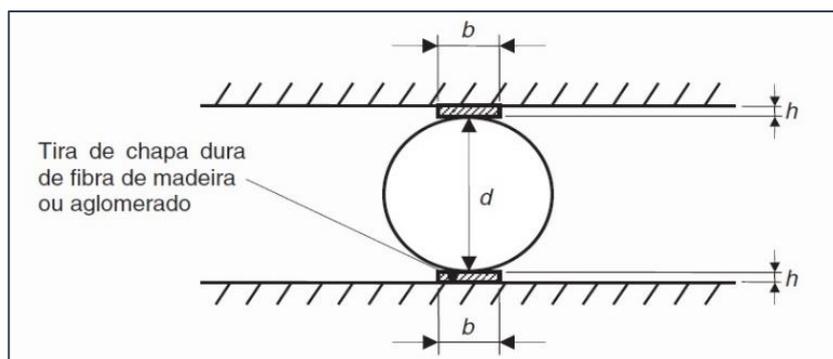
- $f_{ct,f}$  é a resistência à tração na flexão, em MPa;
- $F$  é a força máxima registrada na máquina de ensaio, em N;

- $l$  é a dimensão do vão entre apoios, igual a 450 mm;
- $b$  é a largura média do corpo-de-prova, em mm;
- $d$  é a altura média do corpo-de-prova, em mm;
- $a$  é a distância média entre a linha de ruptura e a linha correspondente ao apoio mais próximo, em mm.

### *Resistência à tração por compressão diametral*

A resistência à tração por compressão diametral foi determinada de acordo com a norma NBR 7222 (ABNT, 2011). Para o auxílio no ensaio, foram utilizadas tiras de madeira do mesmo comprimento do corpo-de-prova, como ilustram as Figuras 3.22 e 3.23.

Figura 3.22 - Tiras de madeira para auxílio no ensaio



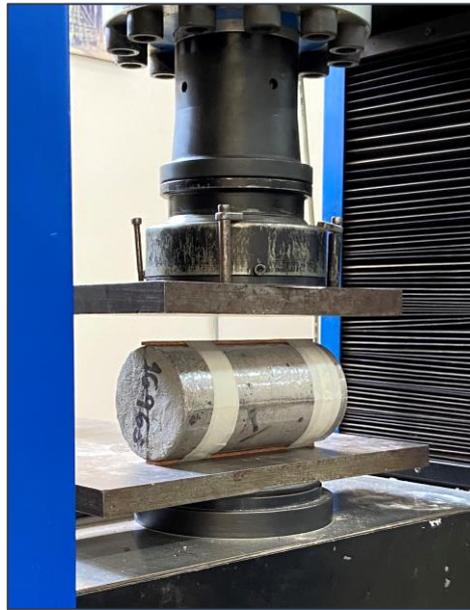
Fonte: NBR 7222 (ABNT, 2011)

Figura 3.23 - Tiras de madeira posicionadas nos corpos de prova



Após a determinação da altura e do diâmetro dos corpos-de-prova, foram traçadas duas linhas para traçar o plano axial e as tiras de madeira foram coladas nessas linhas. Os pratos foram posicionados e a carga foi aplicada continuamente com o crescimento constante a uma velocidade de  $(0,05 \pm 0,02)$  MPa/s até que os corpos-de-prova rompessem. A Figura 3.24 mostra a preparação do ensaio.

Figura 3.24 - Ensaio de resistência à tração por compressão diametral



A resistência à tração por compressão diametral foi então calculada pela Equação 3.5:

Equação 3.5 - Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

$$f_{ct,sp} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot d \cdot l}$$

Onde:

- $f_{ct,sp}$  é a resistência à tração por compressão diametral, em MPa;
- $F$  é a força máxima obtida no ensaio, em N;
- $d$  é o diâmetro do corpo-de-prova, em mm;
- $l$  é a altura do corpo-de-prova, em mm.

### *Retração autógena e por secagem*

A retração, de acordo com Hasparyk *et al.* (2005), está associada a deformações em pastas de cimento, argamassas e concretos, sem que haja qualquer tipo de carregamento. Em geral, a principal causa da retração é a perda de água da pasta de cimento. As fissuras no concreto endurecido devido à perda de água podem ser causadas, principalmente, por retração autógena e retração por secagem.

A retração autógena, segundo Silva e Dantas (2005), é um fenômeno que ocorre quando durante a hidratação do cimento é gerada uma porosidade muito fina nos poros de gel que drena água dos capilares de poros maiores para continuar o processo de hidratação. Caso os capilares maiores não possuam água suficiente, ocorre a formação de meniscos capilares nos poros de gel, causando tensões capilares muito altas e, conseqüentemente, a retração autógena. Essa reação é causada exclusivamente pelas reações químicas de hidratação do cimento no decorrer do tempo, sem que haja trocas de umidade com o ambiente ou qualquer outra influência externa de temperatura ou carga.

A retração por secagem ou hidráulica, segundo Equipe de Furnas (1997), é o fenômeno onde ocorre a contração irreversível decorrente da variação de umidade das pastas de cimento, argamassas ou concreto. Tal contração manifesta-se imediatamente após o adensamento (contração no estado fresco), e após o início do endurecimento (retração por secagem).

Não existe, no Brasil, norma que padronize os ensaios de retração. Os procedimentos foram realizados de acordo com o que prescreve a Instrução de Trabalho de Furnas, norma interna da empresa que descreve os ensaios.

Para o ensaio de retração autógena, os corpos de prova foram removidos das formas 24 horas após a moldagem e embalados com plástico filme e proteção de manta de borracha para impedir a perda de umidade para o ambiente. Em seguida os corpos foram estocados em uma sala com temperatura controlada de  $23 \pm 2$  °C durante 24 horas para estabilização a essa temperatura quando foi feita a leitura inicial de deformação. Após a leitura inicial, foram realizadas leituras diárias durante uma semana e posteriormente, pelo menos duas leituras semanais até completar 85 dias. As Figuras 3.25 e 3.26 mostram respectivamente os corpos de prova retração autógena preparados para os ensaios e o equipamento de leitura das deformações.

Figura 3.25 - Extensômetros posicionados no corpo de prova para o ensaio de retração autógena



Figura 3.26 - Leitura da retração autógena



O ensaio de retração por secagem foi realizado de acordo a norma NM 131 (ABNT, 1998). Os corpos de prova foram estocados em câmara úmida de umidade relativa acima de 95% imediatamente após a moldagem. Decorridas  $24,5 \text{ h} \pm 0,5 \text{ h}$  da mistura do concreto, os corpos de prova foram removidos dos moldes e colocados em água à temperatura de  $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$  por pelo menos 30 minutos antes de ser realizada a leitura do comprimento inicial. A Figura 3.27 mostra os corpos de prova utilizados para o ensaio de retração hidráulica e as Figuras 3.28 e 3.29 o aparelho comparador vertical utilizado para a medição.

Figura 3.27 - Corpos de prova utilizados para o ensaio de retração hidráulica



Figura 3.28 - Aparelho medidor utilizado no ensaio de retração hidráulica



Figura 3.29 - Corpo de prova sendo medido no aparelho medidor



Fonte: Equipe de Furnas (1997)

Após a leitura inicial, os corpos de prova foram estocados em recipiente com água saturada de cal à temperatura de  $23\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$  até a idade de 28 dias. Após esse período os corpos de prova foram removidos do tanque, quando foi feita a segunda medida de comprimento. A seguir, os corpos de prova foram transferidos para sala climatizada, com temperatura de  $23\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$  e umidade relativa igual a  $50 \pm 4\%$ .

As medições foram realizadas na seguinte sequência:

- a) Após 24 horas (desforma e medida do comprimento inicial);
- b) Imediatamente antes da data de início do ensaio, ainda na câmara úmida;

- c) Imediatamente após a estocagem no ar, na câmara com umidade relativa de  $50 \pm 4\%$ ;
- d) Diariamente, até a estabilização das deformações.

Após as medições, as deformações de retração por secagem foram calculadas através da Equação 3.6:

Equação 3.6 - Cálculo da deformação de retração

$$\varepsilon = \frac{L_1 - L_2}{L_1} \times 100$$

Onde:

- $\varepsilon$  é a deformação de retração por secagem;
- $L_1$  é a leitura do comprimento das barras após a desforma e imersão em água por 30 minutos;
- $L_2$  é a leitura do comprimento das barras ao fim do período de cura úmida, e nos períodos de armazenagem em câmara de  $50 \pm 4\%$  de umidade relativa do ar.

### *Fluência básica*

Segundo a NBR 8224 (ABNT, 2012), fluência é a deformação devida a um carregamento mantido ao longo do tempo. A deformação por fluência é determinada em certa idade através da diferença entre a deformação total e a soma das deformações independentes da permanência do carregamento ao longo do tempo (deformação imediata e deformação autógena).

O método de ensaio utilizado para medir a fluência do concreto foi o descrito na norma NBR 8224 (ABNT, 2012). Foram utilizados 2 corpos de prova para cada concreto. O ensaio utilizou uma célula de carregamento hidráulico, que consiste em um cilindro de aço ligado a válvulas hidráulicas. Uma das válvulas recebe a pressão de óleo e a transmite ao pistão de borracha. A outra válvula é usada para retirar o ar do óleo enquanto ocorre o carregamento da célula. Tal aparato é mostrado na Figura 3.30.

Anteriormente ao início da leitura das deformações, foram feitos dois ciclos iniciais de carregamentos e descarregamentos nos corpos de prova, até a carga estabelecida no ensaio. A tensão aplicada nos corpos de prova, segundo a norma NBR 8224 (ABNT, 2012), foi de

( $40 \pm 2$ ) % da resistência à compressão do concreto na idade do carregamento, utilizada a idade de 7 dias. Foi realizada uma leitura nos aparelhos medidores de deformação imediatamente antes do carregamento definitivo. As leituras seguintes foram realizadas na seguinte sequência:

- a) 30 s após o carregamento (deformação imediata);
- b) 5 min, 10 min e 30 min após o carregamento;
- c) 1, 2 e 5 horas após o carregamento;
- d) duas vezes por semana até completar um mês;
- e) semanalmente até completar o ensaio.

Figura 3.30 - Sistema de ensaio de fluência básica



Após a realização do ensaio, o cálculo da deformação da fluência básica foi feito através da Equação 3.7 a seguir.

Equação 3.7 - Cálculo da deformação da fluência

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_t - \varepsilon_i - \varepsilon_s$$

Onde:

- $\varepsilon_{cc}$  é a deformação por fluência;
- $\varepsilon_t$  é a deformação total a partir da leitura de referência, nos corpos de prova sob carregamento, na idade considerada;
- $\varepsilon_i$  é a deformação imediata medida no ato de aplicação de carga;
- $\varepsilon_s$  é a deformação média dos corpos de prova complementares não submetidos a carregamento (deformação autógena).

### *Teste de dano de rigidez*

O Ensaio de Dano de Rigidez ou *Stiffness Damage Test* (SDT) foi proposto por Walsh (1965) como uma ferramenta para quantificar o grau de dano físico em rochas. Em 1987, Crouch adaptou o procedimento para avaliar a deterioração do concreto devido à mecanismos expansivos de deterioração, como a reação álcali-agregado, reação sulfática interna, ou mecanismos de gelo-degelo. (SANCHEZ *et al*, 2015; HASPARYK e SANCHEZ, 2021)

Segundo Sanchez *et al.* (2016), originalmente o teste era baseado em um carregamento de compressão cíclico dos corpos de prova com uma carga fixa de 5,5 MPa e uma taxa de carregamento de 0,10 MPa/s. Smaoui *et al.* (2004) propuseram aumentar a carga para 10 MPa para melhorar a determinação do dano devido às reações álcali-agregado no concreto.

Baseados em uma série de experimentos, Sanchez *et al.* (2014) sugeriram a modificação do procedimento do SDT utilizando uma porcentagem da resistência máxima à compressão do concreto ao invés de uma carga fixa. Os autores avaliaram que 40% da resistência máxima do concreto resultou em uma melhor correlação entre os parâmetros do SDT e as expansões causadas pela reação álcali-agregado. Além disso, os autores propuseram o uso de índices como resultados do ensaio ao invés de valores brutos de energia dissipada e deformação plástica para aumentar a efetividade e reduzir a variabilidade do ensaio (HASPARYK E SANCHEZ, 2021). Sanchez *et al.* (2016) sugeriram os índices *Stiffness Damage Index* (SDI) e o *Plastic Deformation Index* (PDI), que representam a razão entre a energia dissipada/deformação plástica para a energia total/deformação total aplicada no sistema ao longo dos cinco ciclos.

O SDT não aparenta ser destrutivo quando realizado com a carga de até 40% da resistência do concreto, permitindo a utilização do mesmo corpo-de-prova para a realização de outros ensaios mecânicos, como compressão e tração. No entanto, mesmo que o ensaio de SDT pareça promissor, são necessários mais estudos para avaliar o impacto de alguns parâmetros nos resultados do teste de danos de rigidez, proporcionando um banco de dados mais completo e condições para o processo de padronização do SDT. (SANCHEZ *et al.*, 2015)

O teste de dano de rigidez foi utilizado para avaliar a integridade dos concretos contendo NTC aos 28 dias conforme procedimento contido em Hasparyk e Sanchez (2021). Após o posicionamento dos corpos de prova no equipamento, foram aplicados cinco carregamentos cíclicos controlados por uma velocidade de carga de 0,10 MPa/s. A carga máxima aplicada foi o valor de 40% da resistência à compressão daquele concreto.

A partir do ensaio são determinados dois parâmetros: dano de rigidez (SDI) e deformação plástica (PDI), que são calculados pelas Equações 3.8 e 3.9 a seguir (SANCHEZ, 2014).

Equação 3.8 - Cálculo de dano de rigidez (SDI)

$$SDI = \frac{SI}{SI + SII}$$

onde:

- SI é a energia de deformação irreversível (área do primeiro ciclo de carregamento);
- SII é a energia de deformação elástica (área de histerese entre máxima tensão e máxima deformação)

Equação 3.9 - Cálculo da deformação plástica (PDI)

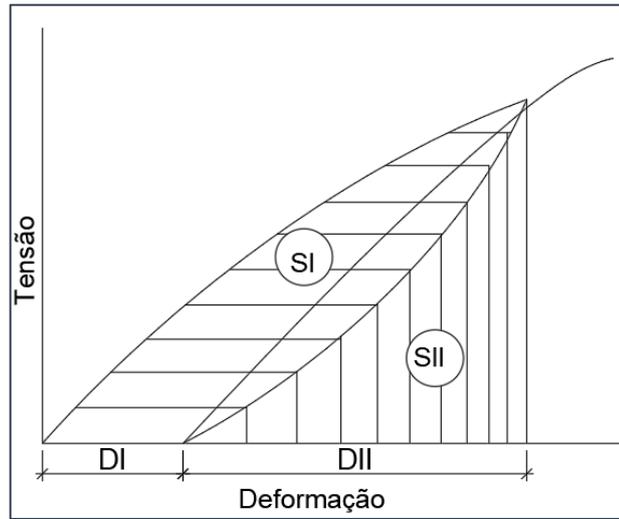
$$PDI = \frac{DI}{DI + DII}$$

onde:

- DI é a deformação plástica no primeiro ciclo de carregamento;
- DII é a deformação plástica nos demais ciclos.

Os resultados são apresentados em gráfico, como mostra a Figura 3.31.

Figura 3.31 - Índice de rigidez



Fonte: Sanchez *et al.* (2017) *apud* Amantino (2021)

## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

---

### 4.1 Resultados e análise dos ensaios dos concretos no estado fresco

#### 4.1.1 Ensaio de abatimento de tronco de cone

Logo após o preparo dos concretos foi realizado o *slump test* para determinar a consistência do concreto pelo abatimento do tronco de cone. Não houve diferença de consistência entre os concretos e todos apresentaram 21 mm de abatimento, os classificando como concretos de classe S160. As Figuras 4.1 e 4.2 mostram a realização do ensaio de *slump test* e o gráfico com os resultados dos ensaios, respectivamente.

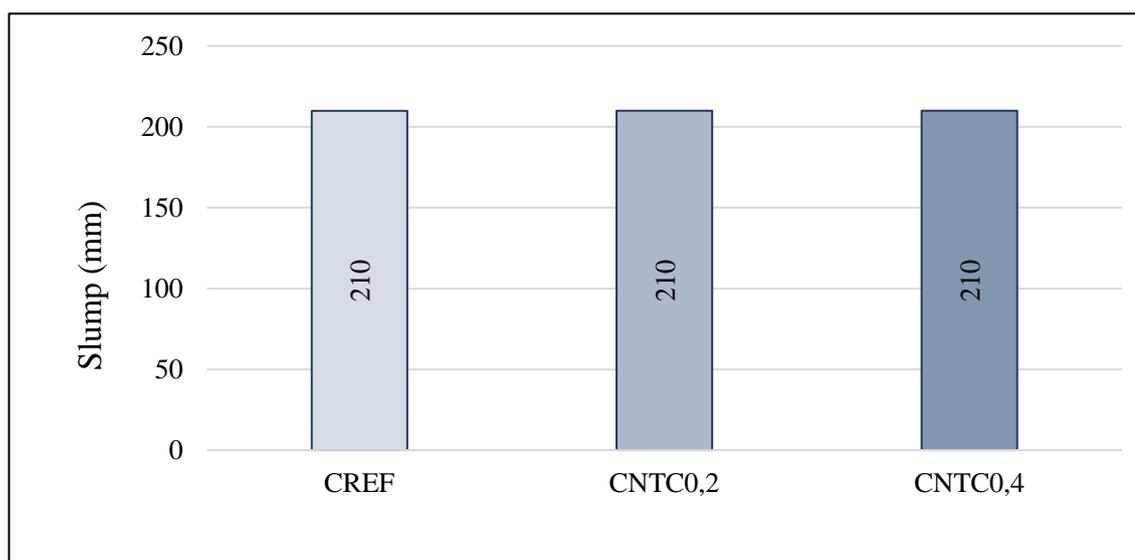
Figura 4.1 - *Slump Test*



Diferente dos resultados apresentados nessa pesquisa, Borges (2019) obteve abatimento diferente para o traço de referência. Verificou-se abatimento menor para o concreto de referência (160 mm) e maior para os concretos contendo 0,15% e 0,30% (180 mm). Dos oito trabalhos apresentados na seção 2.2.1, três trabalhos não apresentaram alteração na trabalhabilidade do concreto após a adição de NTC. Do restante dos trabalhos revisados, quatro

apresentaram redução na trabalhabilidade. Marcondes (2012) explicou que essa perda de trabalhabilidade ocorreu devido a maior superfície específica do NTC e Tonder e Mafokoane (2014) atribuíram esse fato à dificuldade de dispersão uniforme dos NTC. Apenas um trabalho apresentou aumento de trabalhabilidade após a adição de NTC. MacLoad *et al.* (2020), que observaram aumento do slump em sua pesquisa, explicaram que o NTC pode ter facilitado a retenção de água no concreto durante o processo de pega.

Figura 4.2 - Resultados do *slump test* do concreto



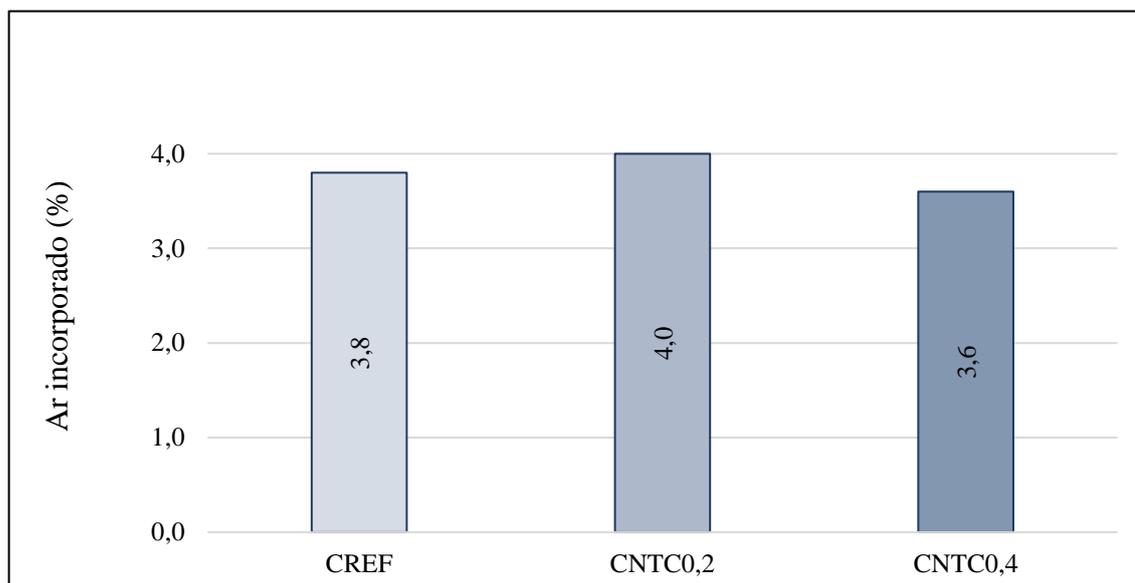
#### 4.1.2 Ensaio de teor de ar incorporado

Os resultados do ensaio de teor de ar incorporado são apresentados na Figura 4.3. Pode-se observar que houve um ligeiro aumento do resultado do concreto contendo 0,2% de NTC em relação ao concreto de referência e uma leve redução do concreto contendo 0,4% de NTC. Esses valores podem ser explicados devido a maior massa unitária do concreto CNTC0,2, que possui maior quantidade de agregado graúdo, podendo ser observado na Tabela 3.7. Também pode ser explicado pela maior quantidade de água relacionada à maior quantidade de areia, que aumentou a superfície específica de molhagem.

Borges (2019) encontrou maiores porcentagens de ar incorporado para concretos com maiores quantidades de NTC, diferente do que ocorreu nessa pesquisa. Para o concreto de referência, encontrou 1,7% de teor de ar incorporado, aumentando para 2,5% e 3,0% nos teores de 0,15% e 0,30% de NTC, respectivamente.

Entretanto, diante da realização de apenas um ensaio para cada traço, não é possível afirmar que a presença de NTC não influenciou os resultados de teor de ar incorporado desta pesquisa.

Figura 4.3 - Resultados do ensaio do teor de ar incorporado



## 4.2 Resultados e análise dos ensaios dos concretos no estado endurecido

### 4.2.1 Propriedades mecânicas

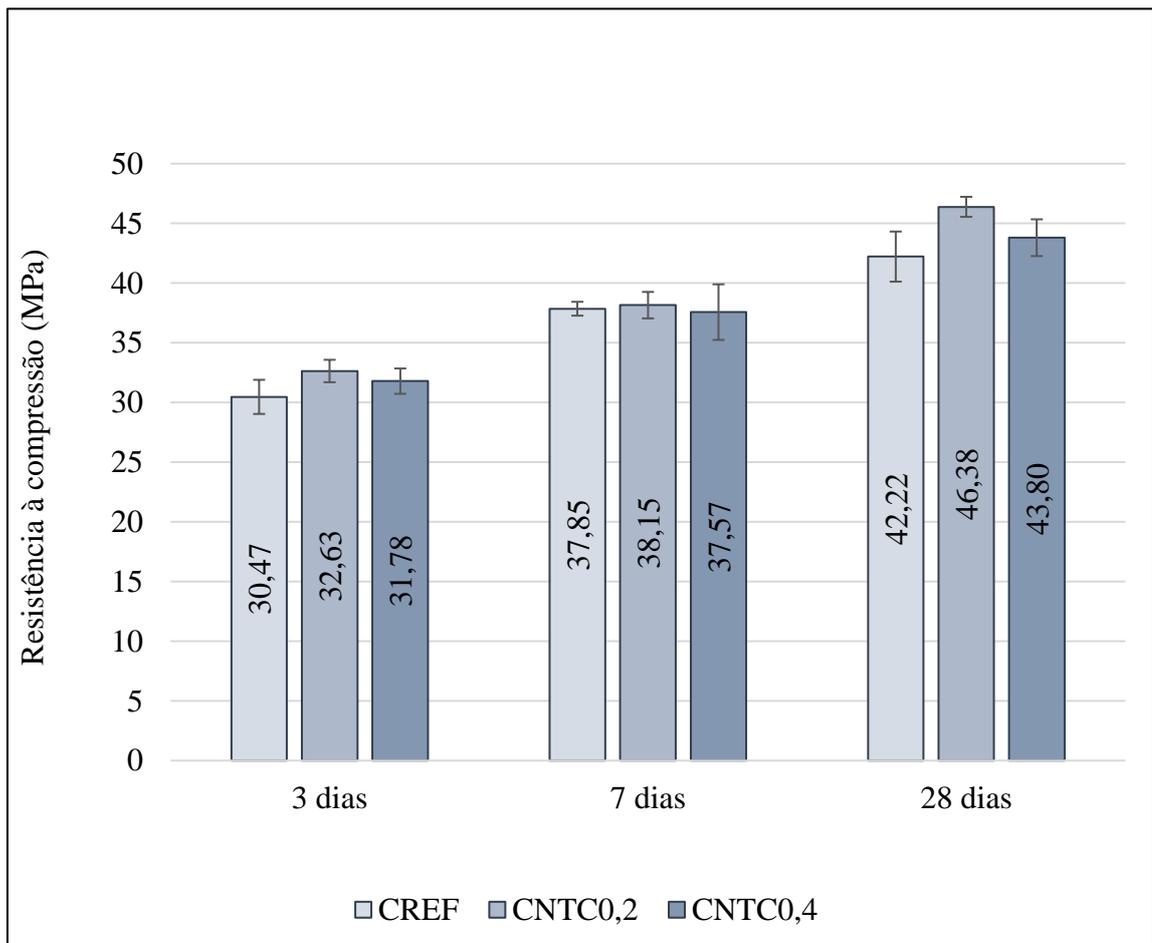
#### *Resistência à compressão*

Para a determinação das resistências à compressão, foram ensaiados 6 corpos de prova para cada idade e cada traço, sendo 3 corpos de prova destinados exclusivamente para o ensaio de compressão e 3 corpos de prova provenientes do ensaio de módulo de elasticidade. O resumo dos resultados pode ser visto na Tabela 4.1 e no gráfico da Figura 4.4.

Tabela 4.1 - Resumo de resistência à compressão por idade

Idade (dias)	Parâmetros	CREF	CNTC0,2	CNTC0,4
3	Resistência à compressão média (MPa)	30,47	32,96	31,78
	Desvio padrão (MPa)	1,43	0,55	1,06
	Coefficiente de variação (%)	4,69%	1,66%	3,34%
	Diferença em relação ao CREF	-	8,18%	4,32%
7	Resistência à compressão média (MPa)	37,68	38,15	38,12
	Desvio padrão (MPa)	0,45	1,11	2,12
	Coefficiente de variação (%)	1,21%	2,90%	5,56%
	Diferença em relação ao CREF	-	1,25%	1,17%
28	Resistência à compressão média (MPa)	42,22	46,38	43,66
	Desvio padrão (MPa)	2,10	0,94	1,68
	Coefficiente de variação (%)	4,97%	2,04%	3,85%
	Diferença em relação ao CREF	-	9,86%	3,42%

Figura 4.4 - Resultados de resistência à compressão por idade



A resistência média à compressão especificada de 40 MPa aos 28 dias foi obtida em todos os concretos fabricados. Da análise estatística apresentada no Apêndice B, pode-se concluir que o concreto contendo 0,2% de NTC apresentou melhor desempenho para a resistência à compressão entre os concretos estudados, bem como nas idades avaliadas. Em oito dos onze artigos analisados na revisão bibliográfica apresentada foram observadas melhorias na resistência à compressão dos concretos contendo NTC. Hamzaoui *et al.* (2012) observou que aumentar a quantidade de NTC acima de certa porcentagem fez com que a resistência diminuísse. Madhavi *et al.* (2013) atribuiu o aumento da resistência à compressão nos concretos contendo NTC ao preenchimento de vazios e Tonder e Mafokoane (2014), à diminuição da zona de transição entre o concreto e o agregado.

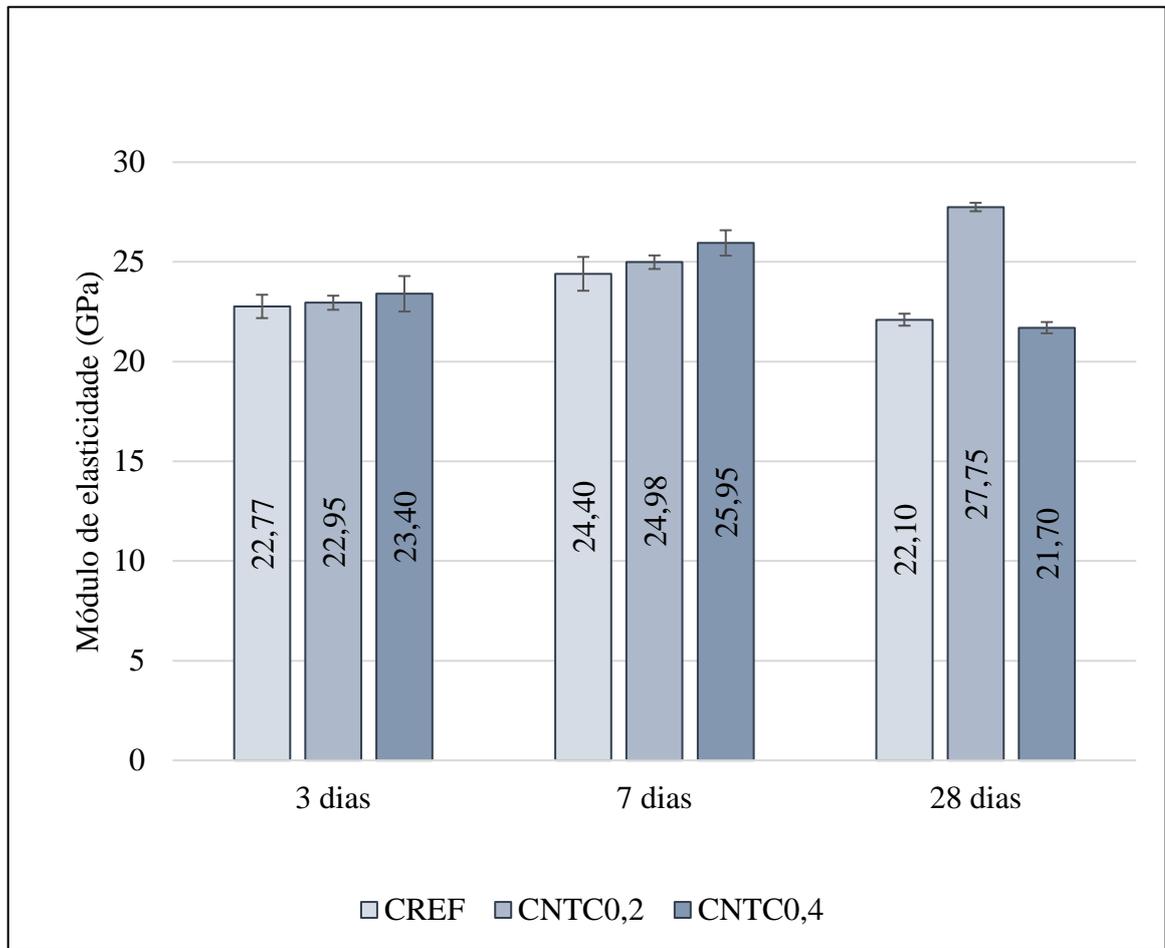
### *Módulo de elasticidade*

Para a determinação dos módulos de elasticidade, foram ensaiados 3 corpos de prova para cada traço em cada idade, resultando em 9 corpos de prova no total. O resumo dos resultados do ensaio está representado na Tabela 4.2 e no gráfico da Figura 4.5 a seguir.

Tabela 4.2 - Resumo dos resultados de módulo de elasticidade por idade

<b>Idade (dias)</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>CREF</b>	<b>CNTC0,2</b>	<b>CNTC0,4</b>
3	Módulo de elasticidade médio (GPa)	22,77	22,95	23,40
	Desvio padrão (GPa)	0,59	0,35	0,89
	Coefficiente de variação (%)	2,57%	1,54%	3,80%
	Diferença em relação ao CREF	-	0,81%	2,78%
7	Módulo de elasticidade médio (GPa)	24,40	24,98	25,95
	Desvio padrão (GPa)	0,85	0,34	0,64
	Coefficiente de variação (%)	3,48%	1,36%	2,45%
	Diferença em relação ao CREF	-	2,39%	6,35%
28	Módulo de elasticidade médio (GPa)	22,10	27,75	21,70
	Desvio padrão (GPa)	0,30	0,21	0,28
	Coefficiente de variação (%)	1,36%	0,76%	1,30%
	Diferença em relação ao CREF	-	25,57%	-1,81%

Figura 4.5 - Resultados de módulo de elasticidade por idade



Com base na análise estatística (Apêndice B), pode-se concluir que, assim como as revisões bibliográficas apresentadas, o NTC não acarretou em ganhos significativos para o módulo de elasticidade dos concretos. Esse comportamento era esperado, já que o principal fator que influencia esta propriedade é o agregado.

#### *Resistência à tração por compressão diametral*

Para avaliação da resistência à tração por compressão diametral, foram utilizados 3 corpos de prova para cada traço. A Figura 4.6 mostra a ruptura dos corpos de prova exatamente em seu eixo após a realização do ensaio. A Tabela 4.3 e o gráfico da Figura 4.7 representam o resumo dos resultados.

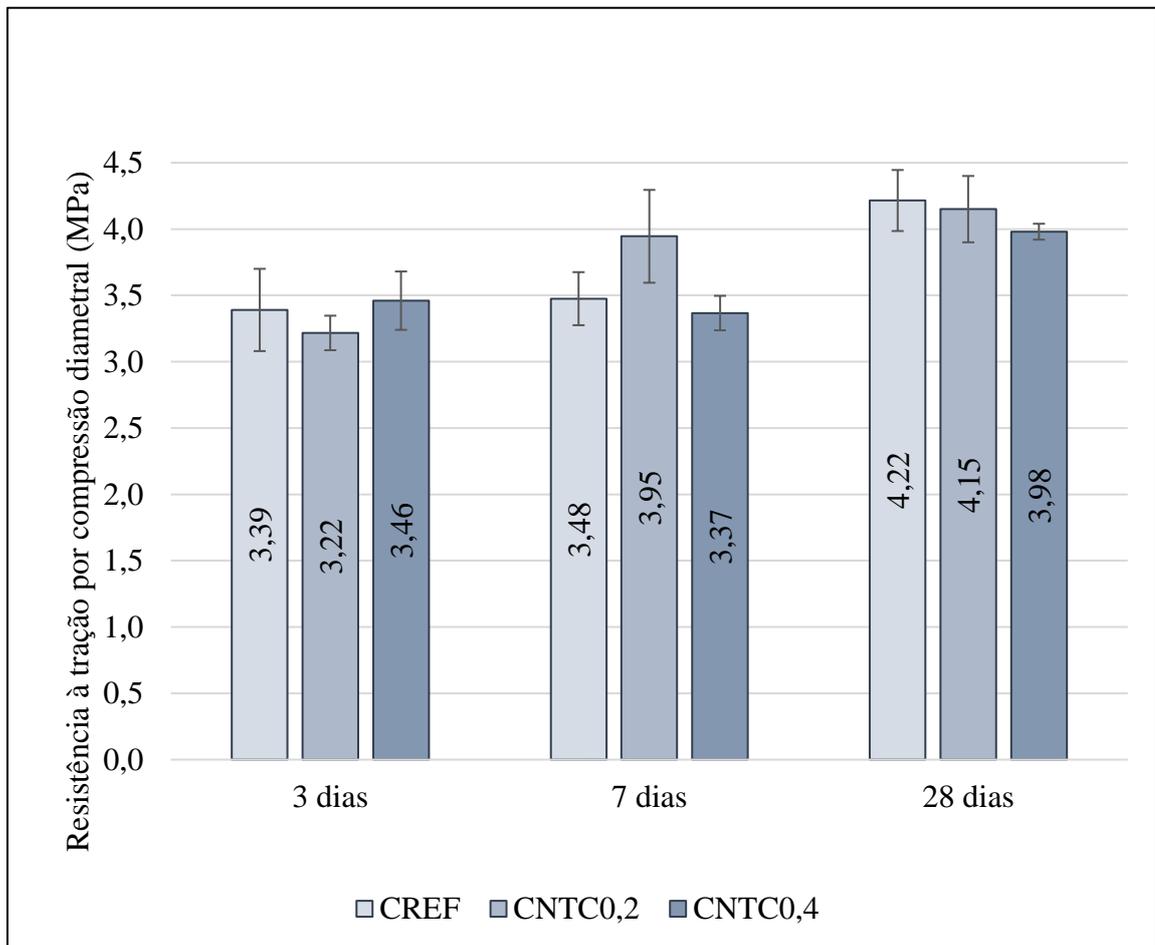
Figura 4.6 - Corpos de prova após a realização do ensaio de resistência à tração por compressão diametral



Tabela 4.3 - Resumo dos resultados de resistência à tração por compressão diametral por idade

Idade (dias)	Parâmetros	CREF	CNTC0,2	CNTC0,4
3	Resistência à tração por comp. diametral média (MPa)	3,39	3,22	3,46
	Desvio padrão (MPa)	0,04	0,13	0,08
	Coefficiente de variação (%)	1,25%	3,91%	2,45%
	Diferença em relação ao CREF	-	-5,11%	2,06%
7	Resistência à tração por comp. diametral média (MPa)	3,48	3,95	3,37
	Desvio padrão (MPa)	0,04	0,09	0,13
	Coefficiente de variação (%)	1,02%	2,33%	3,71%
	Diferença em relação ao CREF	-	13,53%	-3,12%
28	Resistência à tração por comp. diametral média (MPa)	4,22	4,15	3,98
	Desvio padrão (MPa)	0,01	0,13	0,06
	Coefficiente de variação (%)	0,17%	3,07%	1,53%
	Diferença em relação ao CREF	-	-1,54%	-5,58%

Figura 4.7 - Resultados de resistência à tração por compressão diametral por idade



A análise estatística (Apêndice B) comprovou que, diferente da maioria das pesquisas apresentadas na revisão bibliográfica, a adição de NTC no concreto não apresentou ganho significativo na resistência à tração por compressão diametral.

#### *Resistência à tração na flexão*

Para a determinação da resistência à tração na flexão foram ensaiados 3 corpos de prova para cada idade e cada traço, resultando em 9 corpos de prova no total. A Figura 4.8 mostra o corpo de prova após a ruptura em seu eixo. A Tabela 4.4 e o gráfico da Figura 4.9 mostram o resumo dos resultados para o ensaio.

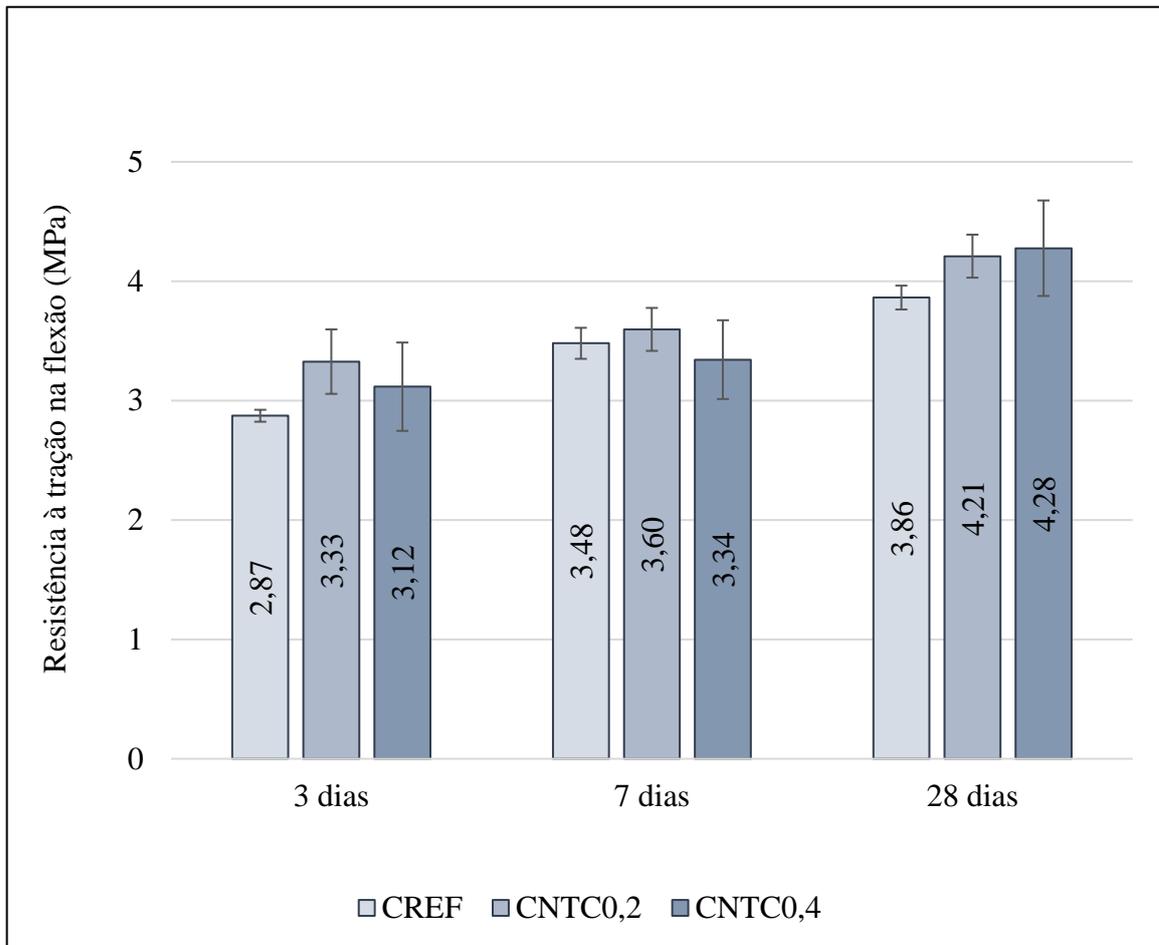
Figura 4.8 - Corpo de prova após a realização do ensaio de resistência à tração na flexão



Tabela 4.4 - Resumo dos resultados de resistência à tração na flexão por idade

Idade (dias)	Parâmetros	CREF	CNTC0,2	CNTC0,4
3	Resistência média à tração (MPa)	2,87	3,46	2,91
	Desvio padrão (MPa)	0,05	0,18	0,11
	Coefficiente de variação (%)	1,72%	5,31%	3,89%
	Diferença em relação ao CREF	-	20,42%	1,28%
7	Resistência média à tração (MPa)	3,48	3,60	3,16
	Desvio padrão (MPa)	0,13	0,18	0,08
	Coefficiente de variação (%)	3,87%	4,95%	2,47%
	Diferença em relação ao CREF	-	3,35%	-9,34%
28	Resistência média à tração (MPa)	3,86	4,21	4,06
	Desvio padrão (MPa)	0,10	0,18	0,16
	Coefficiente de variação (%)	2,49%	4,16%	4,01%
	Diferença em relação ao CREF	-	8,97%	4,96%

Figura 4.9 - Resultados de resistência à tração na flexão por idade



A análise estatística (Apêndice B) mostrou que, diferente da maioria das pesquisas apresentadas na revisão bibliográfica, a adição de NTC no concreto não apresentou ganho significativo na resistência à tração na flexão.

#### 4.2.1 Correlações entre as propriedades mecânicas avaliadas

##### *Módulo de elasticidade x Resistência média à compressão*

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2023), o módulo de elasticidade pode ser estimado, para concretos com resistência média à compressão  $f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$ , por meio da Equação 4.1 a seguir.

Equação 4.1 - Correlação entre resistência à compressão e o módulo de elasticidade

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}}$$

onde:

- $\alpha_E = 1,0$  para granito e gnaise;
- $E_{ci}$  é o módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente inicial do concreto;
- $f_{ck}$  é a resistência característica à compressão do concreto.

Através dos gráficos das Figuras 4.10 a 4.12 é possível observar que os módulos de elasticidade obtidos nos ensaios foram menores do que os estimados através da Equação 4.1. A diferença entre o valor obtido e o estimado chegou a 40% para os resultados do CNTC0,4 aos 28 dias.

Figura 4.10 - Correlação módulo de elasticidade e resistência à compressão - CREF

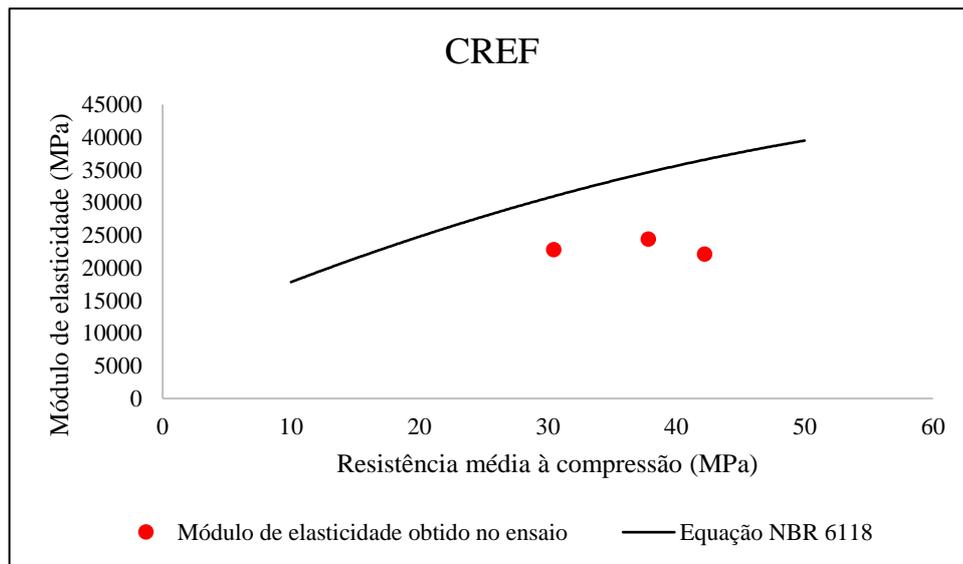


Figura 4.11 - Correlação módulo de elasticidade e resistência à compressão - CNTC0,2

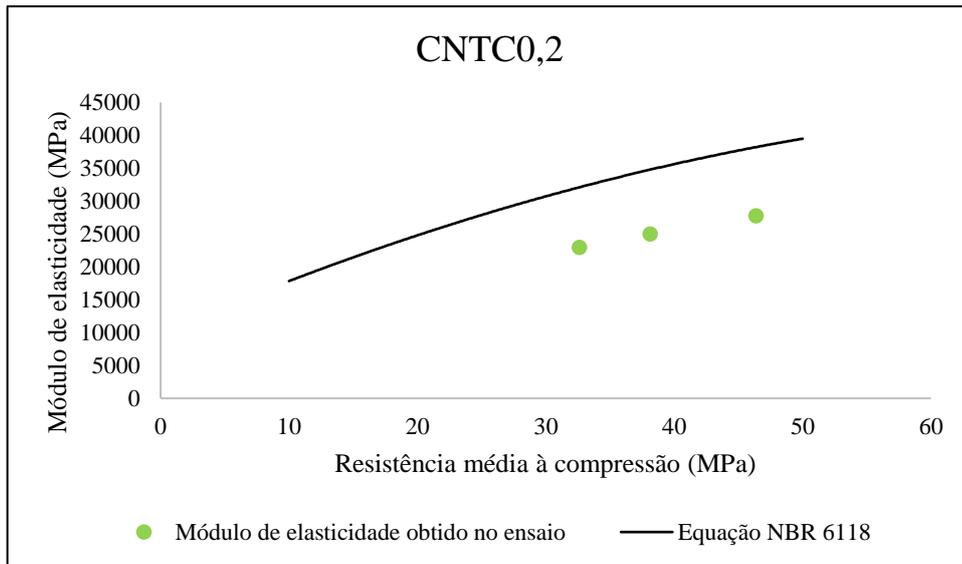
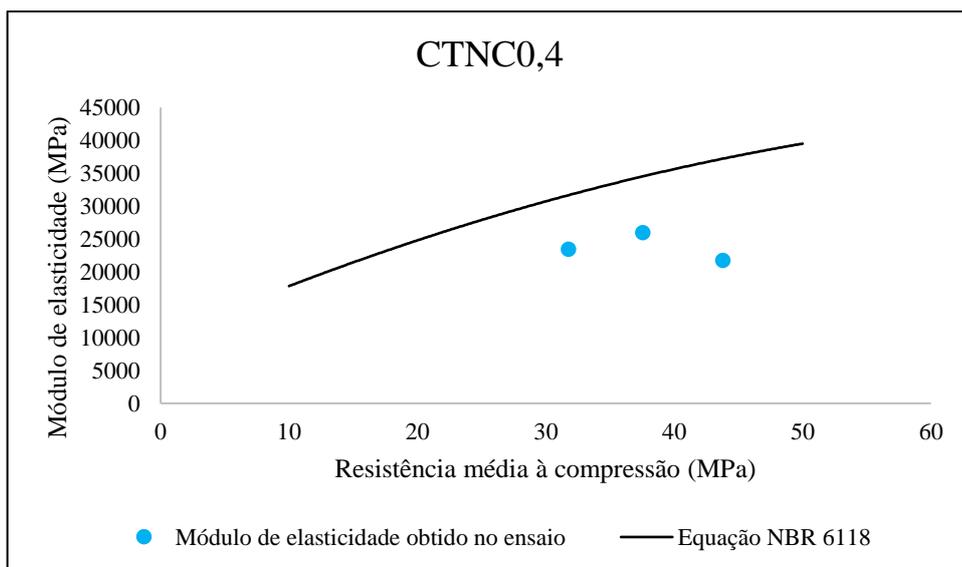


Figura 4.12 - Correlação módulo de elasticidade e resistência à compressão - CTNC0,4



### *Resistência à tração por compressão diametral x Resistência à compressão*

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2023), o valor médio ou característico da resistência à tração para concretos com  $f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$  pode ser avaliado por meio da Equação 4.2 a seguir.

Equação 4.2 – Correlação entre resistência à tração por compressão diametral e a resistência à compressão

$$f_{ct,sp} = \frac{1}{3} f_{cm}^{2/3}$$

onde:

- $f_{cm}$  é a resistência média à compressão do concreto;
- $f_{ct,sp}$  é a resistência média à tração por compressão diametral do concreto.

Os gráficos das Figuras 4.13 a 4.15 ilustram os resultados obtidos nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral e os resultados calculados através da Equação 4.2. Observa-se que os valores das resistências obtidas nos ensaios nos corpos de prova foram próximos aos valores calculados, sendo que a maior diferença encontrada foi de 10%.

Figura 4.13 - Correlação resistência à tração por compressão diametral e resistência à compressão – CREF

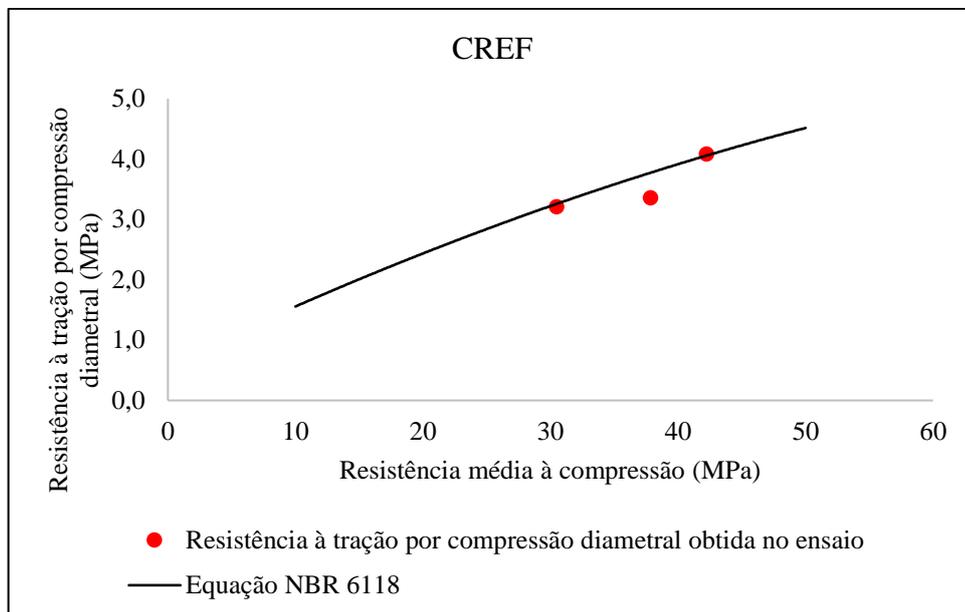


Figura 4.14 - Correlação resistência à tração por compressão diametral e resistência à compressão - CNTC0,2

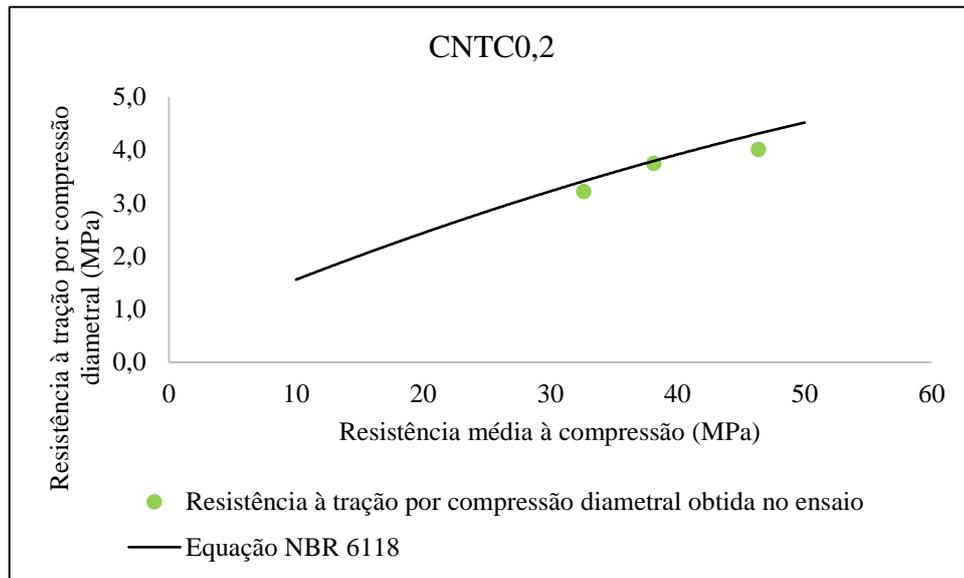
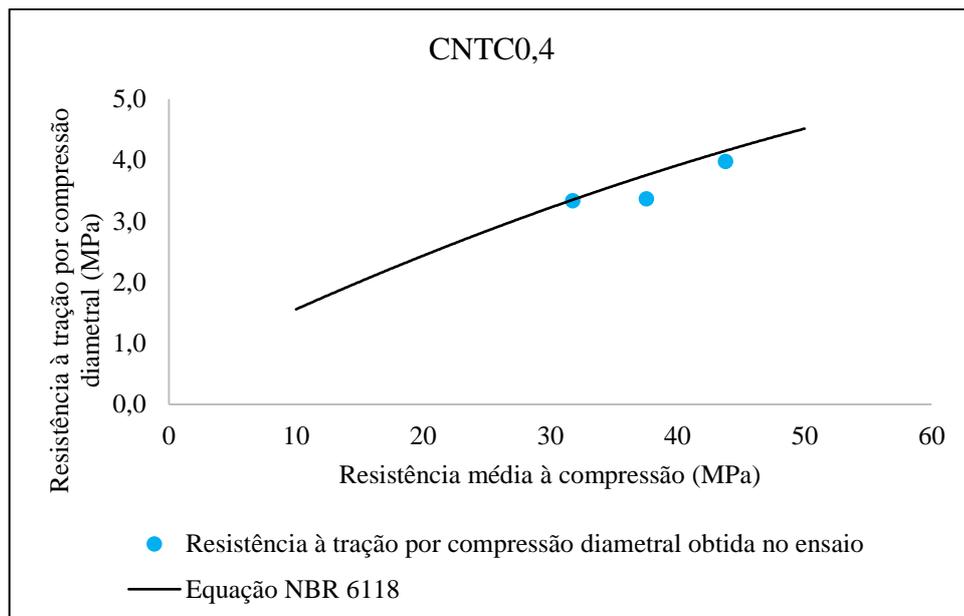


Figura 4.15 - Correlação resistência à tração por compressão diametral e resistência à compressão - CNTC0,4



### *Resistência à tração na flexão x Resistência média à compressão*

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2023), o valor da resistência à tração na flexão para concretos com resistência média à compressão  $f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$  pode ser avaliado por meio da Equação 4.3 a seguir.

Equação 4.3 - Correlação entre resistência à tração na flexão e a resistência à compressão

$$f_{ct,f} = \frac{3}{7} f_{cm}^{2/3}$$

onde:

- $f_{cm}$  é a resistência média à compressão do concreto;
- $f_{ct,f}$  é a resistência à tração na flexão.

Nos gráficos das Figuras 4.16 a 4.18 é possível verificar os resultados obtidos nos ensaios de resistência à tração na flexão e os resultados calculados através da Equação 4.3. Observa-se que os valores das resistências obtidas nos ensaios nos corpos de prova foram menores que os valores calculados, sendo que a maior diferença encontrada foi de 30%.

Figura 4.16 - Correlação resistência à tração na flexão e resistência à compressão - CREF

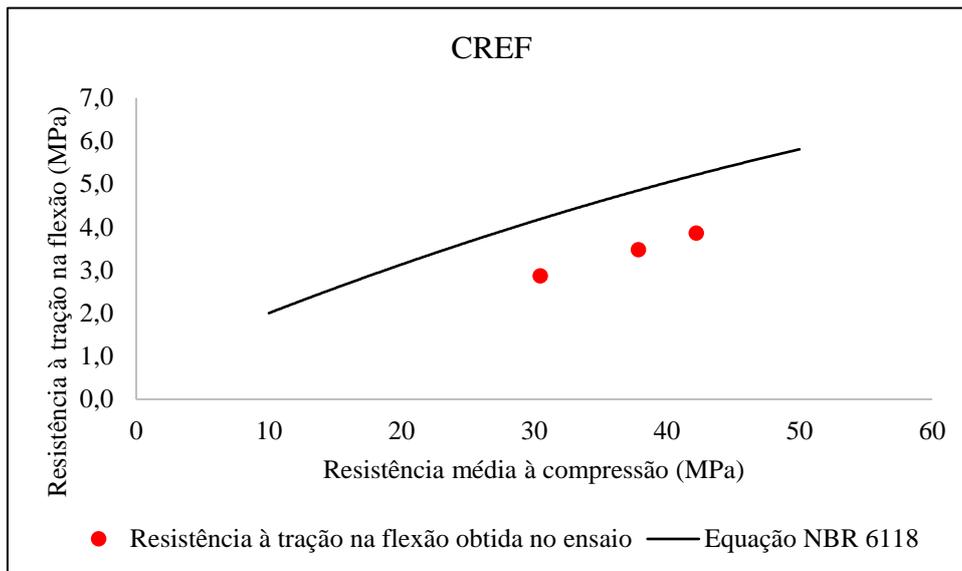


Figura 4.17 - Correlação resistência à tração na flexão e resistência à compressão – CNTC0,2

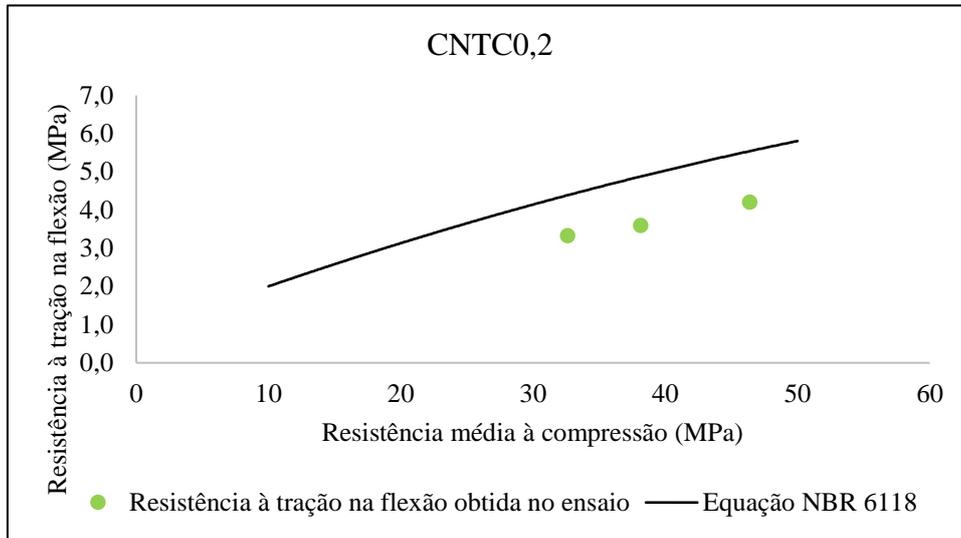
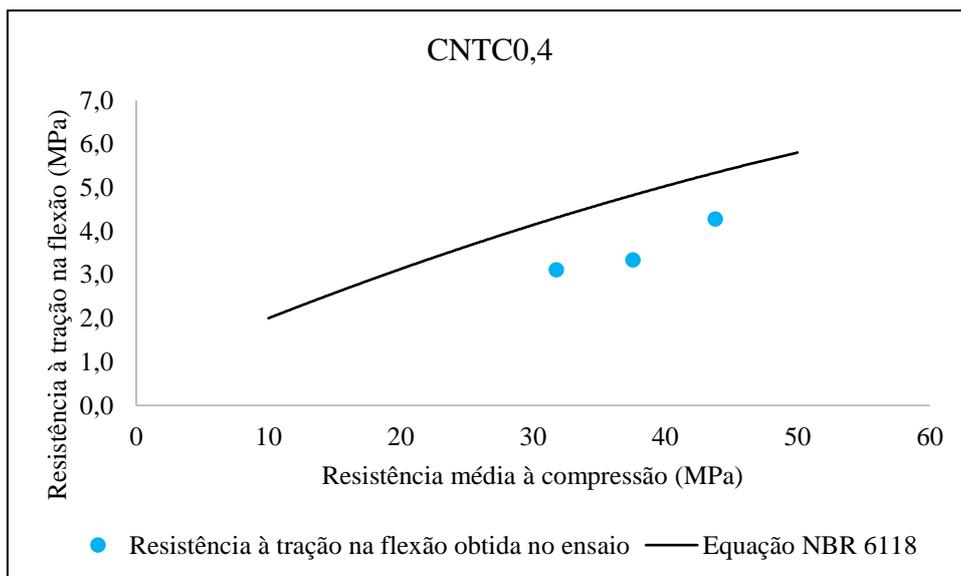


Figura 4.18 - Correlação resistência à tração na flexão e resistência à compressão – CNTC0,4



## 4.2.2 Propriedades viscoelásticas

### *Retração autógena*

Os gráficos das Figuras 4.19 a 4.21 mostram os resultados para o ensaio de retração autógena dos concretos CREF, CNTC0,2 e CNTC0,4, respectivamente. Pode-se observar em todos os casos que a retração autógena nas primeiras idades é mais relevante e tende a se estabilizar com o avançar do tempo. Nota-se também que o comportamento individual dos CPs e a média dos resultados obtida das deformações descreve a evolução da retração autógena ao longo do tempo

de cada concreto e é bem representado pela equação logarítmica mostrada visto que os valores de  $R^2$  são bem próximos do valor unitário.

Figura 4.19 - Retração autógena para CREF

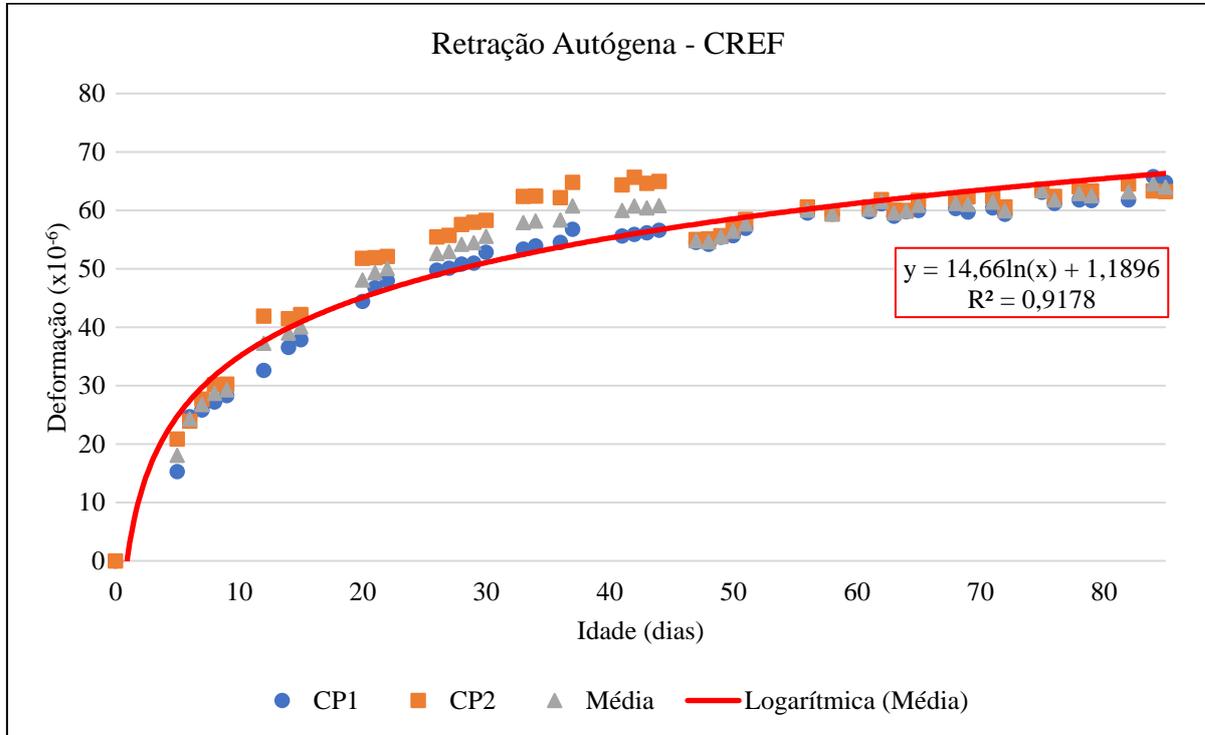


Figura 4.20 - Retração autógena para CNTC0,2

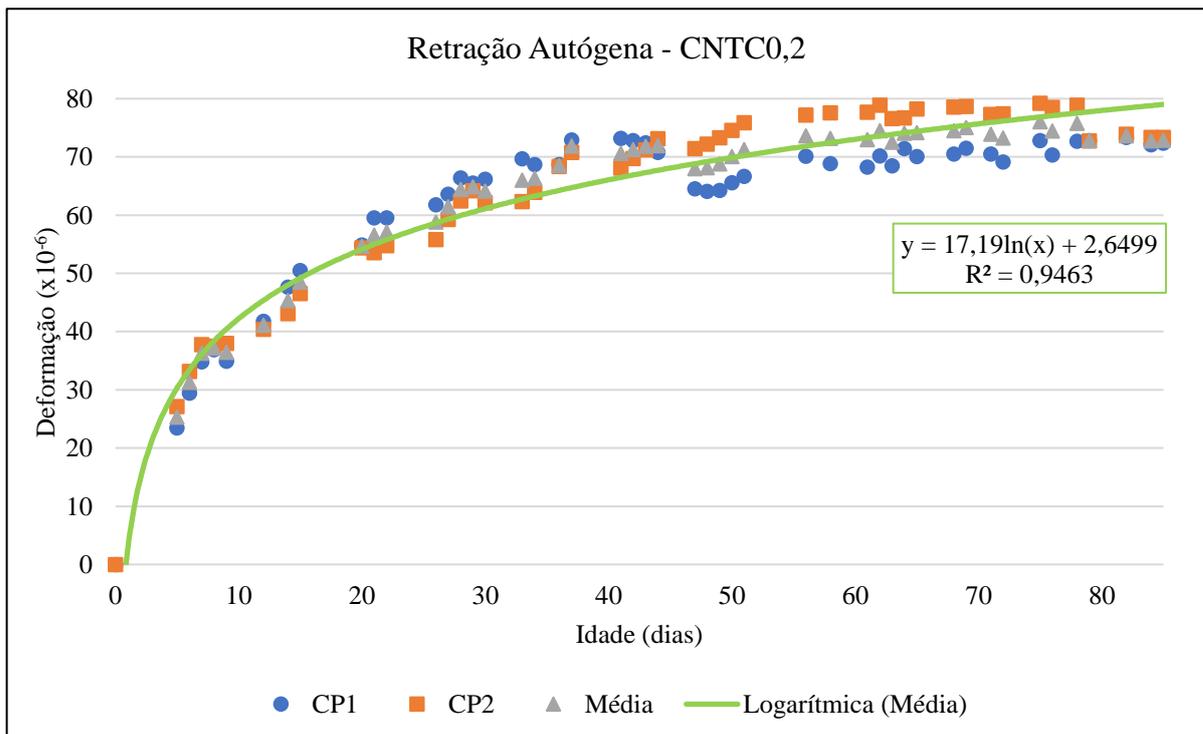
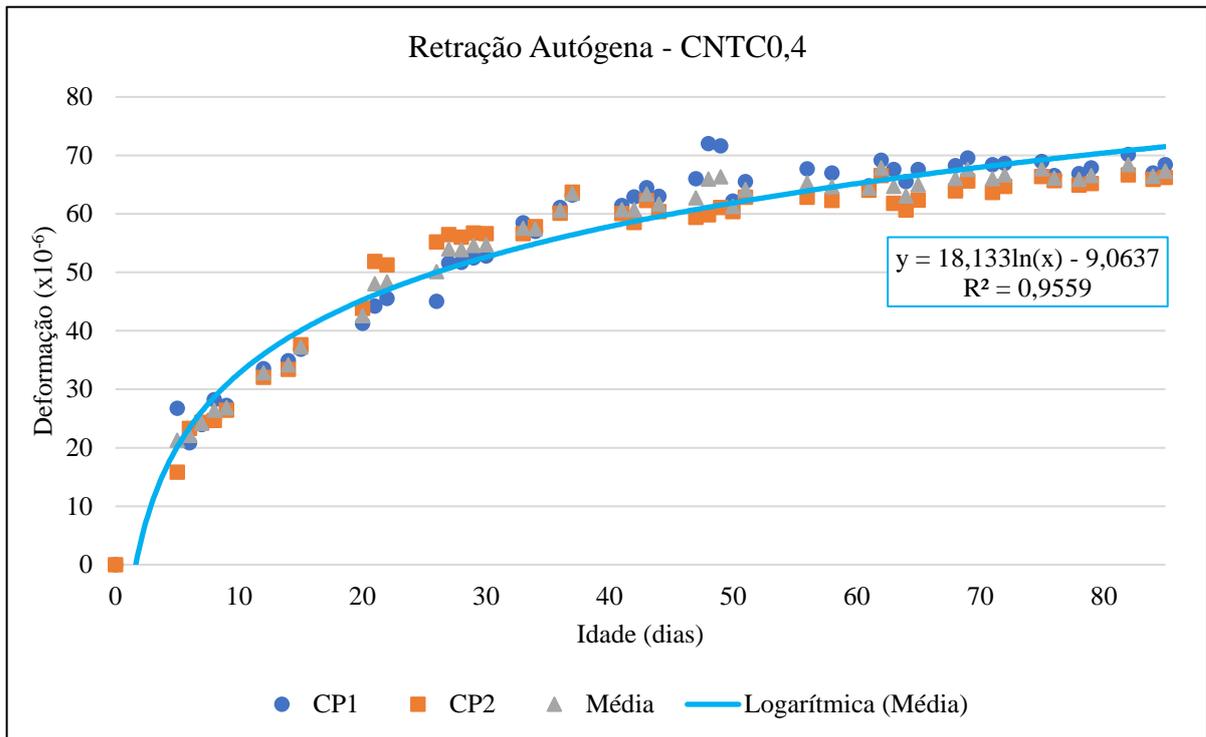


Figura 4.21 - Retração autógena para CNTC0,4

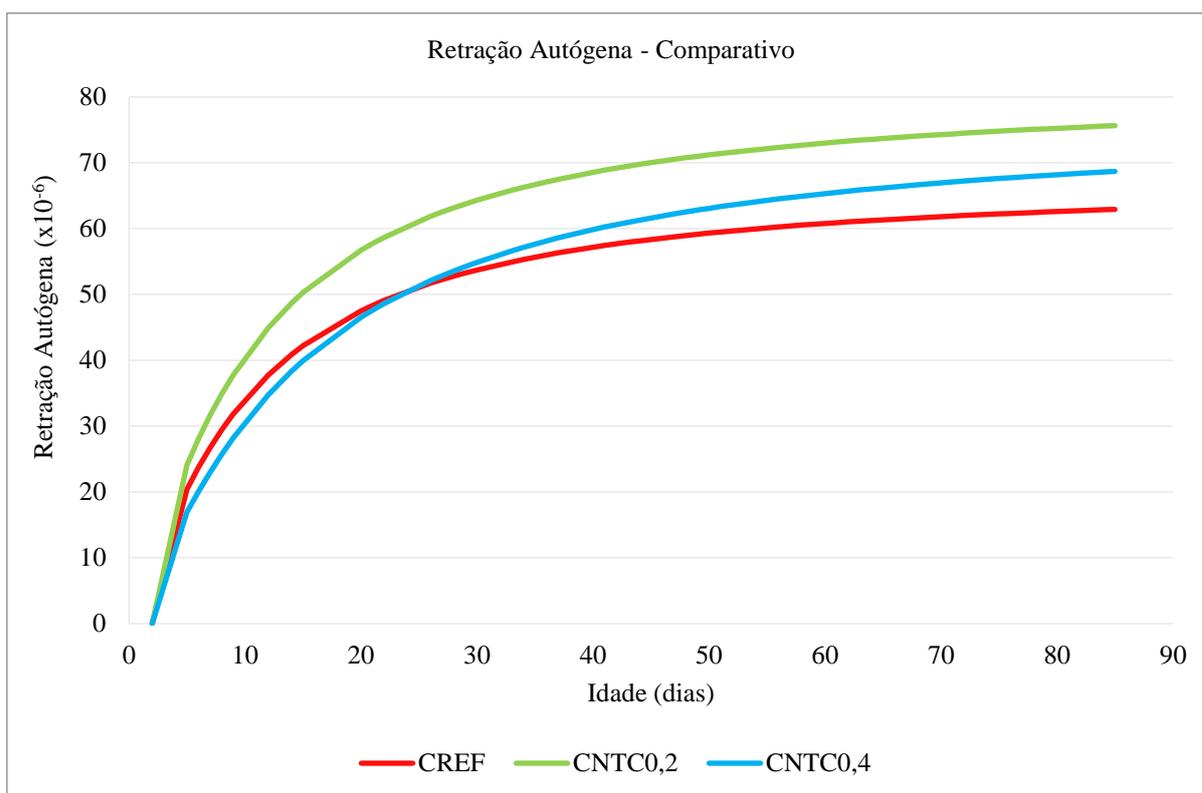


O gráfico da Figura 4.22 mostra apenas o comparativo das curvas logarítmicas das médias de cada concreto. Observa-se que a maior deformação autógena ocorre no CNTC0,2 e a menor no CREF. Porém, até 22 dias de idade do ensaio, a deformação para o concreto CREF foi maior do que a deformação para CNTC0,4. Após esta data, a deformação passa a se estabilizar e CREF passa a ter os menores valores. Ao final do ensaio, o CNTC0,2 e o CNTC0,4 tiveram aumentos de 20,22% e 9,19% na retração autógena em relação ao CREF. O aumento da retração autógena pode ser atribuído ao efeito de nucleação causado pela incorporação de NTC. A nucleação possibilita a formação de um maior número de produtos de hidratação cujo volume total é menor do que a soma dos volumes das moléculas constituintes, causando a retração.

Esse efeito não foi observado no trabalho de Jung *et al.* (2022) que avaliaram a retração autógena em concretos de ultra alta performance contendo NTC. O concreto de ultra alta performance contendo NTC apresentou retração autógena menor que o de referência. Vale frisar que nesse estudo do concreto de ultra alta performance a relação a/c foi de 0,24 e adições como sílica ativa foram utilizadas fazendo com que as propriedades da pasta fossem bem diferentes das pastas produzidas para esta dissertação.

Mais estudos se fazem necessários para clarificar essas diferenças de comportamento.

Figura 4.22 – Resultados do ensaio de retração autóloga



### *Retração por secagem*

As Figuras 4.23 a 4.25 mostram os resultados do ensaio de retração por secagem para os concretos CREF, CNTC0,2 e CNTC0,4, respectivamente. Vale frisar que esse ensaio se iniciou 28 dias após a fabricação dos concretos. Portanto, nos gráficos das Figuras 4.23 a 4.25, a idade zero corresponde a idade de 28 dias após a fabricação dos concretos. Inicialmente pode-se observar em todos os casos que a retração por secagem também foi mais relevante nas primeiras idades. A magnitude das deformações de retração por secagem é bem maior que a das deformações por retração autóloga independentemente da presença dos NTC. Nota-se também que o comportamento médio das deformações (curva média) descreve a evolução da retração autóloga ao longo do tempo de cada concreto e é bem representado pela equação logarítmica mostrada visto que os valores de  $R^2$  são bem próximos do valor unitário.

Figura 4.23 - Retração por secagem para CREF

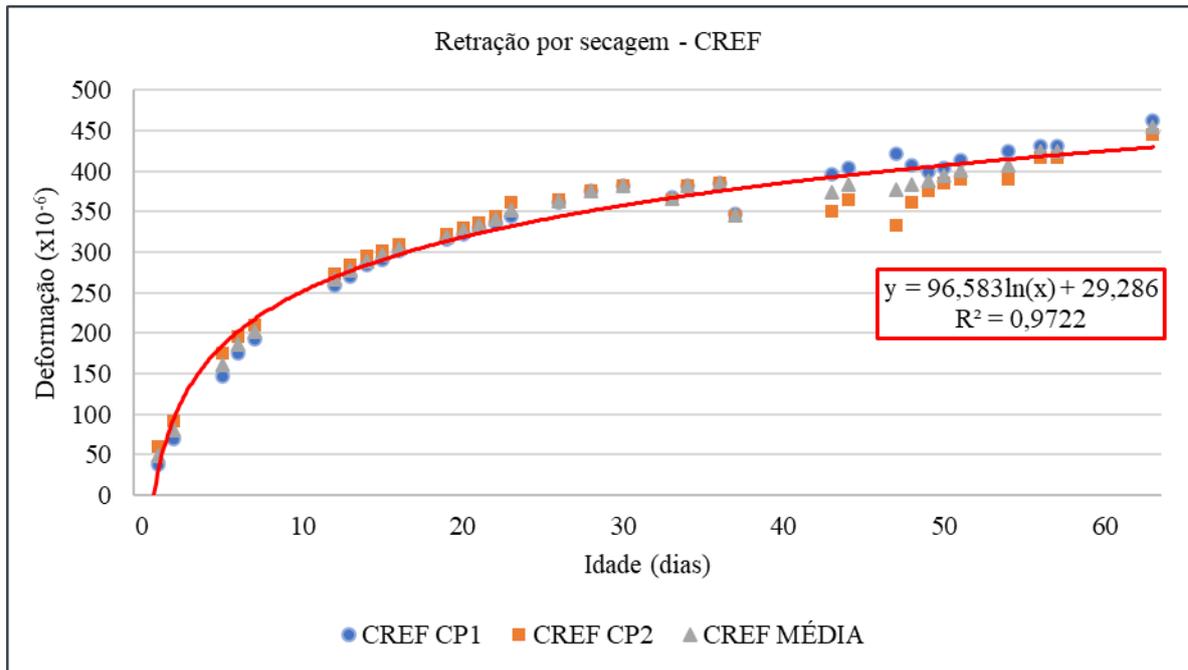


Figura 4.24 - Retração por secagem para CNTC0,2

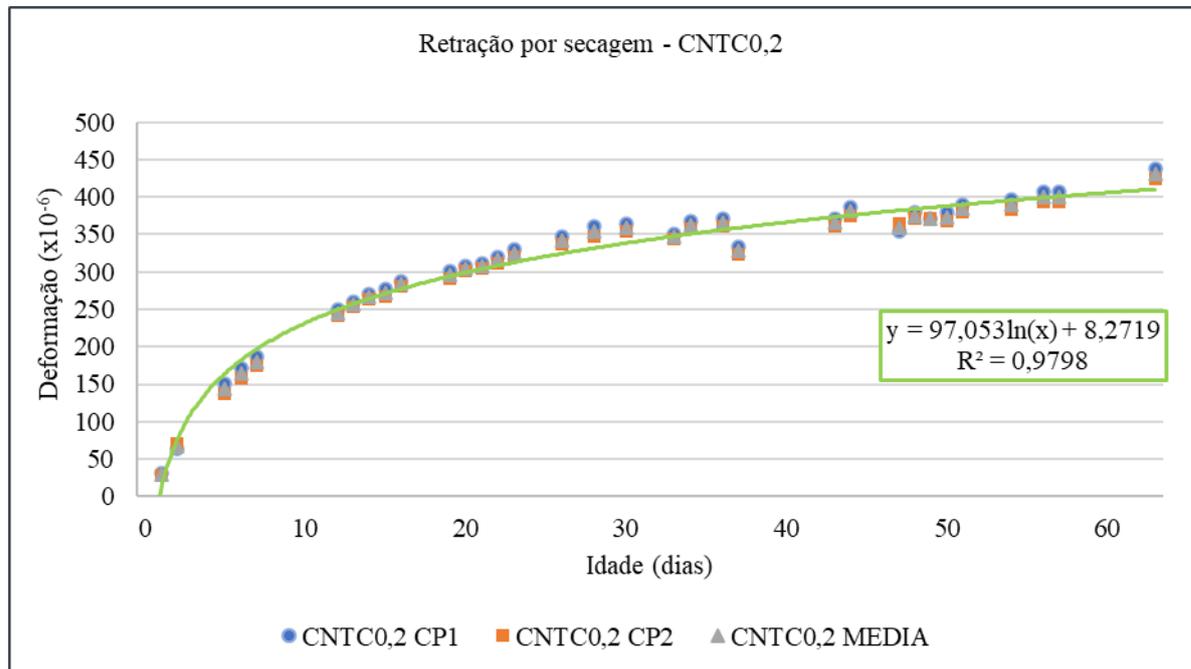
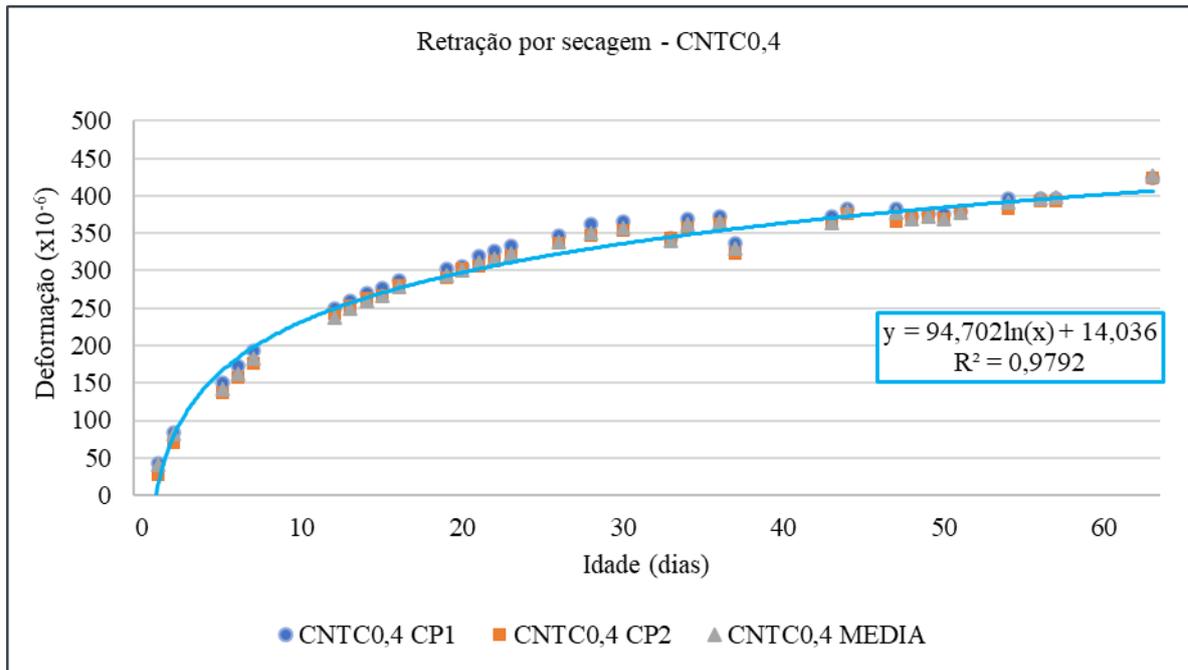


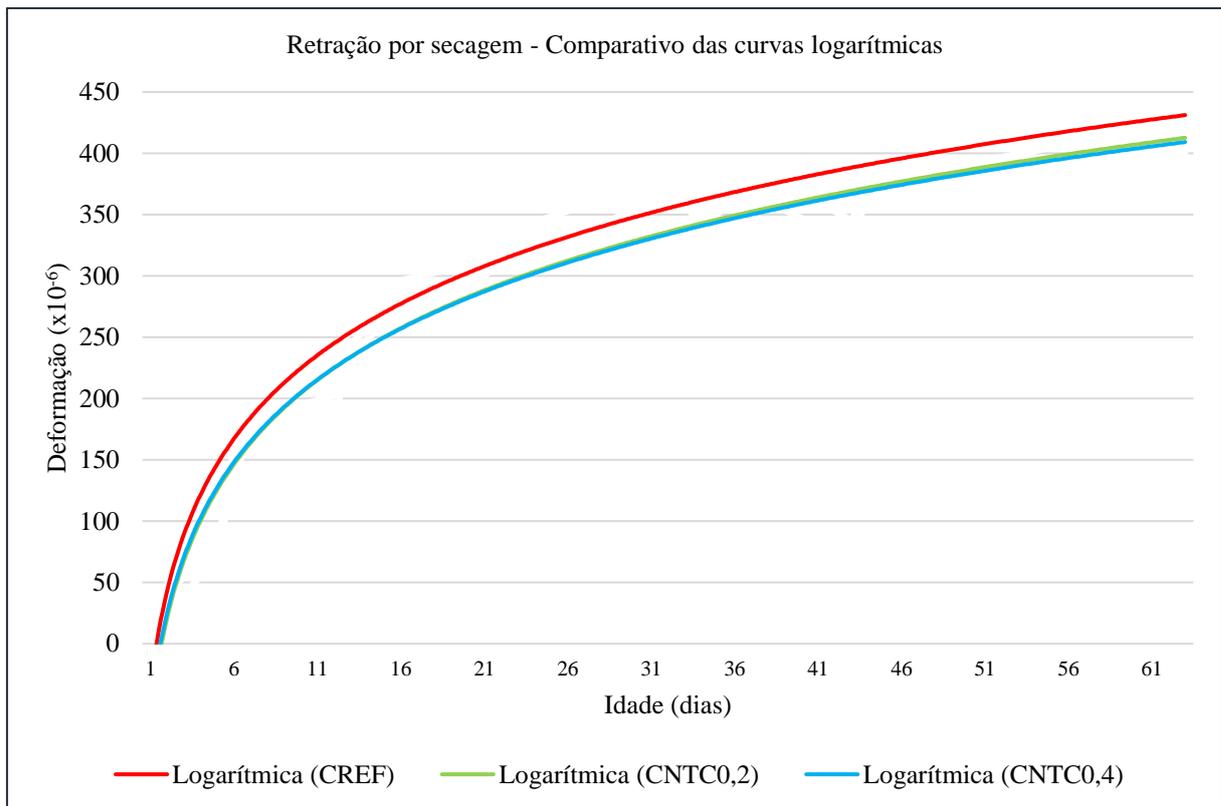
Figura 4.25 - Retração por secagem para CNTC0,4



A Figura 4.26 mostra o gráfico comparativo das retrações por secagem de todos os concretos. Nessa figura estão apresentadas as curvas com as deformações médias e as curvas das equações logarítmicas. É possível observar que a maior deformação ocorre no CREF, enquanto as deformações de CNTC0,2 e CNTC0,4 não apresentam diferenças significativas entre elas. Os valores de retração por secagem de CNTC0,2 e de CNTC0,4 chegam a ser 10% menores do que os valores de CREF.

Os autores Hawreen e Bogas (2019) analisaram a retração total (autógena + por secagem) e obtiveram resultados semelhantes ao resultado obtido nesta pesquisa para a deformação por retração por secagem. Eles também observaram que a incorporação de NTC causou redução da deformação. Os autores explicaram a redução da retração pelo preenchimento de vazios e efeitos de nucleação e de ponte causados pelo NTC. Além disso, o preenchimento e a nucleação causados pelo NTC podem funcionar como barreiras para a água dentro do concreto, impedindo sua movimentação e conseqüentemente, reduzindo a retração por secagem do concreto.

Figura 4.26 - Resultados do ensaio de retração por secagem



### *Fluência básica*

Os gráficos das Figuras 4.27 a 4.29 mostram os resultados das deformações devido à fluência básica ao longo do tempo para os concretos CREF, CNTC0,2 e CNTC0,4, respectivamente. A idade zero apresentada no gráfico corresponde à idade em que foi aplicado o carregamento de longa duração (7 dias após a fabricação dos concretos.) Da mesma forma que a retração, é possível observar que nas primeiras idades a deformação devido à fluência básica é mais significativa e com o passar do tempo a mesma se estabiliza. Nota-se também que a curva com a média das deformações (média) descreve a evolução da fluência ao longo do tempo de cada concreto.

Figura 4.27 - Fluência básica para CREF

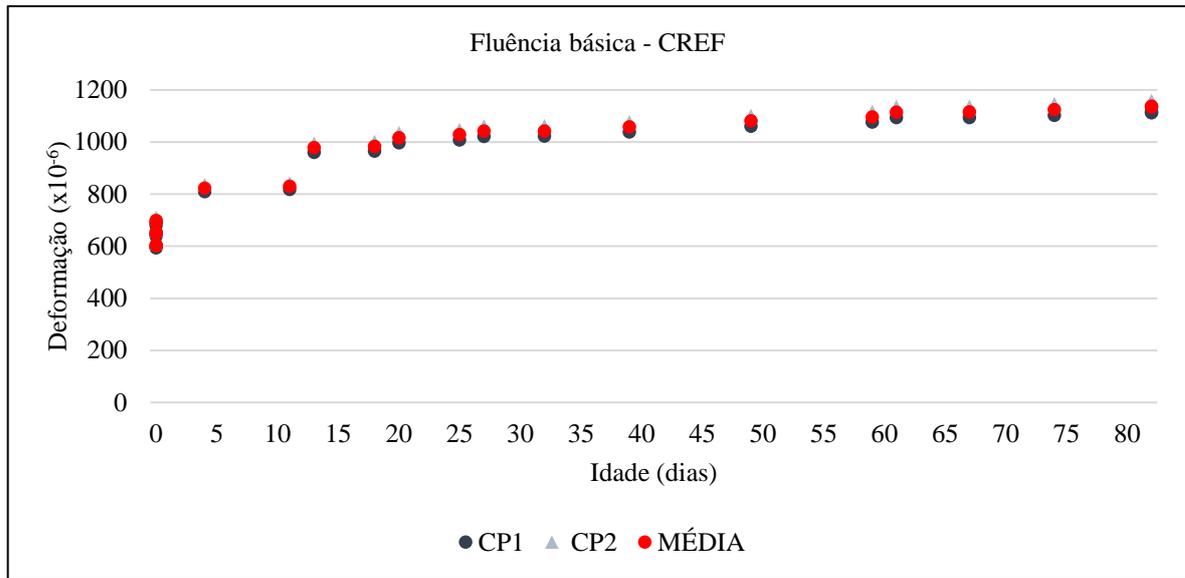


Figura 4.28 - Fluência básica para CNTC0,2

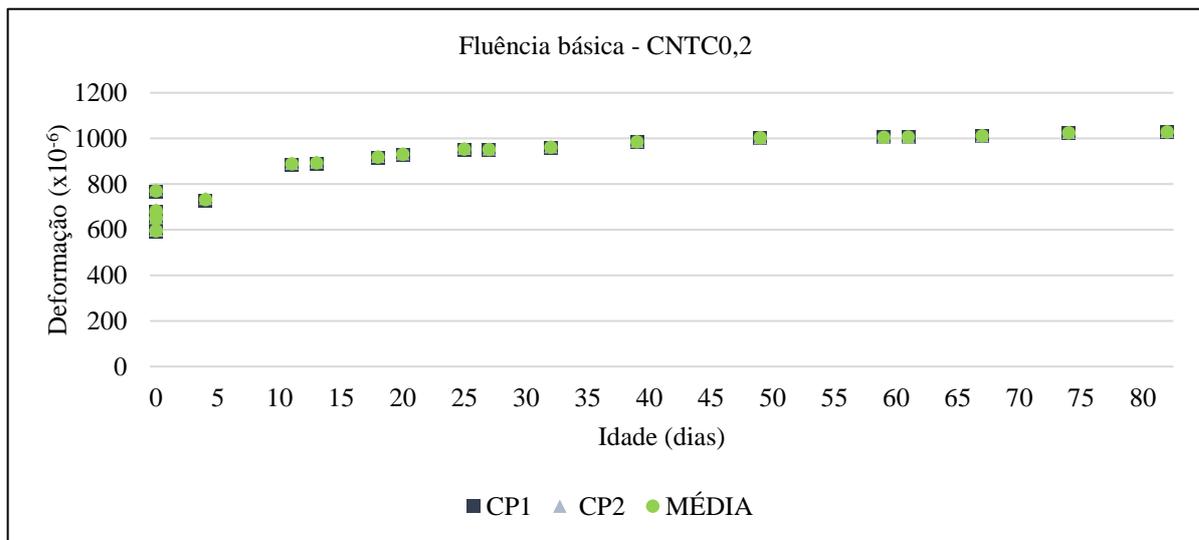
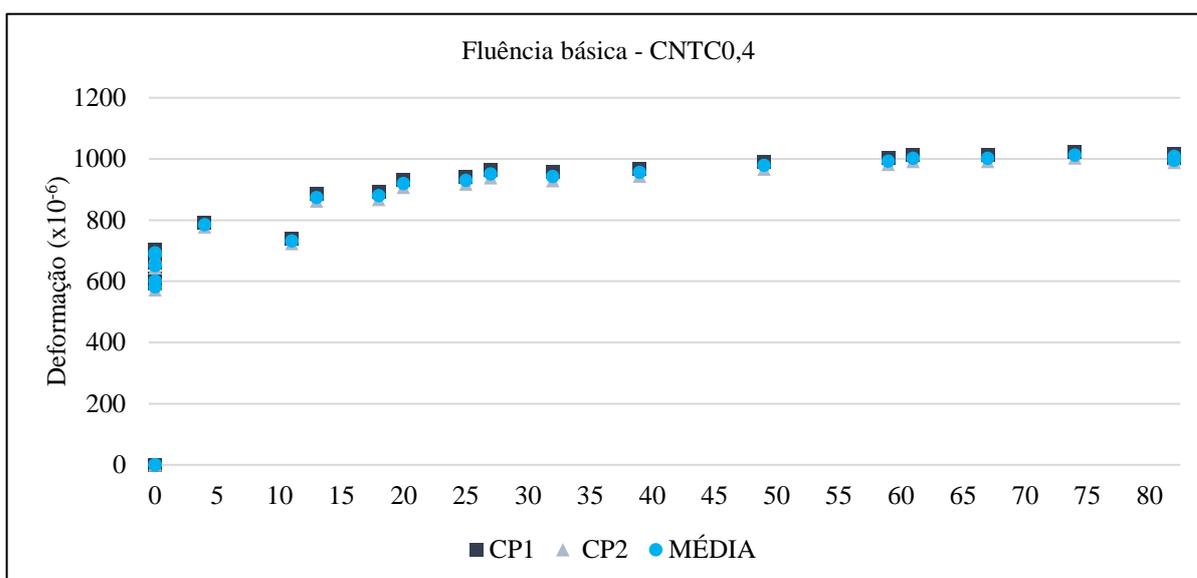
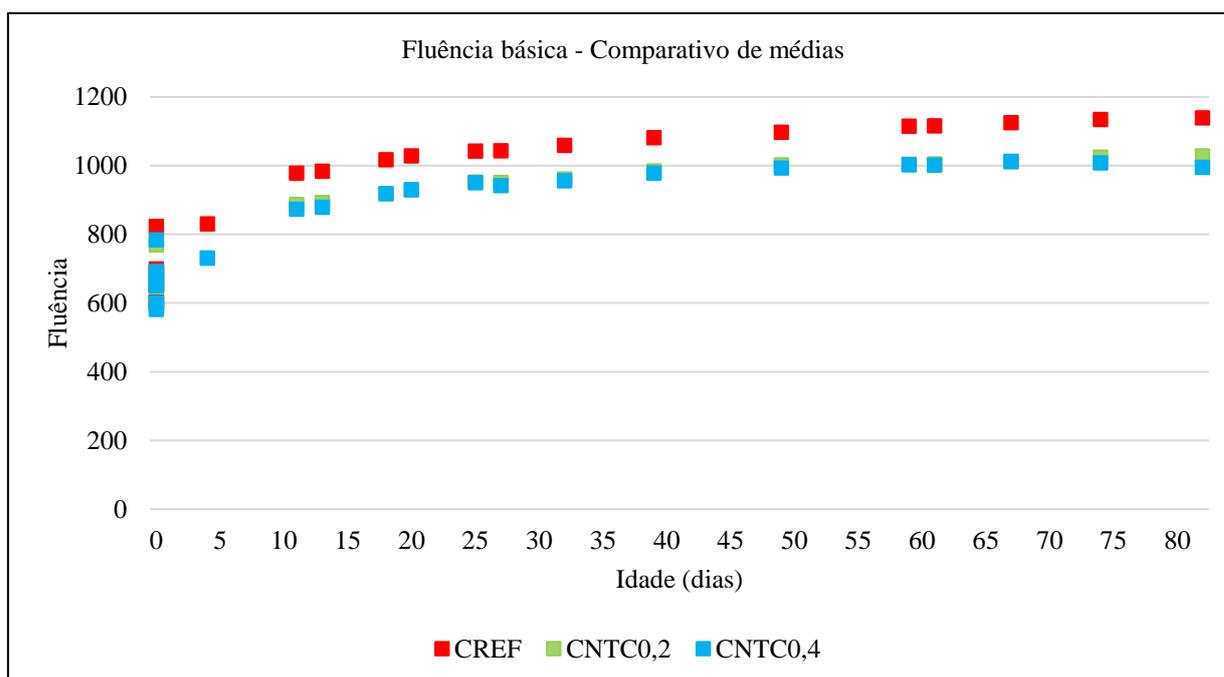


Figura 4.29 - Fluência básica para CNTC0,4



A Figura 4.30 mostra o gráfico comparativo da fluência básica de todos os concretos. Nessa figura estão apresentadas as curvas com as deformações médias e as curvas das equações logarítmicas. Ao analisar esses resultados é possível observar a diferença entre a fluência do concreto de referência e os concretos contendo NTC. Ao final do ensaio, a redução da deformação por fluência básica para o CNTC0,2 foi de 12,08%, e para o CNTC0,4, de 14,14%. Os autores Hawreen e Bogas (2019) também observaram redução da fluência com a incorporação de NTC e atribuíram esses resultados aos efeitos de nucleação, filer e ponte causados pelos nanotubos de carbono.

Figura 4.30 - Resultados do ensaio de fluência básica



Através dos resultados obtidos no ensaio de fluência básica, foi possível calcular o coeficiente de fluência através da Equação 4.4. Os resultados podem ser observados nos gráficos 4.31, 4.32 e 4.33.

Equação 4.4 – Cálculo do coeficiente de fluência

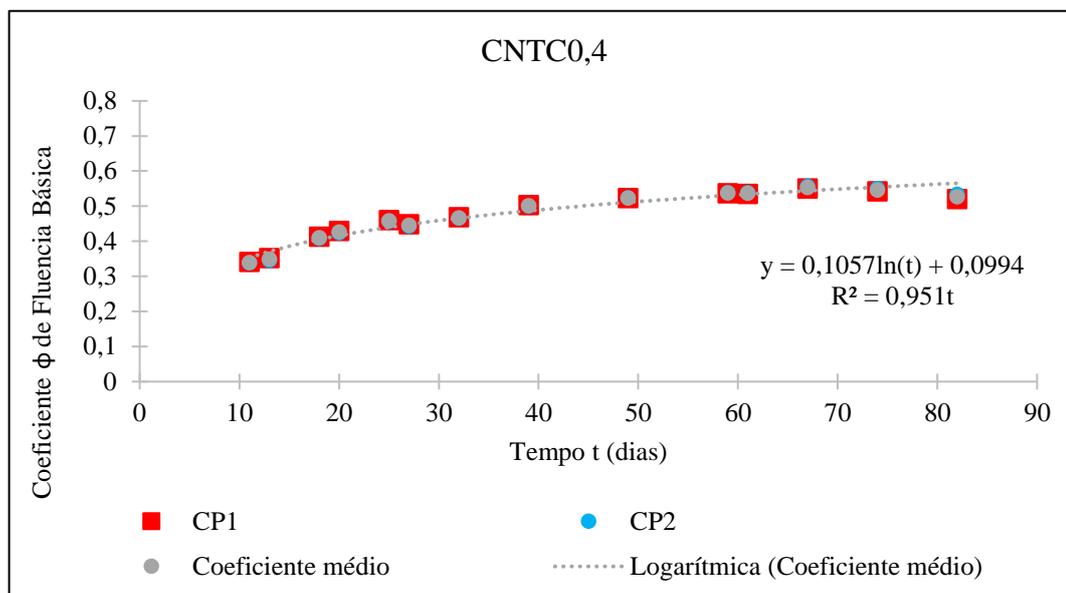
$$\varphi(t) = \frac{\varepsilon_{c \text{ total}}(t)}{\varepsilon_{c \text{ inicial}}} - 1$$

Onde:

- $\varepsilon_{c \text{ total}}(t)$  é a deformação total do concreto no tempo  $t$ ;
- $\varphi(t)$  é o coeficiente de fluência básica;
- $\varepsilon_{c \text{ inicial}}$  é a deformação inicial quando da aplicação da carga.



Figura 4.33 - Coeficiente de fluência para CNTC0,4



Com base nas equações logarítmicas para o coeficiente de fluência básica apresentadas, é possível fazer uma previsão do valor desse coeficiente ao longo do tempo. A Tabela 4.5 apresenta valores do coeficiente de fluência básica para os diferentes concretos em diversas idades.

Tabela 4.5 - Valores do coeficiente de fluência ao longo do tempo

Concretos	Idades				
	1 ano	3 anos	5 anos	10 anos	20 anos
CREF	0,930	1,069	1,133	1,220	1,308
CNTC0,2	0,755	0,876	0,933	1,010	1,086
CNTC0,4	0,723	0,839	0,893	0,966	1,040

A análise dos valores mostrados na tabela revela que a presença dos nanotubos de carbono (NTC) reduz os valores do coeficiente de fluência, a longo prazo, em 20 e 25 % para os teores de 0,2 e 0,4% de NTC respectivamente em relação ao concreto de referência. Isto por sua vez implica que o acréscimo das deformações devido à deformação de fluência será também reduzido dessa mesma ordem de grandeza. Esse resultado é importante pois poderá promover melhorias no desempenho das estruturas de concreto armado e protendido. No caso do concreto armado, possibilitará a redução das flechas de longo prazo em elementos fletidos permitindo um melhor desempenho em serviço desses elementos bem como uma redução de custo devido à diminuição no tamanho das seções bem como do consumo de armaduras. Para o concreto protendido, a redução nas deformações no concreto contendo NTC permitirá um valor maior

da força residual de protensão nos elementos protendidos possibilitando por sua vez uma redução de custo já que uma menor quantidade de cabos ou de cordoalhas será necessária. Do ponto de vista de sustentabilidade isso também representa um ganho visto que um menor consumo de matérias primas não renováveis será necessário para a fabricação de novos elementos de concreto armado como também de concreto protendido.

A retração e a fluência são causadas pela deformação da pasta de cimento, enquanto os agregados funcionam como o “esqueleto” do concreto, restringindo as mudanças dimensionais. Prevê-se, então, de acordo com Ahmad e Zhou (2023), que a inclusão de NTC no concreto modifique consideravelmente a causa desses fenômenos melhorando a estrutura interna da argamassa e reduzindo a propagação e o crescimento de microfissuras. Hawreen e Bogas (2019) apontam que a incorporação de NTC no concreto tem a tendência de melhorar tais propriedades, pois densifica a microestrutura da pasta de cimento (efeito fíler) e controla a propagação e o desenvolvimento de microfissuras (efeito ponte). Os resultados obtidos nesta pesquisa também corroboram esses fatos. Por isso a continuidade dos estudos de avaliação da retração e da fluência em concretos produzidos com NTC é importante e deve continuar.

#### 4.2.3 Teste de dano de rigidez

Para a determinação dos índices de dano de rigidez foram ensaiados 2 corpos de prova para cada traço apenas na idade de 28 dias. No ensaio obtém-se resultados para PDI (índice de deformação plástica) e SDI (índice de dano de rigidez). A Tabela 4.6 e os gráficos nas Figuras 4.34 e 4.35 mostram o resumo dos resultados obtidos no ensaio.

Tabela 4.6 - Resumo dos resultados de PDI e SDI aos 28 dias

Idade (dias)	Parâmetros	CREF	CNTC0,2	CNTC0,4
28	PDI médio	0,09	0,09	0,10
	SDI médio	0,21	0,21	0,23

Figura 4.34 - Resultados de PDI aos 28 dias

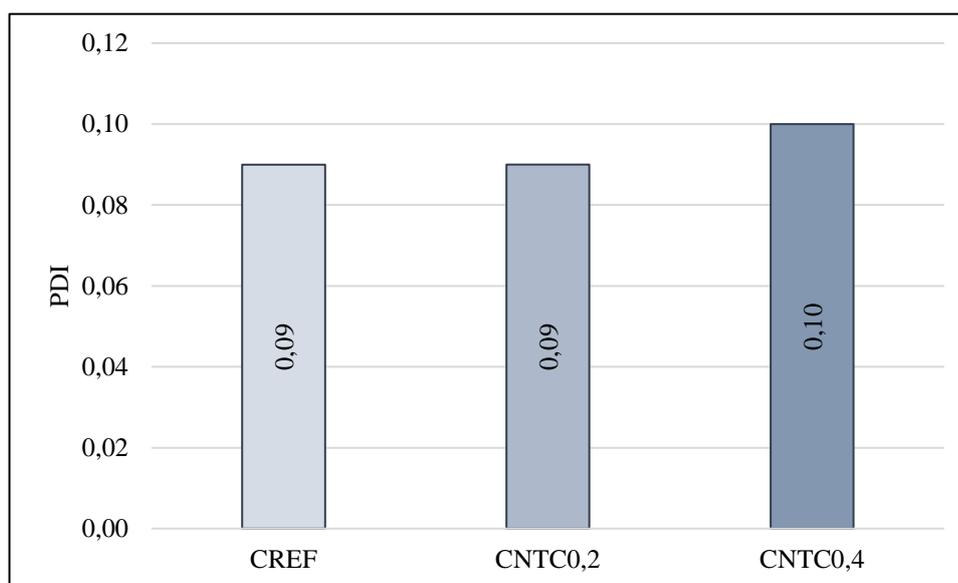
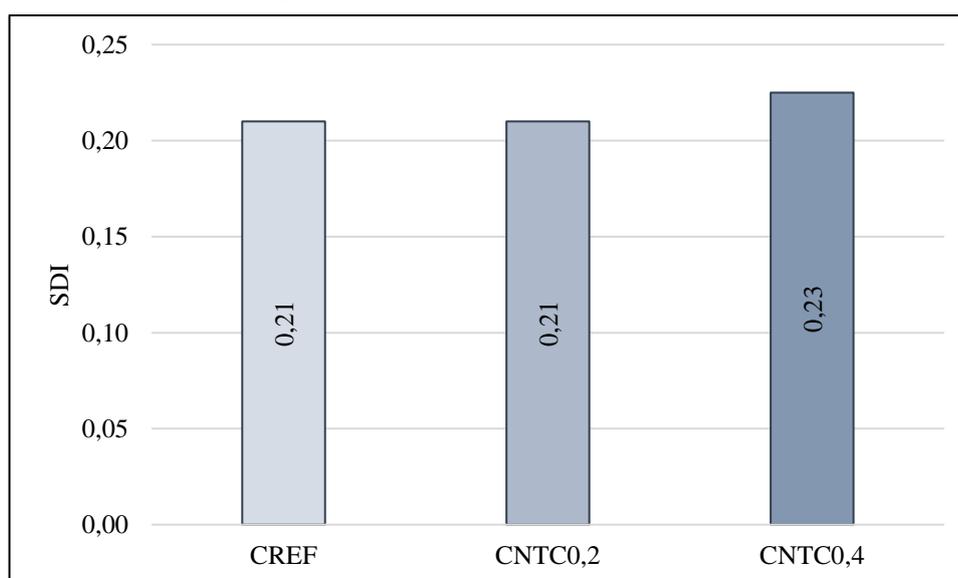


Figura 4.35 - Resultados de SDI aos 28 dias



Sanchez *et al.* (2017), em sua pesquisa, classificaram o nível de dano do concreto frente a reações expansivas de acordo com valores de SDI e PDI, conforme mostra a Tabela 4.7. Através dos gráficos das Figuras 4.34 e 4.35 é possível observar que os valores de PDI e SDI não variaram significativamente com a incorporação de NTC. Pode-se afirmar que o NTC não causou impactos significativos na rigidez dos concretos, sendo que tanto o CREF quanto o CNTC0,2 e o CNTC0,4 podem ser classificados como concretos minimamente danificados.

Tabela 4.7 - Classificação do nível de dano do concreto

Classificação do nível de dano do concreto	SDI	PDI
Insignificante	0,06 – 0,16	0,03 – 0,12
Mínimo	0,11 – 0,25	0,10 – 0,23
Moderado	0,15 – 0,31	0,13 – 0,27
Alto	0,19 -0,32	0,17 – 0,29
Muito alto	0,22 – 0,36	0,21 – 0,31

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

Segundo o índice de não-linearidade descrito por Chrisp *et al.* (1993), na curva tensão-deformação, quando as curvaturas se mostram mais retilíneas, os concretos tendem a ser mais íntegros. Curvas com formatos mais côncavos tendem a demonstrar algum dano interno ou menor qualidade interna da matriz do concreto. As Figuras 4.36, 4.37 e 4.38 mostram os resultados do teste de dano de rigidez para os concretos aos 28 dias. Não foi observado em nenhum dos concretos, curva de carregamento/descarregamento com formato côncavo que indicasse dano.

Figura 4.36 - Resultado do teste de dano de rigidez (SDT) para CREF aos 28 dias

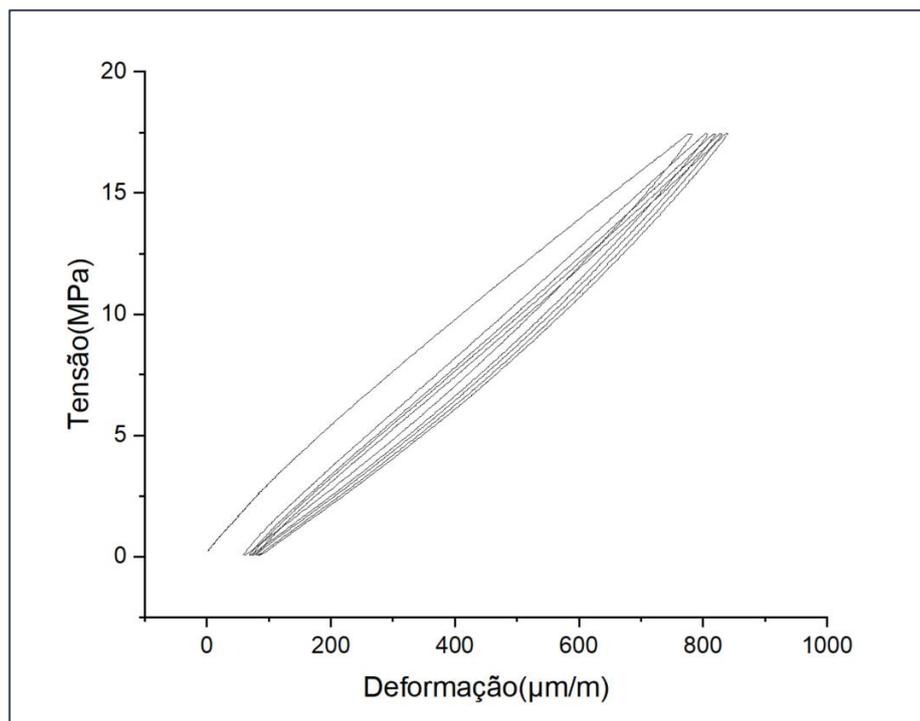


Figura 4.37 - Resultado do teste de dano de rigidez (SDT) para CNTC0,2 aos 28 dias

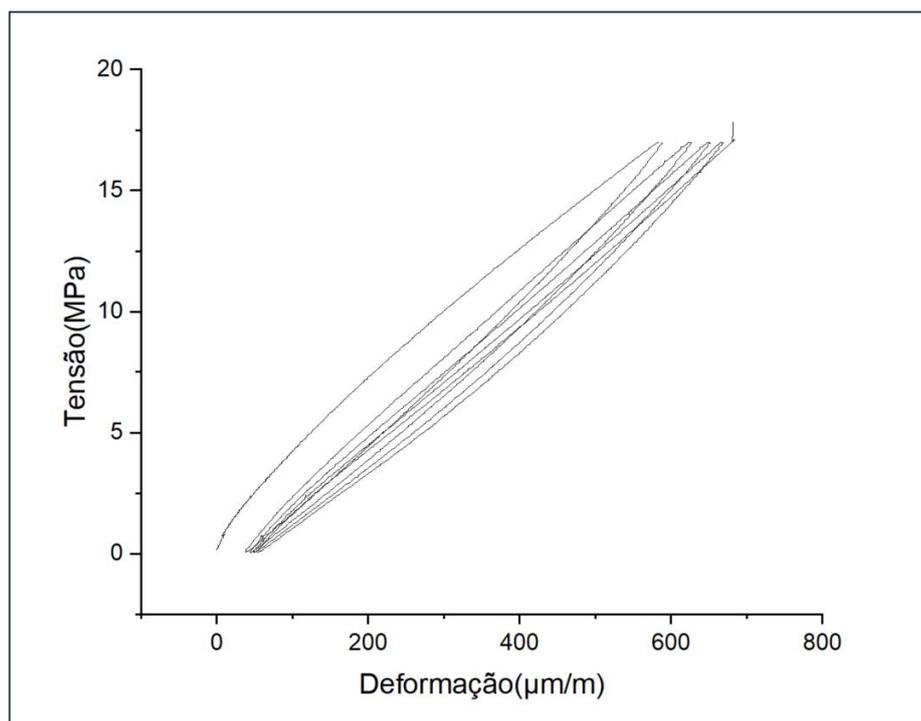
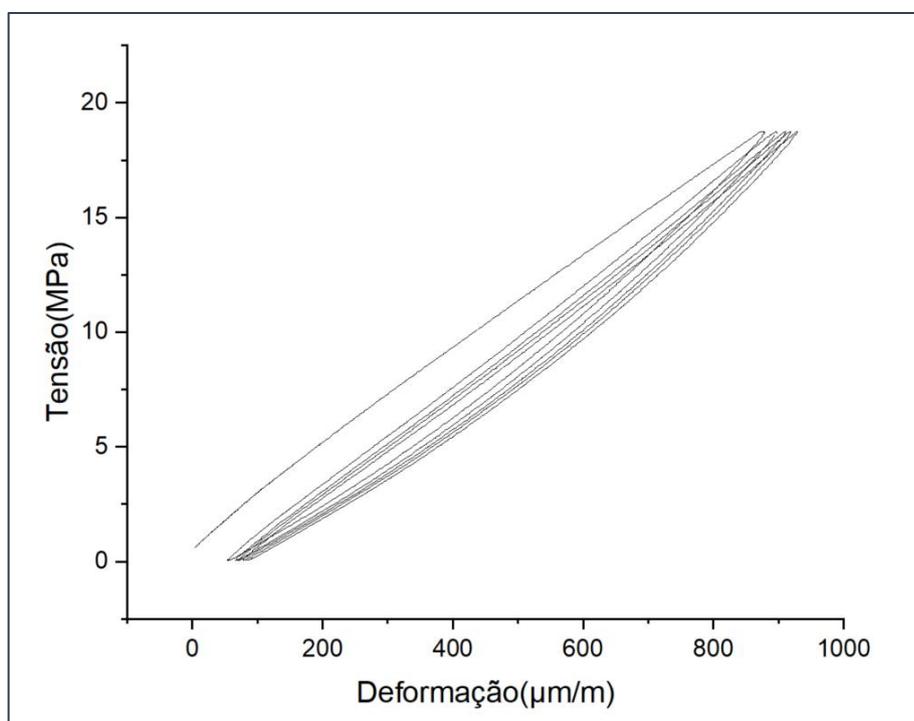


Figura 4.38 - Resultado do teste de dano de rigidez (SDT) para CNTC0,4 aos 28 dias



As Figuras 4.39 a 4.43 mostram a comparação de cada ciclo de carregamento para os concretos de referência, contendo 0,2% de NTC e 0,4% de NTC. Analisando os gráficos é possível observar que em todos os ciclos a menor deformação acontece no concreto contendo 0,2% de

NTC. Também é possível observar que o concreto contendo 0,4% de NTC apresenta maior deformação em todos os ciclos, ficando a carga do concreto de referência a deformação intermediária.

Figura 4.39 - Comparativo do ciclo 1 dos testes do dano de rigidez

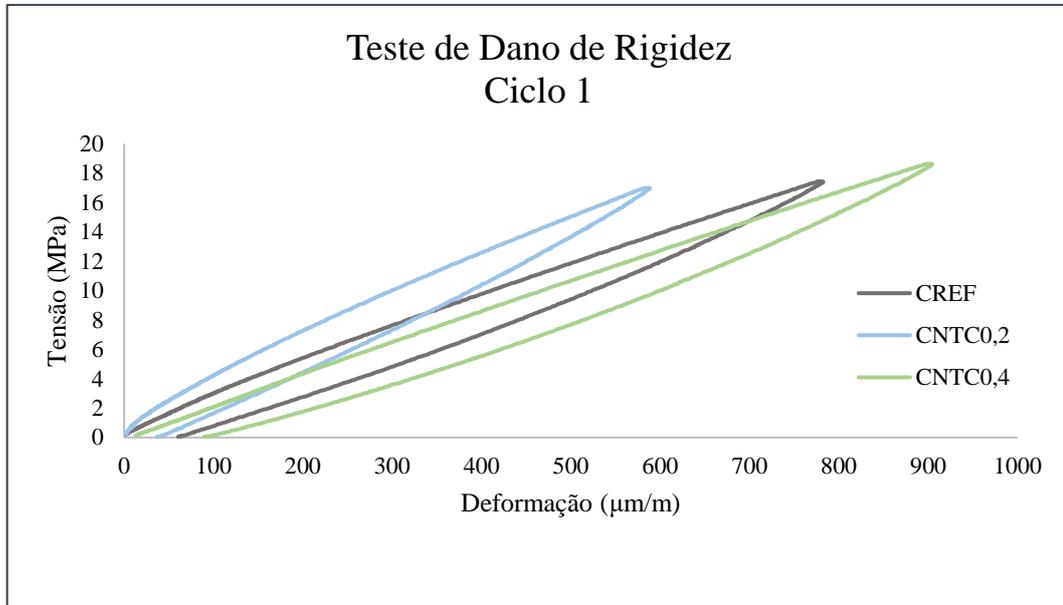


Figura 4.40 - Comparativo do ciclo 2 dos testes do dano de rigidez

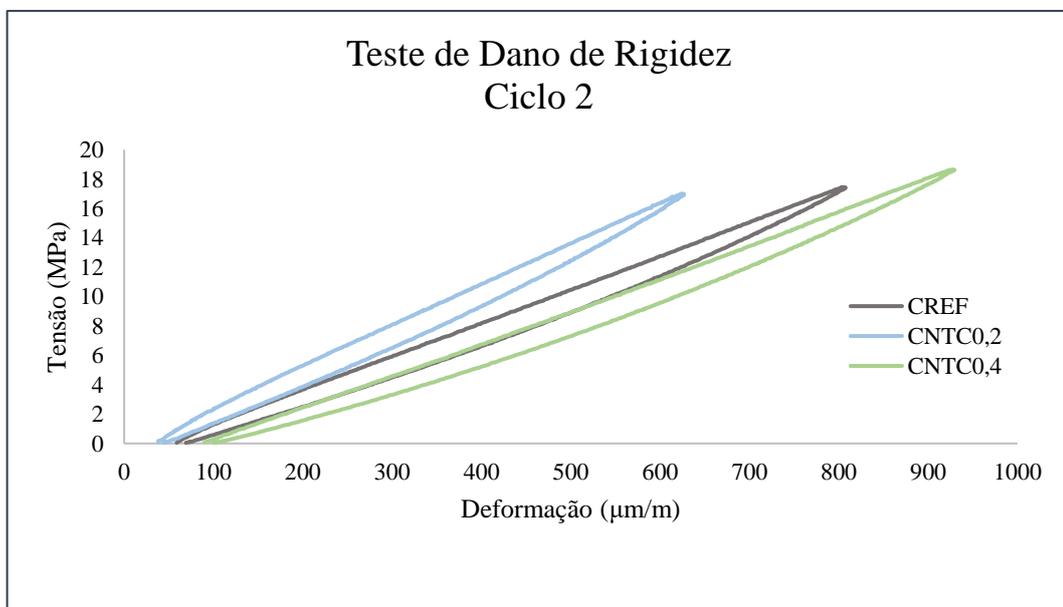


Figura 4.41 - Comparativo do ciclo 3 dos testes do dano de rigidez

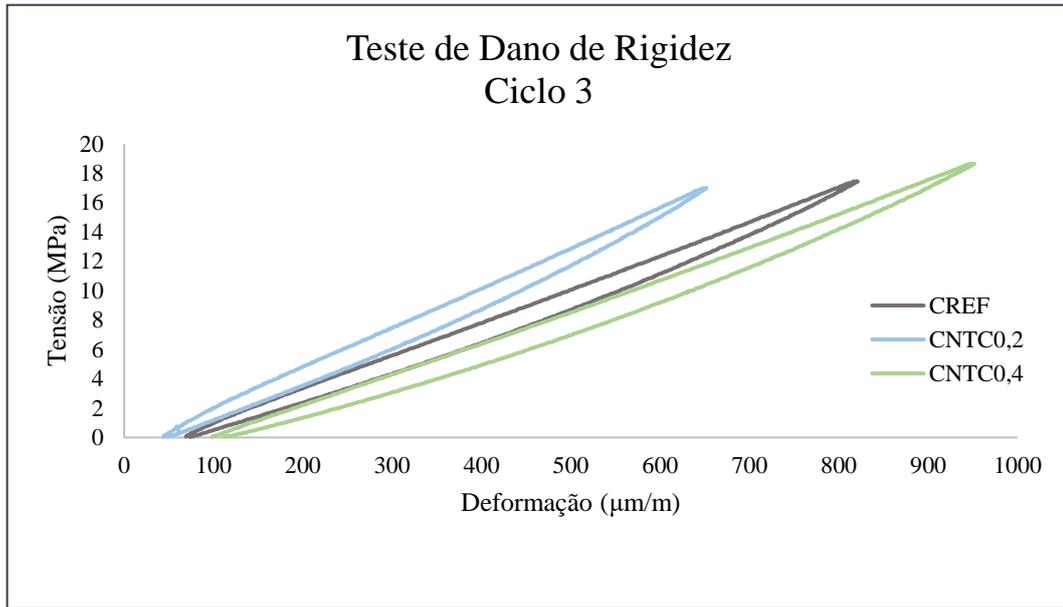


Figura 4.42 - Comparativo do ciclo 4 dos testes do dano de rigidez

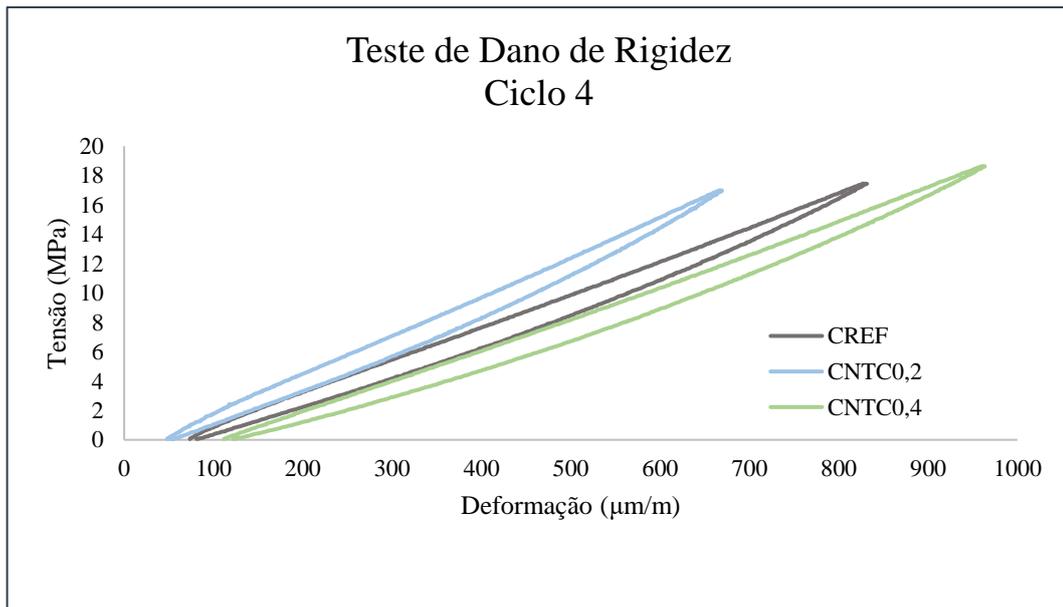
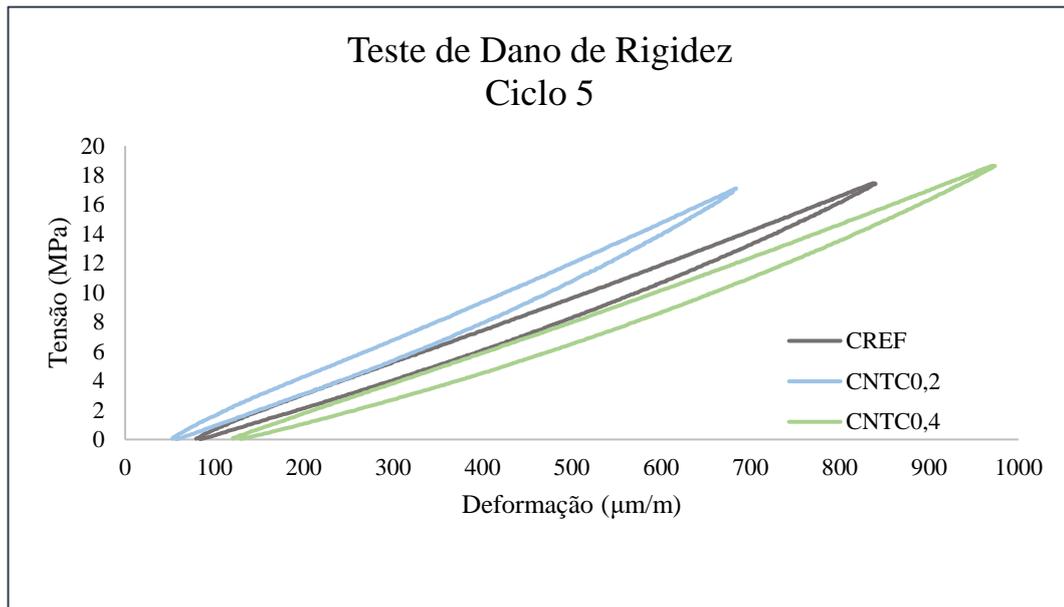


Figura 4.43 - Comparativo do ciclo 5 dos testes do dano de rigidez



## 5 CONCLUSÕES

---

Nos trabalhos avaliados na revisão bibliográfica verificou-se que não é comum a utilização de altos teores de nanotubos de carbono (NTC). Quando utilizados NTC em mistura física, alguns autores relataram dificuldade na dispersão do material, prejudicando a trabalhabilidade do concreto. O presente trabalho mostrou que tal prejuízo pode ser minimizado ou eliminado através da utilização do clínquer nanoestruturado. Os estudos realizados permitiram atestar que a trabalhabilidade dos concretos com NTC nos teores de 0,2% e 0,4% não foi afetada com os materiais empregados e dosagens adotadas, que é um avanço significativo.

Analisando os resultados mecânicos, observou-se melhor desempenho para a resistência à compressão no teor de 0,2% de NTC, que apresentou ligeiro aumento em relação ao concreto de referência em todas as idades. Para o ensaio de módulo de elasticidade, observou-se que os valores aumentaram com o aumento da idade e da quantidade de NTC, com exceção dos 28 dias, que apresentou uma discrepância no resultado e não foi possível repetir o ensaio para verificá-lo. Para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral não é possível afirmar que o NTC melhora a propriedade. Enquanto aos 7 dias o CNTC0,2 apresentou resultado melhor que o CREF, aos 3 e aos 28 dias, o valor de CNTC0,2 para a resistência à tração por compressão diametral foi menor do que o valor de CREF. No ensaio de resistência à tração na flexão é possível verificar que aos 3 e aos 28 dias a adição de NTC ao concreto apresentou melhores resultados. Aos 7 dias a melhoria aconteceu apenas para o CNTC0,2. Mais estudos se fazem necessários para clarificar essas diferenças de comportamento.

Os NTCs foram considerados promissores redutores das propriedades de retração por secagem e fluência do concreto. Foi observada redução considerável para tais propriedades, sendo que na retração por secagem, a redução foi de 12% nas primeiras idades e 5% nas idades finais e na fluência a redução foi de 12% nas primeiras idades e até 13% nas idades finais, ambas comparando o CREF com o CNTC0,4. A análise do coeficiente de fluência confirma a informação de que os NTC causam redução da deformação devido à fluência. Esses resultados revelam que a incorporação de NTC pode ser capaz de melhorar a microestrutura da pasta através do efeito filer e de nucleação. Através do efeito ponte, os materiais nanométricos controlam a propagação e o desenvolvimento de microfissuras.

O teste de dano de rigidez mostrou que a incorporação de NTC no concreto não causa impactos significativos nessa propriedade.

De acordo com os resultados apresentados, pode-se dizer que nessa pesquisa os melhores desempenhos ocorreram nos concretos contendo 0,2% de NTC. Analisando as pesquisas apresentadas na revisão bibliográfica, observa-se a variedade de teores utilizados e também a grande quantidade de modos de aplicação e dispersão do material no concreto. Assim como o estudo do nanotubo de carbono, o estudo do efeito da utilização desse material no concreto é recente. Os diversos resultados encontrados revelam que há muito para ser pesquisado, desenvolvido e descoberto a respeito do emprego de nanotubos de carbono em concreto.

Observou-se que o ensaio de resistência à compressão, onde foram testados seis corpos de prova, resultou em uma melhor análise estatística. Conclui-se que tamanhos amostrais maiores fazem com que os testes de hipótese sejam mais precisos para identificar diferenças significativas.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

---

Devido à variedade de resultados encontrados na pesquisa bibliográfica e pelo fato de o NTC ser um material novo, são colocadas algumas sugestões para trabalhos futuros a seguir:

- Analisar o comportamento de concretos produzidos com NTC sintetizados diretamente sobre o clínquer utilizando teores entre 0,2% e 0,5%, baseado na sugestão de teor ótimo de Silveira (2020);
- Analisar a retração por secagem e fluência total (básica + por secagem) de concretos produzidos com NTC sintetizados diretamente sobre o clínquer em idades maiores que 90 dias de ensaio;
- Verificar o comportamento de concretos contendo NTC sintetizados diretamente sobre o clínquer com relação a reações de expansivas causadas por reações álcali-agregado;
- Avaliar a Zona de Transição Intersticial (ZTI) de concretos com NTC sintetizados diretamente sobre o clínquer;
- Analisar o teor ótimo de aditivo para concretos com NTC;
- Considerar a utilização simultânea de NTC com outros tipos de adições;
- Analisar a microestrutura de compósitos contendo NTC.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

AHMAD, J.; ZHOU, Z. **Properties of concrete with addition carbon nanotubes: A review**. Construction and Building Materials, v.393, 2023.

AMATINO, G. M. **Bioconcretos com resíduos a partir do arroz: Análise de desempenho ao longo do tempo**. 154 f. Dissertação de Mestrado - Faculdade IMED, Passo Fundo, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **BT-106**: Guia básico de utilização do cimento Portland. São Paulo, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7218**: Agregados - Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7809:** Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953:** Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9833:** Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579:** Cimento Portland - Determinação do índice de finura por meio da peneira 75  $\mu\text{m}$  (nº 200). Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768-1:** Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142:** Concreto - Determinação da resistência á tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12826:** Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação do índice de finura por meio de peneirador aerodinâmico, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16372:** Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16606:** Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16607:** Cimento Portland - Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16887**: Concreto - Determinação do teor de ar em concreto fresco. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16889**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 30**: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 47**: Concreto - Determinação do teor de ar em concreto fresco - Método pressométrico. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 49**: Agregado miúdo - Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação de 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 NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

BARBAR, J. S. **Influência do teor de ar incorporado no desempenho de concretos com diferentes teores de agregados**, Tese (Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

BATTAGIN, A. F. **Cimento Portland**. In: Concreto: Ciência e Tecnologia. São Paulo, IBRACON, 2011.

BATTAGIN, A. F.; BATTAGIN, I. L. **O Cimento Portland no Brasil**. In: Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. São Paulo, IBRACON, 2010, 1v.

BORGES, L. A. **Desempenho de concretos produzidos com nanotubos de carbono sintetizados diretamente sobre o clínquer**, Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

CARRIÇO, A.; BOGAS, J. A.; HAWREEN, A.; GUEDES, M. **Durability of multi-walled carbon nanotube reinforced concrete**. Construction and Building Materials, v. 164, p. 121-133, 2018.

CHRISP, T. M.; WALDRON, P.; WOOD, J. G. M. **Development of a non-destructive test to quantify damage in deteriorated concrete**. Magazine of Concrete Research, Sheffield, v. 45, p. 247-256, dez. 1993.

EQUIPE DE FURNAS, Laboratório de Concreto, Departamento de Apoio e Controle Técnico; **Concretos: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades**. São Paulo, Pini, 1997.

FARIAS, M. M.; PALMEIRA, E. M. **Agregados para a construção civil**. In: Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. São Paulo, IBRACON, 2010, 1v.

HAMZAOU, R.; BENNABI, A.; GUESSASMA, S.; KHELIFA, M. R.; LEKLOU, N. **Optimal Carbon NanoTubes concentration incorporated in mortar and concrete**. Advanced Materials Research, v. 587, p. 107-110, 2012.

HASPARYK, N. P.; SANCHEZ, L. **SDT - Método de ensaio para a determinação do índice de dano de rigidez (SDI) e índice de deformação plástica (PDI) em concretos: instrução técnica ITDSBE001**. Furnas, Goiânia, 2021.

HASPARYK, N. P.; LOPES, A. N. M.; ANDRADE, M. A. S.; SANTOS, S. B. **Capítulo 22: Deformações por retração e fluência**. In: CONCRETO: Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo: IBRACON, 2005.

HAWREEN, A.; BOGAS, J.A. **Influence of carbon nanotubes on steel–concrete bond strength**. Materials and Structures, v. 51, p. 1-16, 2018.

HAWREEN, A.; BOGAS, J.A. **Creep, shrinkage and mechanical properties of concrete reinforced with different types of carbon nanotubes**. Construction and Building Materials, v. 198, p. 70-81, 2019.

HELENE, P.; ANDRADE, T. **Capítulo 29: Concreto de Cimento Portland**. In: Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. São Paulo: IBRACON, 2010.

HERBST, M. H.; MACEDO, M. I. F.; ROCCO, A. M.. **Tecnologia dos nanotubos de carbono: tendências e perspectivas de uma área multidisciplinar**, Química Nova, v. 27, n. 6, p. 986-992, 2004.

IJIMA, S. **Carbon nanotubes: Past, present, and future**. Physica B: Condensed Matter, v. 323, p. 1-5, 2002.

JUNG, M.; PARK, J.; HONG, S.; MOON, J. **The critical incorporation concentration (CIC) of dispersed carbon nanotubes for tailoring multifunctional properties of ultra-high performance concrete (UHPC)**. Journal of Materials Research and Technology, v. 17, p. 3361-3370, 2022.

KERIENÈ, J.; KLIGYS, M.; LAUKAITIS, A.; YAKOVLEV, G.; SPOKAUSKAS, A.; ALEKNEVICIUS, M., **The influence of multi-walled carbon nanotubes additive on properties of non-autoclaved and autoclaved aerated concretes**. Construction and Building Materials, v. 49, p. 527-535, 2013.

KIHARA, Y.; CENTURIONE, S. L. **O Cimento Portland**. In: CONCRETO: Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo: IBRACON, 2005.

LADEIRA, L. O.; SILVA, E. E.; OLIVEIRA, S.; LACERDA, R. G.; FERLAUTO, A. S.; ÁVILA, E. S.; LORENÇON, E. 2016. **Large scale production of carbon nanotubes in Portland cement**. US Patent, 9085487 B2.

LUDVIG, P. **Synthesis and Characterization of Portland Cement Manufactured with Carbon Nanotubes**, Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

MACLOAD, A.; FEHERVARI, A.; GATES, W.; GARCEZ, E.; ALDRIDGE, L.; COLLINS, F., **Enhancing fresh properties and strength of concrete with a pre-dispersed carbon nanotube liquid admixture**. Construction and Building Materials, v. 247, 2020.

MADHAVI, T. C.; PAVITHRA, P.; SINGH, S. B.; RAJ, S. B. V.; PAUL, S. **Effect of multiwalled carbon nanotubes on mechanical properties of concrete**. Internacional Journal of Scientific Research, v. 2, p. 166-168, 2013.

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

MARTIN, J. F. M. **Aditivos para Concreto**. In: CONCRETO: Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo: IBRACON, 2005.

MEDEIROS, M. H. F. de; DRANKA, F.; MANATTA, A. J.; COSTA, M. R. M. M. **Compósitos de cimento Portland com adição de nanotubos de carbono (NTC): Propriedades no estado fresco e resistência à compressão**. Matéria (Rio J.), Rio de Janeiro , v. 20, n. 1, p. 127-144, 2015.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **CONCRETO**. Microestrutura, Propriedades e Materiais. São Paulo: IBRACON, 2014.

MELO, V. S. **Nanotecnologia aplicada ao concreto: Efeito da mistura física de nanotubos de carbono em matrizes de cimento Portland**. 146f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

MOHSEN, M.O.; ANSARI, M.; TAHA, R.; NUAIMI, N.; TAQA, A., **Carbon Nanotube Effect on the Ductility, Flexural Strength and Permeability of Concrete**. Journal of Nanomaterials, 2019.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5.ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

PIMENTA, M. A.; SILVA, C. M.; ANDRADE, M. A. S.; CAMPOS, C. O. **Concreto para barragens e usinas hidrelétricas – Projetando e construindo para a durabilidade e segurança**. XXVII Seminário Nacional de Grandes Barragens, Comitê Brasileiro de Barragens. Belém, 2007.

SANCHEZ, F.; SOBOLEV, K. **Nanotechnology in concrete – A review**, Construction and Building Materials, v. 24, p. 2060-2071, 2010.

SANCHEZ, L. F. M.; FOURNIER B.; JOLIN, M.; BASTIEN, J. **Evaluation of the Stiffness Damage Test (SDT) as a tool for assessing damage in concrete due to alkali-silica reaction (ASR): Input parameters and variability of the teste responses**. Construction and Building Materials. 77, p. 20-32, 2015.

SANCHEZ, L. F. M.; FOURNIER B.; JOLIN, M.; BASTIEN, J. **Evaluation of the Stiffness Damage Test (SDT) as a tool for assessing damage in concrete due to ASR: test loading and output responses for concretes incorporating fine or coarse reactive aggregates**. Cement and Concrete Research. 56, p. 213-229, 2014.

SANCHEZ, L. F. M.; FOURNIER B.; JOLIN, M.; BASTIEN, J.; MITCHELL, D.; **Practical use of the Stiffness Damage Test (SDT) for assessing damage in concrete infrastructure affected by alkali-silica reaction**. Construction and Building Materials. 125, p. 1178-1188, 2016.

SANCHEZ, L. F. M.; FOURNIER, B.; JOLIN, M.; MITCHELL, D.; BASTIEN, J. **Overall assessment of Alkali-Aggregate Reaction (AAR) in concretes presenting different**

**strengths and incorporating a wide range of reactive aggregate types and natures.** Cement and Concrete Research. v. 93, p.17-31, 2017.

SANTRA, A., BOUL, P.J., PANG, X., **Influence of nanomaterials in oil well cement hydration and mechanical properties.** In: Proceedings of the SPE International Oilfield Nanotechnology Conference held in Noordwijk. Netherlands, 12–14, 2012.

SBRIGHI NETO, C. Agregados Naturais, Britados e Artificiais para Concreto. In: **Concreto: Ciência e Tecnologia.** São Paulo, IBRACON, 2011, 1v.

SHAH, S. P., KONSTA-GDOUTOS, M. S., METAXA, Z. S., **Advanced Cement Based Nanocomposites,** Select Papers from the Symposium on Recent Advances in Mechanics, Academy of Athens, Greece, Springer Press, 2009.

SIDDIQUE, R.; METHA, A. **Effect of carbon nanotubes on properties of cement mortars.** Construction and Building Materials, v. 12, n. 50, p. 116-129, 2013.

SILVA, F. G. S.; DANTAS, A. B. **Estudo sobre a retração autógena em concretos de alto desempenho (CAD's).** IX Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e V Encontro Latino Americano de Pós-Graduação – Universidade do Vale do Paraíba, 2005, São José dos Campos.

SILVEIRA, L. M. C. **Propriedades mecânicas de concretos autoadensável produzidos com nanotubos de carbono sintetizados diretamente sobre o clínquer.** Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

SMAOUI, N.; BÉRUBÉ, M. A.; FOURNIER, B.; BISSONNETTE, B.; DURAND, B. **Evaluation of the expansion attained to date by concrete affected by ASR - Part 1: experimental study.** Canadian Journal of Civil Engineering. 31, p. 826-845, 2004.

SOUZA, T.C.C. **Síntese contínua e caracterização de cimento Portland fabricando com nanotubos de carbono,** Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry,** London: Academic Press, 1997.

TONDER, P. e MAFOKOANE, T. **Effects of multi-walled carbon nanotubes on strength and interfacial transition zone of concrete.** Construction Materials and Structures, p. 718-727, 2014.

WALSH, J. **The effects of cracks on the uniaxial elastic compression of rocks.** Journal of Geophysical Research. 70, p. 339-411, 1965.

WILLE, K.; LOH, K. **Nanoengineering Ultra-High-Performance Concrete with Multiwalled Carbon Nanotubes.** Transportation Research Record. 2142. 119-126. 10.3141/2142-18, 2010.

YAKOVLEV, G.; KERIENÉ, J.; GAILIUS, A.; GIRNIENÉ, I. **Cement based foam concrete reinforced by carbon nanotubes,** Materials Science, v. 12, n. 2, p. 147-151, 2006.

YI, G.; WANG, P.; ZHAO, X. **Mechanical Behavior and Microstructure of Cement Composites Incorporating Surface-Treat Multi-Walled Carbon Nanotubes,** Carbon, v.43, p. 1239-1245, 2005.

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

## 8 APÊNDICE

### A. VALORES DAS PROPRIEDADES ENSAIADAS

#### a) Resistência à compressão

As tabelas 8.1 a 8.3 mostram, respectivamente, os valores de resistência à compressão obtidos para os concretos CREF, CNTC0,2 e CNTC0,4.

Tabela 8.1 - Valores de resistência à compressão para CREF

<b>CREF</b>					
<b>3 dias</b>		<b>7 dias</b>		<b>28 dias</b>	
CP	Resistência à compressão (MPa)	CP	Resistência à compressão (MPa)	CP	Resistência à compressão (MPa)
1	30,90	1	37,70	1	38,10
2	28,40	2	38,00	2	44,10
3	29,00	3	37,80	3	42,50
4	31,00	4	38,00	4	43,20
5	31,70	5	38,70	5	42,60
6	31,80	6	36,90	6	42,80
<b>Média</b>	30,47	<b>Média</b>	37,85	<b>Média</b>	42,22
<b>Desvio padrão</b>	1,43	<b>Desvio padrão</b>	0,58	<b>Desvio padrão</b>	2,10
<b>Coef. de variação</b>	4,69%	<b>Coef. de variação</b>	1,54%	<b>Coef. de variação</b>	4,97%

Tabela 8.2 - Valores de resistência à compressão para CNTC0,2

<b>CNTC0,2</b>					
<b>3 dias</b>		<b>7 dias</b>		<b>28 dias</b>	
CP	Resistência à compressão (MPa)	CP	Resistência à compressão (MPa)	CP	Resistência à compressão (MPa)
1	32,50	1	37,50	1	47,80
2	32,40	2	39,70	2	45,20
3	31,00	3	38,90	3	46,40
4	33,70	4	36,50	4	46,10
5	32,90	5	38,20	5	46,60
6	33,30	6	38,10	6	46,20
<b>Média</b>	32,63	<b>Média</b>	38,15	<b>Média</b>	46,38
<b>Desvio padrão</b>	0,94	<b>Desvio padrão</b>	1,11	<b>Desvio padrão</b>	0,84
<b>Coef. de variação</b>	2,87%	<b>Coef. de variação</b>	2,90%	<b>Coef. de variação</b>	1,82%

Tabela 8.3 - Valores de resistência à compressão para CNTC0,4

CNTC0,4					
3 dias		7 dias		28 dias	
CP	Resistência à compressão (MPa)	CP	Resistência à compressão (MPa)	CP	Resistência à compressão (MPa)
1	32,00	1	34,80	1	44,50
2	31,00	2	37,60	2	45,40
3	32,20	3	36,20	3	45,40
4	33,60	4	40,30	4	41,60
5	31,20	5	40,40	5	42,90
6	30,70	6	36,10	6	43,00
<b>Média</b>	31,78	<b>Média</b>	37,57	<b>Média</b>	43,80
<b>Desvio padrão</b>	1,06	<b>Desvio padrão</b>	2,33	<b>Desvio padrão</b>	1,54
<b>Coef. de variação</b>	3,34%	<b>Coef. de variação</b>	6,21%	<b>Coef. de variação</b>	3,52%

## b) Módulo de elasticidade

As tabelas 8.4 a 8.6 mostram os resultados obtidos no ensaio de módulo de elasticidade para os concretos CREF, CNTC0,2 e CNTC0,4, respectivamente.

Tabela 8.4 - Valores de módulo de elasticidade para CREF

CREF					
3 dias		7 dias		28 dias	
CP	Módulo de elasticidade (GPa)	CP	Módulo de elasticidade (GPa)	CP	Módulo de elasticidade (GPa)
1	22,10	1	23,80	1	22,10
2	23,20	2	-	2	21,80
3	23,00	3	25,00	3	22,40
<b>Média</b>	22,77	<b>Média</b>	24,40	<b>Média</b>	22,10
<b>Desvio padrão</b>	0,59	<b>Desvio padrão</b>	0,85	<b>Desvio padrão</b>	0,30
<b>Coef. de variação</b>	2,57%	<b>Coef. de variação</b>	3,48%	<b>Coef. de variação</b>	1,36%

Tabela 8.5 - Valores de módulo de elasticidade para CNTC0,2

CNTC0,2					
3 dias		7 dias		28 dias	
CP	Módulo de elasticidade (GPa)	CP	Módulo de elasticidade (GPa)	CP	Módulo de elasticidade (GPa)
1	23,20	1	25,10	1	27,60
2	22,70	2	24,60	2	27,90
3	25,90	3	25,25	3	22,70
<b>Média</b>	23,93	<b>Média</b>	24,98	<b>Média</b>	26,07
<b>Desvio padrão</b>	1,72	<b>Desvio padrão</b>	0,34	<b>Desvio padrão</b>	2,92
<b>Coef. de variação</b>	7,19%	<b>Coef. de variação</b>	1,36%	<b>Coef. de variação</b>	11,20%

Tabela 8.6 - Valores de módulo de elasticidade para CNTC0,4

CNTC0,4					
3 dias		7 dias		28 dias	
CP	Módulo de elasticidade (GPa)	CP	Módulo de elasticidade (GPa)	CP	Módulo de elasticidade (GPa)
1	24,40	1	24,50	1	24,10
2	22,70	2	25,50	2	21,50
3	23,10	3	26,40	3	21,90
<b>Média</b>	23,40	<b>Média</b>	25,47	<b>Média</b>	22,50
<b>Desvio padrão</b>	0,89	<b>Desvio padrão</b>	0,95	<b>Desvio padrão</b>	1,40
<b>Coef. de variação</b>	3,80%	<b>Coef. de variação</b>	3,73%	<b>Coef. de variação</b>	6,22%

## c) Resistência à tração por compressão diametral

As tabelas 8.7 a 8.9 mostram os resultados obtidos no ensaio de resistência à tração por compressão diametral para os concretos CREF, CNTC0,2 e CNTC0,4, respectivamente.

Tabela 8.7 - Valores de resistência à tração por compressão diametral para CREF

CREF					
3 dias		7 dias		28 dias	
CP	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	CP	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	CP	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)
1	2,85	1	3,50	1	4,21
2	3,36	2	3,13	2	3,82
3	3,42	3	3,45	3	4,22
<b>Média</b>	3,21	<b>Média</b>	3,36	<b>Média</b>	4,08
<b>Desvio padrão</b>	0,31	<b>Desvio padrão</b>	0,20	<b>Desvio padrão</b>	0,23
<b>Coef. de variação</b>	9,76%	<b>Coef. de variação</b>	5,97%	<b>Coef. de variação</b>	5,59%

Tabela 8.8 - Valores de resistência à tração por compressão diametral para CNTC0,2

CNTC0,2					
3 dias		7 dias		28 dias	
CP	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	CP	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	CP	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)
1	3,10	1	3,35	1	4,24
2	3,20	2	3,88	2	4,06
3	3,35	3	4,01	3	3,74
<b>Média</b>	3,22	<b>Média</b>	3,75	<b>Média</b>	4,01
<b>Desvio padrão</b>	0,13	<b>Desvio padrão</b>	0,35	<b>Desvio padrão</b>	0,25
<b>Coef. de variação</b>	3,91%	<b>Coef. de variação</b>	9,33%	<b>Coef. de variação</b>	6,31%

Tabela 8.9 - Valores de resistência à tração por compressão diametral para CNTC0,4

CNTC0,4					
3 dias		7 dias		28 dias	
CP	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	CP	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	CP	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)
1	3,09	1	3,51	1	3,94
2	3,40	2	3,28	2	4,05
3	3,52	3	3,31	3	3,95
<b>Média</b>	3,34	<b>Média</b>	3,37	<b>Média</b>	3,98
<b>Desvio padrão</b>	0,22	<b>Desvio padrão</b>	0,13	<b>Desvio padrão</b>	0,06
<b>Coef. de variação</b>	6,65%	<b>Coef. de variação</b>	3,71%	<b>Coef. de variação</b>	1,53%

## d) Resistência à tração na flexão

As tabelas 8.10 a 8.12 mostram os resultados obtidos no ensaio de resistência à tração na flexão para os concretos CREF, CNTC0,2 e CNTC0,4, respectivamente.

Tabela 8.10 - Valores de resistência à tração na flexão para CREF

CREF					
3 dias		7 dias		28 dias	
CP	Resistência à tração na flexão (MPa)	CP	Resistência à tração na flexão (MPa)	CP	Resistência à tração na flexão (MPa)
1	2,84	1	3,33	1	3,76
2	2,85	2	3,52	2	3,95
3	2,93	3	3,59	3	3,88
<b>Média</b>	2,87	<b>Média</b>	3,48	<b>Média</b>	3,86
<b>Desvio padrão</b>	0,05	<b>Desvio padrão</b>	0,13	<b>Desvio padrão</b>	0,10
<b>Coef. de variação</b>	1,72%	<b>Coef. de variação</b>	3,87%	<b>Coef. de variação</b>	2,49%

Tabela 8.11 - Valores de resistência à tração na flexão para CNTC0,2

CNTC0,2					
3 dias		7 dias		28 dias	
CP	Resistência à tração na flexão (MPa)	CP	Resistência à tração na flexão (MPa)	CP	Resistência à tração na flexão (MPa)
1	3,33	1	3,52	1	4,04
2	3,06	2	3,47	2	4,39
3	3,59	3	3,80	3	4,20
<b>Média</b>	3,33	<b>Média</b>	3,60	<b>Média</b>	4,21
<b>Desvio padrão</b>	0,27	<b>Desvio padrão</b>	0,18	<b>Desvio padrão</b>	0,18
<b>Coef. de variação</b>	7,97%	<b>Coef. de variação</b>	4,95%	<b>Coef. de variação</b>	4,16%

Tabela 8.12 - Valores de resistência à tração na flexão para CNTC0,4

CNTC0,4					
3 dias		7 dias		28 dias	
CP	Resistência à tração na flexão (MPa)	CP	Resistência à tração na flexão (MPa)	CP	Resistência à tração na flexão (MPa)
1	2,99	1	3,21	1	4,72
2	3,53	2	3,10	2	3,94
3	2,83	3	3,72	3	4,17
<b>Média</b>	3,12	<b>Média</b>	3,34	<b>Média</b>	4,28
<b>Desvio padrão</b>	0,37	<b>Desvio padrão</b>	0,33	<b>Desvio padrão</b>	0,40
<b>Coef. de variação</b>	11,77%	<b>Coef. de variação</b>	9,89%	<b>Coef. de variação</b>	9,37%

## e) Retração Hidráulica

A tabela 8.13 mostra os resultados médios obtidos no ensaio de retração hidráulica para os concretos CREF, CNTC0,2 e CNTC0,4, respectivamente e seus comparativos com o concreto de referência (CREF).

Tabela 8.13 - Comparativo dos valores de retração hidráulica

Retração Hidráulica ( $\times 10^{-6}$ ) - Comparativo					
Idade (dias)	CREF	CNTC0,2	CNTC0,4	Diferença CNTC0,2-CREF	Diferença CNTC0,4-CREF
1	49,12	29,82	40,35	39%	18%
2	80,70	66,67	82,46	17%	-2%
5	161,40	143,86	142,11	11%	12%
6	185,96	164,91	163,16	11%	12%
7	201,75	180,70	182,46	10%	10%
12	266,67	245,61	236,84	8%	11%
13	277,19	256,14	249,12	8%	10%
14	289,47	266,67	259,65	8%	10%
15	296,49	271,93	266,67	8%	10%
16	305,26	284,21	278,95	7%	9%
19	319,30	296,49	294,74	7%	8%
20	326,32	305,26	300,00	6%	8%
21	333,33	308,77	310,53	7%	7%
22	340,35	315,79	315,79	7%	7%
23	352,63	324,56	322,81	8%	8%
26	363,16	342,11	338,60	6%	7%
28	375,44	354,39	350,88	6%	7%
30	382,46	359,65	357,89	6%	6%
33	366,67	347,37	340,35	5%	7%
34	382,46	363,16	361,40	5%	6%
36	385,96	366,67	364,91	5%	5%
37	345,61	328,07	329,82	5%	5%
43	373,68	366,67	363,16	2%	3%
44	384,21	380,70	378,95	1%	1%

47	377,19	359,65	377,19	5%	0%
48	384,21	375,44	368,42	2%	4%
49	387,72	371,93	371,93	4%	4%
50	394,74	373,68	368,42	5%	7%
51	401,75	384,21	377,19	4%	6%
54	407,02	389,47	391,23	4%	4%
56	424,56	400,00	396,49	6%	7%
57	424,56	400,00	398,25	6%	6%
63	454,39	431,58	426,3158	5%	6%

f) Retração Autógena

A tabela 8.14 mostra os resultados médios obtidos no ensaio de retração autógena para os concretos CREF, CNTC0,2 e CNTC0,4, respectivamente e seus comparativos com o concreto de referência (CREF).

Tabela 8.14 – Comparativo dos valores de retração autógena

Retração Autógena ( $\times 10^{-6}$ ) - Comparativo					
Idade (dias)	CREF	CNTC0,2	CNTC0,4	Diferença CNTC0,2-CREF	Diferença CNTC0,4-CREF
2	0,0000	0,0000	0,0000	-	-
5	20,4045	24,0916	16,9237	18,07%	-17,06%
6	23,7270	28,0537	20,0562	18,24%	-15,47%
7	26,7158	31,6274	22,9783	18,38%	-13,99%
8	29,4029	34,8480	25,6942	18,52%	-12,61%
9	31,8211	37,7526	28,2139	18,64%	-11,34%
12	37,7577	44,9085	34,7234	18,94%	-8,04%
14	40,8588	48,6610	38,3203	19,10%	-6,21%
15	42,2099	50,2989	39,9323	19,16%	-5,40%
20	47,4944	56,7235	46,5170	19,43%	-2,06%
21	48,3245	57,7352	47,5937	19,47%	-1,51%
22	49,0961	58,6763	48,6054	19,51%	-1,00%
26	51,6996	61,8566	52,0983	19,65%	0,77%
27	52,2506	62,5305	52,8536	19,67%	1,15%
28	52,7684	63,1641	53,5686	19,70%	1,52%
29	53,2557	63,7607	54,2462	19,73%	1,86%
30	53,7150	64,3232	54,8892	19,75%	2,19%
33	54,9462	65,8321	56,6329	19,81%	3,07%
34	55,3137	66,2828	57,1593	19,83%	3,34%
36	55,9935	67,1169	58,1402	19,87%	3,83%
37	56,3084	67,5034	58,5977	19,88%	4,07%
41	57,4259	68,8760	60,2382	19,94%	4,90%
42	57,6743	69,1813	60,6064	19,95%	5,08%
43	57,9119	69,4733	60,9598	19,96%	5,26%
44	58,1392	69,7528	61,2991	19,98%	5,44%
47	58,7660	70,5237	62,2404	20,01%	5,91%
48	58,9583	70,7603	62,5308	20,02%	6,06%
49	59,1430	70,9876	62,8106	20,03%	6,20%

50	59,3206	71,2062	63,0803	20,04%	6,34%
51	59,4915	71,4165	63,3404	20,04%	6,47%
56	60,2563	72,3583	64,5128	20,08%	7,06%
58	60,5259	72,6905	64,9293	20,10%	7,28%
61	60,8975	73,1484	65,5059	20,12%	7,57%
62	61,0134	73,2912	65,6864	20,12%	7,66%
63	61,1256	73,4296	65,8615	20,13%	7,75%
64	61,2343	73,5636	66,0313	20,13%	7,83%
65	61,3397	73,6935	66,1962	20,14%	7,92%
68	61,6371	74,0602	66,6630	20,16%	8,15%
69	61,7304	74,1753	66,8099	20,16%	8,23%
71	61,9091	74,3957	67,0917	20,17%	8,37%
72	61,9946	74,5012	67,2269	20,17%	8,44%
75	62,2374	74,8007	67,6114	20,19%	8,63%
76	62,3140	74,8952	67,7330	20,19%	8,70%
78	62,4611	75,0768	67,9670	20,20%	8,82%
79	62,5318	75,1640	68,0797	20,20%	8,87%
82	62,7333	75,4127	68,4013	20,21%	9,04%
84	62,8593	75,5684	68,6031	20,22%	9,14%
85	62,9201	75,6434	68,7004	20,22%	9,19%

## g) Fluência

As tabelas 8.15 a 8.20 mostram os resultados obtidos no ensaio de fluência para os concretos CREF, CNTC0,2 e CNTC0,4, respectivamente. A tabela 8.21 mostra o comparativo entre os resultados obtidos.

Tabela 8.15 – Valores de leitura do ensaio de fluência para CREF

Fluência - CREF								
Idade (dias)	Tempo de Ensaio (dias)	Leitura (mm)	Deformação ( $\times 10^{-6}$ )	$\varepsilon_s$ ( $10^{-6}$ cm/cm)	$\varepsilon_{rc}$ ( $10^{-6}$ cm/cm)	Fluência ( $10^{-6}$ /MPa)		Fluência Média ( $10^{-6}$ /MPa)
						CP1	CP2	
7	s/ carga	-0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	c/ carga	28,34	28,43	0,00	0,00	1,88	1,94	1,91
7	5'	623,27	623,36	0,00	594,93	41,23	42,36	41,80
7	10'	625,68	625,76	0,00	597,33	41,39	42,55	41,97
7	30'	667,86	667,94	0,00	639,52	44,18	45,56	44,87
7	1hora	673,22	673,30	0,00	644,88	44,53	45,96	45,25
7	2horas	709,20	709,28	0,00	680,86	46,91	48,54	47,73
7	5horas	715,68	715,77	0,00	687,34	47,34	49,05	48,19
11	4	845,12	845,20	6,55	810,22	55,47	57,27	56,37
13	6	855,91	856,00	8,98	818,59	56,02	57,74	56,88
18	11	1002,83	1002,91	13,69	960,79	65,42	67,86	66,64
20	13	1008,94	1009,02	15,22	965,37	65,73	68,25	66,99
25	18	1044,78	1044,87	18,46	997,98	67,88	70,51	69,20
27	20	1057,20	1057,29	19,57	1009,29	68,63	71,32	69,98
32	25	1072,91	1073,00	22,04	1022,53	69,51	72,22	70,87

34	27	1074,59	1074,68	22,92	1023,33	69,56	72,31	70,93
39	32	1092,46	1092,55	24,91	1039,22	70,61	73,32	71,96
46	39	1116,98	1117,07	27,30	1061,34	72,07	74,88	73,48
56	49	1135,94	1136,02	30,15	1077,44	73,14	75,86	74,50
66	59	1154,83	1154,92	32,53	1093,95	74,23	77,14	75,68
68	61	1155,48	1155,57	32,97	1094,17	74,25	77,23	75,74
74	67	1165,68	1165,76	34,19	1103,14	74,84	77,86	76,35
81	74	1176,61	1176,70	35,50	1112,77	75,48	78,48	76,98
89	82	1182,38	1182,47	36,87	1117,17	75,77	78,73	77,25

Tabela 8.16 - Valores de leitura do ensaio de fluência para CNTC0,2

Fluência – CNTC0,2								
Idade (dias)	Tempo de Ensaio (dias)	Leitura (mm)	Deformação ( $\times 10^{-6}$ )	$\epsilon_s$ ( $10^{-6}$ cm/cm)	$\epsilon_{rc}$ ( $10^{-6}$ cm/cm)	Fluência ( $10^{-6}$ /MPa)		Fluência Média ( $10^{-6}$ /MPa)
						CP1	CP2	
7	s/ carga	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	c/ carga	0,17	0,13	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
7	5'	589,61	589,57	0,00	589,44	38,99	38,98	38,99
7	10'	592,02	591,98	0,00	591,85	39,15	39,14	39,15
7	30'	642,86	642,82	0,00	642,69	42,51	42,51	42,51
7	1hora	643,88	643,84	0,00	643,71	42,58	42,57	42,58
7	2horas	678,80	678,76	0,00	678,63	44,89	44,88	44,89
7	5horas	671,02	670,98	0,00	670,85	44,38	44,37	44,37
11	4	771,91	771,87	8,16	763,58	50,51	50,50	50,51
13	6	737,25	737,21	11,17	725,91	48,02	48,01	48,01
18	11	901,83	901,79	17,05	884,61	58,51	58,51	58,51
20	13	908,66	908,61	18,95	889,54	58,84	58,83	58,84
25	18	937,88	937,83	22,98	914,73	60,51	60,50	60,50
27	20	951,01	950,97	24,37	926,48	61,28	61,27	61,28
32	25	977,52	977,47	27,43	949,91	62,83	62,82	62,83
34	27	977,90	977,85	28,53	949,20	62,79	62,78	62,78
39	32	990,57	990,53	31,00	959,40	63,46	63,45	63,46
46	39	1018,19	1018,15	33,98	984,04	65,09	65,08	65,09
56	49	1040,41	1040,36	37,53	1002,70	66,32	66,32	66,32
66	59	1045,61	1045,57	40,50	1004,94	66,47	66,46	66,47
68	61	1045,70	1045,66	41,04	1004,49	66,44	66,43	66,44
74	67	1054,47	1054,43	42,56	1011,74	66,92	66,91	66,92
81	74	1067,70	1067,66	44,20	1023,34	67,69	67,68	67,69
89	82	1072,96	1072,92	45,90	1026,90	67,92	67,92	67,92

Tabela 8.17 - Valores de leitura do ensaio de fluência para CNTC0,4

Fluência – CNTC0,4								
Idade (dias)	Tempo de Ensaio (dias)	Leitura (mm)	Deformação ( $\times 10^{-6}$ )	$\epsilon_s$ ( $10^{-6}$ cm/cm)	$\epsilon_{rc}$ ( $10^{-6}$ cm/cm)	Fluência ( $10^{-6}$ /MPa)		Fluência Média ( $10^{-6}$ /MPa)
						CP1	CP2	
7	s/ carga	-0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	c/ carga	-0,41	-0,27	0,00	0,00	-0,02	0,00	-0,01
7	5'	591,15	591,28	0,00	591,56	39,11	39,12	39,12

7	10'	609,55	609,69	0,00	609,96	40,32	40,34	40,33
7	30'	659,09	659,23	0,00	659,50	43,60	43,62	43,61
7	1hora	659,43	659,57	0,00	659,84	43,62	43,64	43,63
7	2horas	702,62	702,75	0,00	703,02	46,48	46,50	46,49
7	5horas	696,74	696,88	0,00	697,15	46,09	46,11	46,10
11	4	800,59	800,73	8,52	792,48	52,39	52,41	52,40
13	6	750,34	750,47	11,66	739,08	48,86	48,88	48,87
18	11	902,19	902,32	17,79	884,80	58,50	58,52	58,51
20	13	911,49	911,63	19,78	892,12	58,98	59,00	58,99
25	18	955,70	955,84	23,98	932,13	61,63	61,65	61,64
27	20	968,22	968,36	25,43	943,20	62,36	62,38	62,37
32	25	991,83	991,96	28,63	963,60	63,71	63,73	63,72
34	27	985,36	985,49	29,78	955,99	63,21	63,23	63,22
39	32	1000,88	1001,02	32,36	968,93	64,06	64,08	64,07
46	39	1026,58	1026,72	35,47	991,52	65,56	65,58	65,57
56	49	1043,53	1043,66	39,18	1004,76	66,43	66,45	66,44
66	59	1055,74	1055,88	42,27	1013,88	67,04	67,06	67,05
68	61	1055,52	1055,65	42,83	1013,09	66,99	67,00	66,99
74	67	1066,91	1067,05	44,43	1022,89	67,63	67,65	67,64
81	74	1063,30	1063,44	46,13	1017,58	67,28	67,30	67,29
89	82	1050,51	1050,65	47,90	1003,01	66,32	66,34	66,33

Tabela 8.18 - Comparativo dos valores de fluência

Fluência - Comparativo					
Idade	CREF	CNTC0,2	CNTC0,4	Diferença CNTC0,2-CREF	Diferença CNTC0,4-CREF
s/ carga	0	0	0	-	
c/ carga	1,91	0,00	-0,01	-99,78%	-100,47%
5'	41,80	38,99	39,12	-6,72%	-6,41%
10'	41,97	39,15	40,33	-6,72%	-3,90%
30'	44,87	42,51	43,61	-5,25%	-2,81%
1hora	45,25	42,58	43,63	-5,90%	-3,57%
2horas	47,73	44,89	46,49	-5,95%	-2,60%
5horas	48,19	44,37	46,10	-7,93%	-4,35%
4	56,37	50,51	52,40	-10,40%	-7,03%
6	56,88	48,01	48,87	-15,59%	-14,08%
11	66,64	58,51	58,51	-12,20%	-12,20%
13	66,99	58,84	58,99	-12,17%	-11,94%
18	69,20	60,50	61,64	-12,56%	-10,92%
20	69,98	61,28	62,37	-12,43%	-10,87%
25	70,87	62,83	63,72	-11,34%	-10,08%
27	70,93	62,78	63,22	-11,49%	-10,88%
32	71,96	63,46	64,07	-11,82%	-10,96%
39	73,48	65,09	65,57	-11,42%	-10,76%
49	74,50	66,32	66,44	-10,98%	-10,81%
59	75,68	66,47	67,05	-12,18%	-11,41%
61	75,74	66,44	66,99	-12,28%	-11,55%
67	76,35	66,92	67,64	-12,35%	-11,40%
74	76,98	67,69	67,29	-12,07%	-12,58%
82	77,25	67,92	66,33	-12,08%	-14,14%

## h) Teste de dano de rigidez

As tabelas 8.19 e 8.20 mostram os valores de PDI e SDI obtidos no teste de dano de rigidez.

Tabela 8.19 - Valores de PDI obtidos no teste de dano de rigidez

CREF		CNTC0,2		CNTC0,4	
28 dias		28 dias		28 dias	
CP	PDI	CP	PDI	CP	PDI
1	0,10	1	0,08	1	0,12
2	0,08	2	0,09	2	0,08
<b>Média</b>	0,09	<b>Média</b>	0,09	<b>Média</b>	0,10
<b>Desvio padrão</b>	0,01	<b>Desvio padrão</b>	0,01	<b>Desvio padrão</b>	0,03
<b>Coef. de variação</b>	15,71%	<b>Coef. de variação</b>	8,32%	<b>Coef. de variação</b>	28,28%

Tabela 8.20 - Valores de SDI obtidos no teste de dano de rigidez

CREF		CNTC0,2		CNTC0,4	
28 dias		28 dias		28 dias	
CP	SDI	CP	SDI	CP	SDI
1	0,21	1	0,21	1	0,23
2	0,21	2	0,21	2	0,22
<b>Média</b>	0,21	<b>Média</b>	0,21	<b>Média</b>	0,23
<b>Desvio padrão</b>	0,00	<b>Desvio padrão</b>	0,00	<b>Desvio padrão</b>	0,01
<b>Coef. de variação</b>	0,00%	<b>Coef. de variação</b>	0,00%	<b>Coef. de variação</b>	3,14%

## B. ANÁLISES ESTATÍSTICAS

### a) Resistência à compressão

A Tabela 8.21 apresenta o resumo dos valores para a variável resistência à compressão condicionada aos fatores idade do concreto e concentração de NTC. O experimento foi feito com 6 replicações de corpos de prova para cada uma das interações entre os fatores.

Tabela 8.21 - Resumo dos valores de resistência à compressão e número de frequência de replicação condicionado aos fatores

Idade (dias)	Traço	Número de amostras	%	Média	Mediana	Desvio Padrão
3	CREF	6	11,11%	30,47	30,95	1,43
	CNTC0,2	6	11,11%	32,63	32,70	0,94
	CNTC0,4	6	11,11%	31,78	31,60	1,06
7	CREF	6	11,11%	37,85	37,90	0,58
	CNTC0,2	6	11,11%	38,15	38,15	1,11
	CNTC0,4	6	11,11%	37,57	36,90	2,33
28	CREF	6	11,11%	42,22	42,70	2,10
	CNTC0,2	6	11,11%	46,38	46,30	0,84
	CNTC0,4	6	11,11%	43,80	43,75	1,54

Com a avaliação das Figuras 8.1, 8.2 e 8.3 é possível analisar a distribuição e o comportamento da variável de interesse: resistência à compressão do concreto. Na Figura 8.1 é possível observar que a maior mediana está presente na amostra CNTC0,2. Já na Figura 8.2, observa-se tendência de aumento dos valores de resistência à compressão com o aumento da idade, como era de se esperar. Na Figura 8.3 pode-se perceber tendência de aumento da resistência à compressão na presença dos nanotubos de carbono. Em função desses resultados iniciais e de modo a quantificar melhor a influência dos NTC, foi então realizada uma análise de variância (ANOVA).

Figura 8.1 – Boxplot para o fator concentração de NTC para a resistência à compressão dos concretos

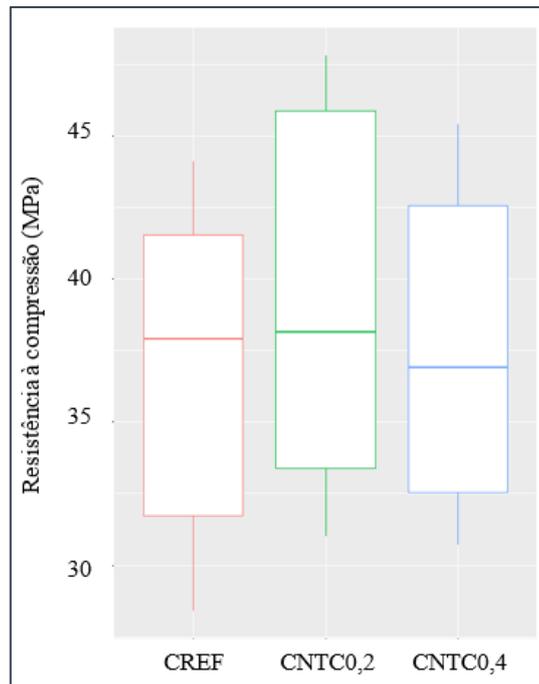


Figura 8.2 - Boxplot para o fator idade para a resistência à compressão dos concretos

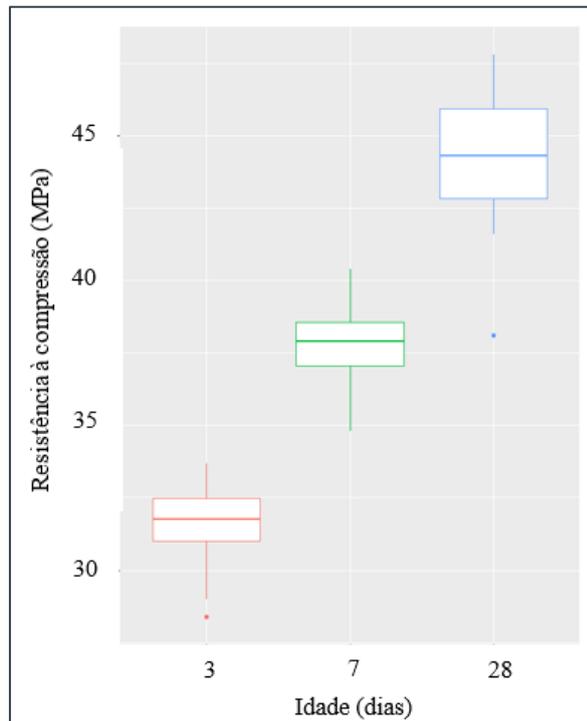
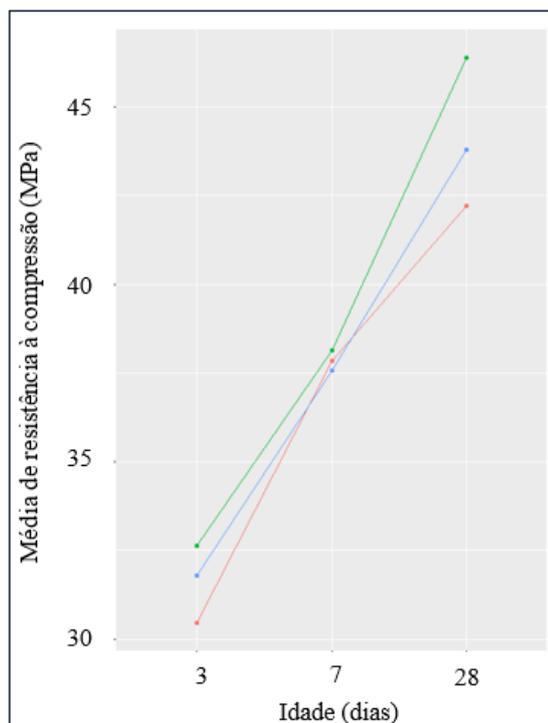


Figura 8.3 - Média da resistência à compressão nas interações dos fatores para a variável resistência à compressão dos concretos



Os resultados da análise de variância (ANOVA) estão mostrados na Tabela 8.22. A soma de quadrados, exemplificada na tabela, é uma estatística que representa uma medida de variação e desvio da média, e o fator “idade:concentração” é a interação entre eles.

Tabela 8.22 - Teste para significância dos fatores para a variável resistência à compressão dos concretos

Fator	Média da Soma dos Quadrados	P - Valor
Idade	703,80	< 0,001
Concentração	22,30	< 0,001
Idade:Concentração	5,90	0,033

A análise desses resultados permite concluir, ao nível de 5% de significância, que:

- Rejeita-se a hipótese de que não existe diferença para a resistência à compressão nos concretos entre os níveis do fator idade, pois *p – valor* é menor 0,05. Logo, pode-se dizer que a idade do concreto é um fator que impacta significativamente na resistência à compressão do concreto;
- Rejeita-se também a hipótese de que não existe diferença para a resistência à compressão nos concretos entre os níveis do fator concentração de NTC, pois *p – valor* é menor que 0,05. Logo, pode-se dizer que a concentração de nanotubo no

concreto é um fator que impacta significativamente na resistência à compressão concreto;

- Rejeita-se também a hipótese de que não existe diferença para a resistência à compressão nos concretos na interação entre os níveis dos fatores concentração de nanotubo e idade do concreto, pois  $p - valor$  é menor que 0,05. Logo, pode-se dizer que a interação entre a idade do concreto e a concentração de nanotubo impacta significativamente na resistência à compressão do concreto.

Observou-se necessidade de realizar comparações múltiplas para todos os fatores, pois todos mostraram-se significativos. Começando pela idade, as Tabelas 8.23 e 8.24 contêm os resultados dos testes realizados. Conclui-se que ao nível de 5% de significância, os níveis da idade do concreto diferem entre si em relação à média da resistência a compressão. Além disso, é possível dizer que o concreto com 28 dias de idade apresenta resistência média à compressão significativamente maior.

Tabela 8.23 - Comparação múltipla entre os níveis do fator idade para a variável resistência à compressão dos concretos

Comparação	Diferença	P-valor
3-7	-6,23	<0,001
3-28	-12,51	<0,001
7-28	-6,28	<0,001

Tabela 8.24 - Média e indicativo de diferença significativa dos níveis do fator idade para a variável resistência à compressão dos concretos

Nível	Resistência	Grupo
28	44,13	a
7	37,86	b
3	31,63	c

Avaliando o teste de comparações múltiplas na concentração de NTC, tem-se os resultados exemplificados pelas Tabelas 8.25 e 8.26. É possível concluir que ao nível de 5% de significância o concreto CNTC0,2 difere dos demais níveis de concentração e que apresenta resistência média à compressão significativamente maior.

Tabela 8.25 - Comparação múltipla entre os níveis do fator concentração de NTC para a variável resistência à compressão dos concretos

Comparação	Diferença	P-valor
CREF – CNTC0,2	-2,21	< 0,001
CREF – CNTC0,4	-0,87	0,174
CNTC0,2 – CNTC0,4	1,34	0,020

Tabela 8.26 - Média e indicativo de diferença significativa dos níveis do fator concentração de NTC para a variável resistência à compressão dos concretos

Nível	Resistência	Grupo
CNTC0,2	39,06	a
CNTC0,4	37,72	b
CREF	36,84	b

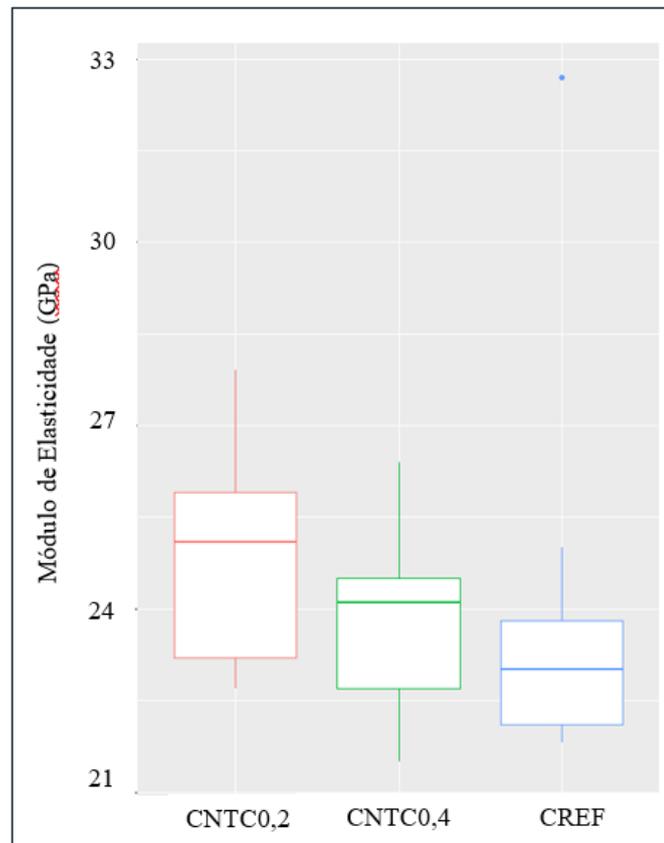
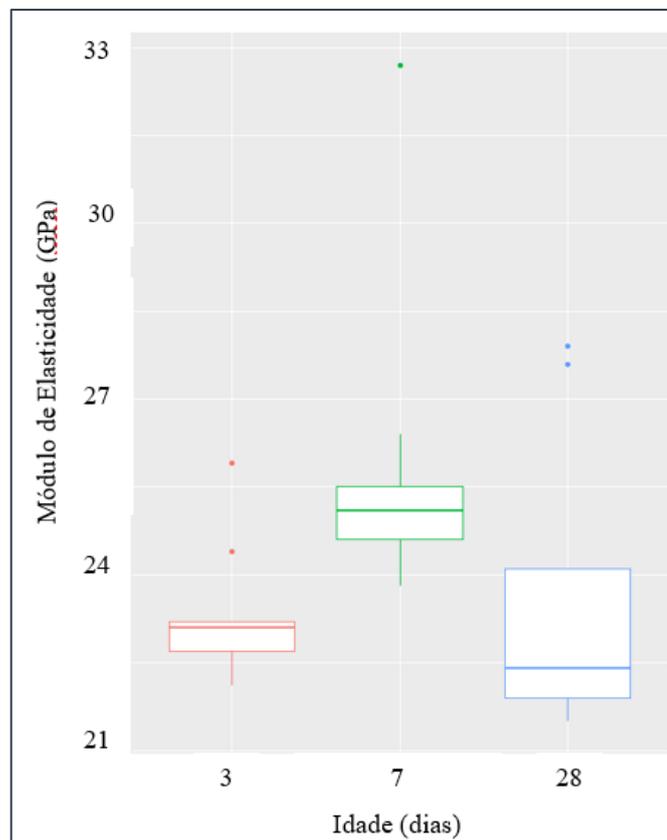
#### b) Módulo de elasticidade

A Tabela 8.27 mostra o resumo da variável módulo de elasticidade (GPa) (média, mediana e desvio padrão) nos grupos “idades” e “concentração de NTC”. Foram realizadas 3 replicações de corpos de prova para cada uma das interações entre os fatores.

Tabela 8.27 - Resumo dos valores em GPa dos módulos de elasticidade e do número e frequência de replicação condicionado aos fatores

Idade (dias)	Traço	Número de amostras	%	Média	Mediana	Desvio Padrão
3	CREF	3	11,11%	22,77	23,00	0,59
	CNTC0,2	3	11,11%	23,93	23,20	1,72
	CNTC0,4	3	11,11%	23,40	23,10	0,89
7	CREF	3	11,11%	27,17	25,00	4,83
	CNTC0,2	3	11,11%	24,98	25,10	0,34
	CNTC0,4	3	11,11%	25,47	25,50	0,95
28	CREF	3	11,11%	22,10	22,10	0,30
	CNTC0,2	3	11,11%	26,07	27,60	2,92
	CNTC0,4	3	11,11%	22,50	21,90	1,40

O *boxplot* é uma ferramenta gráfica que permite visualizar a distribuição e valores discrepantes dos resultados avaliando seu comportamento. As Figuras 8.4 e 8.5 ilustram o *boxplot* respectivamente para o grupo teor de NTC e o grupo idade.

Figura 8.4 - *Boxplot* para o fator teor de NTC na variável módulo de elasticidadeFigura 8.5 - *Boxplot* para o fator idade na variável módulo de elasticidade

Na Figura 8.4 é possível observar que existe um *outlier* para o traço CREF e que o traço CNTC0,2 apresenta mediana de módulo de elasticidade maior que as demais. Já na Figura 8.5 percebe-se que há vários *outliers* e que o a mediana do ensaio com 7 dias de idade apresentou a maior mediana do experimento. Além disso, aparenta ter uma diferença significativa. O teste de análise de variâncias (ANOVA) foi utilizado para analisar esses fatos.

Para se adequar às suposições da ANOVA, utilizou-se o valor inverso do módulo de elasticidade. Como a função inversa é linear, todas as conclusões tiradas para o valor inverso servem integralmente para o valor original colhido no experimento. A Figura 8.6 ilustra a média do módulo de elasticidade para cada uma das interações entre os 2 fatores, e pode ser usada como uma representação em gráfico da Tabela 4.10. Nessa figura é possível perceber que o fator idade parece ser significativo, e que entre os níveis de concentração há uma certa variação. Os resultados do teste de análise de variância (ANOVA) estão apresentados na Tabela 8.28. A soma de quadrados, exemplificada na tabela, é uma estatística que representa uma medida de variação e desvio da média, e o fator “idade:concentração” é a interação entre eles.

Figura 8.6 - Gráfico de interação dos fatores concentração de NTC e idade dos concretos na variável módulo de elasticidade

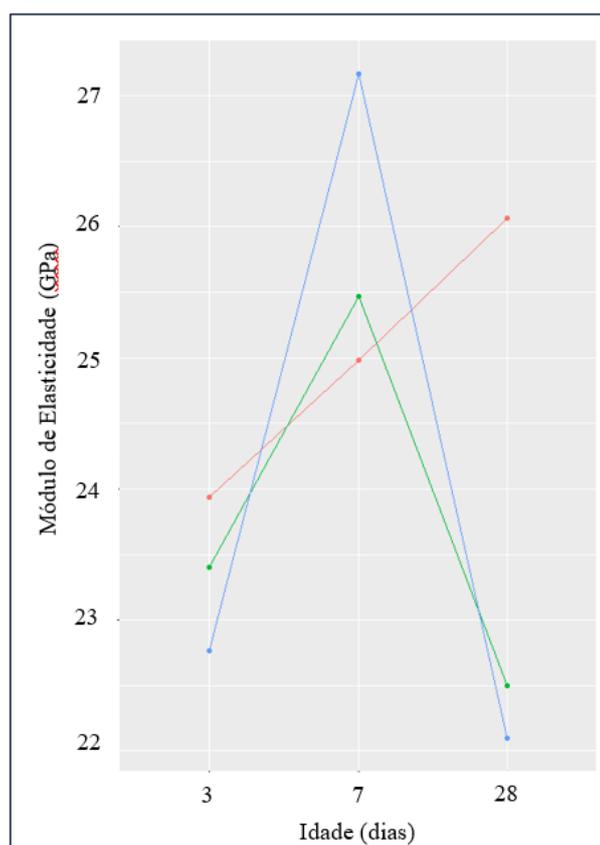


Tabela 8.28 - Teste para significância dos fatores na variável módulo de elasticidade dos concretos

Fator	Média da Soma dos Quadrados	P - Valor
Idade	0,000046	0,0179
Concentração	0,000012	0,2865
Idade : Concentração	0,000017	0,1496

A análise desses resultados permite concluir, ao nível de 5% de significância, que:

- Rejeita-se a hipótese de que não existe diferença para o módulo de elasticidade dos concretos entre os níveis do fator idade, pois **p - valor** encontrado é menor que 0,05. Logo, pode-se dizer que a idade é um fator que impacta significativamente no módulo de elasticidade dos concretos;
- A hipótese de que não existe diferença para o módulo de elasticidade nos concretos do experimento entre os níveis do fator concentração de NTC nos concretos não foi rejeitada, pois **p - valor** encontrado foi maior 0,05. Logo, não se pode dizer que a concentração é um fator que impacta significativamente na elasticidade dos concretos;
- A hipótese de que não existe diferença para o módulo de elasticidade nos concretos do experimento entre a interação dos fatores não foi rejeitada, pois **p - valor** encontrado foi maior que 0,05. Logo, não se pode dizer que a interação entre idade e concentração de NTC nos concretos é um fator que impacta significativamente na elasticidade dos concretos.

Como o fator idade foi significativo, observou-se a necessidade de realizar comparações múltiplas entre os níveis do fator e determinar quais diferem. As Tabelas 8.29 e 8.30 mostram os resultados do teste realizado. Trazendo os dados para a escala original, é possível afirmar que os concretos com 7 dias de idade apresentam valor médio do módulo de elasticidade significativamente maior. Esse resultado é inesperado como já citado anteriormente, porém não houve possibilidade de repetir os ensaios.

Tabela 8.29 - Comparação múltipla entre os níveis do fator idade para a variável módulo de elasticidade dos concretos

Comparação	Diferença	P - Valor
3 - 7	0,00392	0,032
3 - 28	0,00004	1,000
7 - 28	-0,00388	0,034

Tabela 8.30 - Média e indicativo de diferença significativa dos níveis do fator idade para a variável módulo de elasticidade dos concretos

Nível	Elasticidade (transformado)	Elasticidade	Grupo
3	0,0429	23,3207	a
28	0,0428	23,3428	a
7	0,0390	25,6700	b

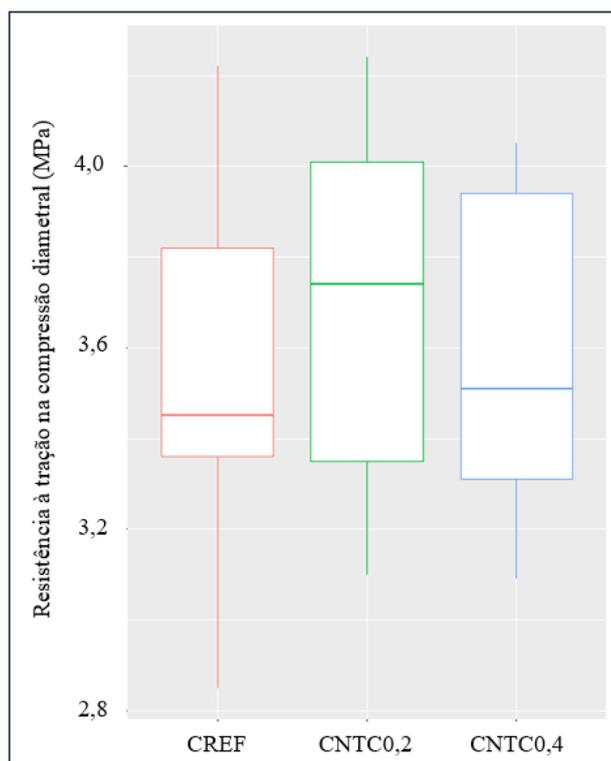
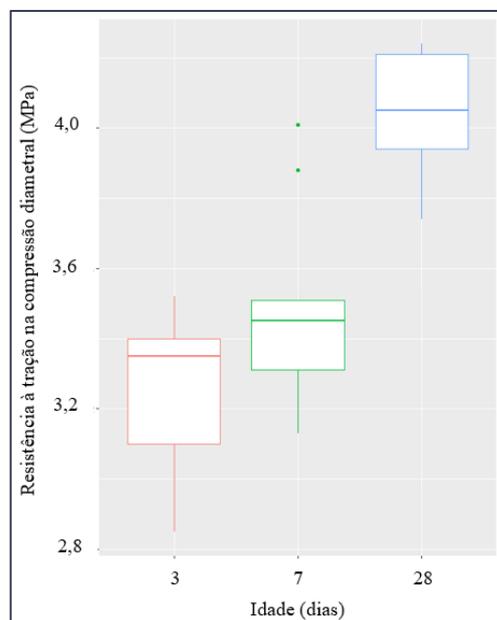
c) Resistência à tração por compressão diametral

A Tabela 8.31 mostra o resumo da variável resistência à tração por compressão diametral (média, mediana e desvio padrão) nos grupos “idades” e “concentração de NTC”. Foram realizadas 3 replicações de corpos de prova para cada uma das interações entre os fatores.

Tabela 8.31 - Resumo dos valores de resistência à tração por compressão diametral (em MPa) e do número e frequência de replicação condicionado aos fatores

Idade (dias)	Traço	Número de amostras	%	Média	Mediana	Desvio Padrão
3	CREF	3	11,11%	3,21	3,36	0,31
	CNTC0,2	3	11,11%	3,22	3,20	0,13
	CNTC0,4	3	11,11%	3,34	3,40	0,22
7	CREF	3	11,11%	3,36	3,45	0,20
	CNTC0,2	3	11,11%	3,75	3,88	0,35
	CNTC0,4	3	11,11%	3,37	3,31	0,13
28	CREF	3	11,11%	4,08	4,21	0,23
	CNTC0,2	3	11,11%	4,01	4,06	0,25
	CNTC0,4	3	11,11%	3,98	3,95	0,06

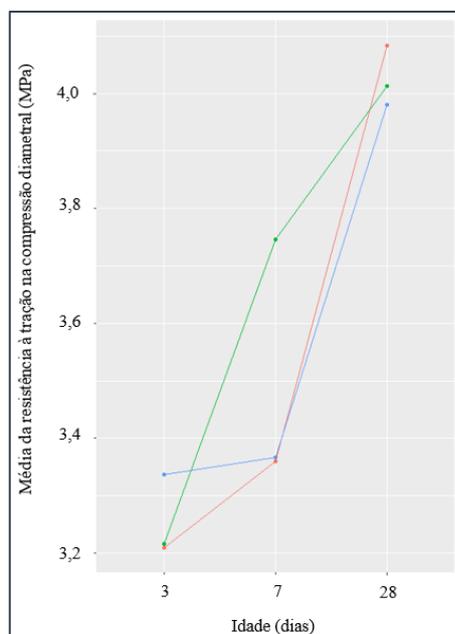
Nas Figuras 8.7 e 8.8 é possível verificar os *boxplots* da concentração de NTC nos concretos e idades dos concretos em dias, respectivamente. A variável no eixo y representa a resistência à tração na compressão diametral. A Figura 8.7 mostra que a amostra de referência apresenta a menor mediana, enquanto os concretos CNTC0,2 possuem a maior mediana. Por outro lado, na Figura 8.8 os concretos com 28 dias de idade apresentam mediana maior que as demais idades do experimento.

Figura 8.7 - *Boxplot* para o fator concentração para a variável resistência à tração por compressão diametralFigura 8.8 - *Boxplot* para o fator idade para a variável resistência à tração na compressão diametral

Para se adequar às suposições da ANOVA foi utilizado o valor inverso da resistência à tração por compressão diametral. Como a função inversa é linear, todas as conclusões obtidas para o valor inverso podem ser aplicadas integralmente para o valor original que foi colhido o experimento. A Figura 8.9 mostra as médias da resistência à tração na compressão diametral

para cada interação entre os fatores. É possível observar que o valor da resistência aumenta com o avanço da idade.

Figura 8.9 - Gráfico de interação dos fatores concentração de NTC e idade do concreto na resposta para a resistência à tração por compressão diametral



Os resultados da análise de variância (ANOVA) estão apresentados na Tabela 8.32. A soma de quadrados, exemplificada na tabela, é uma estatística que representa medida de variação e desvio da média, e o fator “idade:concentração” é a interação entre eles.

Tabela 8.32 - Teste para significância dos fatores para a variável resistência à tração por compressão diametral

Fator	Média da soma dos quadrados	P - valor
Idade	0,0083	< 0,001
Concentração de NTC	0,0002	0,576
Idade:Concentração de NTC	0,0004	0,366

A análise desses resultados permite concluir ao nível de 5% de significância que:

- Rejeita-se a hipótese de que não existe diferença para a resistência à tração por compressão diametral nos concretos entre os níveis do fator idade, pois **p - valor** é menor que 0,05. Logo, pode-se afirmar que a idade do concreto é um fator que impacta significativamente na resistência à tração por compressão diametral do concreto;
- A hipótese de que não existe diferença para a resistência à tração na compressão diametral nos concretos entre os níveis do fator concentração de NTC não foi rejeitada,

pois *p - valor* é maior que 0,05. Logo, não se pode afirmar que a concentração de NTC no concreto é um fator que impacta significativamente na resistência à tração por compressão diametral concreto;

- A hipótese de que não existe diferença para a resistência à tração na compressão diametral nos concretos na interação entre os níveis dos fatores concentração de NTC e idade do concreto não foi rejeitada, pois *p - valor* é maior que 0,05. Logo, não se pode afirmar que a interação entre a idade do concreto e a concentração de NTC impacta significativamente na resistência à tração por compressão diametral do concreto.

No fator idade, considerado significativo, foram realizadas as comparações múltiplas entre os níveis, cujos resultados estão apresentados nas Tabelas 8.33 e 8.34. Conclui-se que ao nível de 5% de significância, o nível referente aos concretos com 28 dias de idade difere dos demais, com média transformada inversamente. Logo, é possível afirmar que os concretos com 28 dias de idade apresentam média significativamente maior para a resistência à tração por compressão diametral em relação as outras idades do experimento.

Tabela 8.33 - Comparação múltipla entre os níveis do fator idade para a variável resistência à tração por compressão diametral

Comparação	Diferença	P - valor
3 – 7	0,020	0,084
3 – 28	0,060	< 0,001
7 – 28	0,039	< 0,001

Tabela 8.34 - Média e indicativo de diferença significativa dos níveis do fator idade para a variável resistência à tração por compressão diametral

Nível	Resistência (transformada)	Resistência	Grupo
3	0,3085	3,2415	a
7	0,2881	3,4810	a
28	0,2489	4,0177	b

## d) Resistência à tração na flexão

A Tabela 8.35 apresenta o resumo para a variável resistência à tração na flexão condicionada aos fatores idade do concreto e concentração de NTC utilizados na análise estatística. Analisando a tabela é possível perceber que o experimento foi feito com 3 replicações de corpos de prova para cada uma das interações entre os fatores.

Tabela 8.35 - Resumo do valor da resistência à tração na flexão (MPa) e do número e frequência de replicação condicionado aos fatores

Idade (dias)	Traço	Número de amostras	%	Média	Mediana	Desvio Padrão
3	CREF	3	11,11%	2,87	2,85	0,05
	CNTC0,2	3	11,11%	3,33	3,33	0,27
	CNTC0,4	3	11,11%	3,12	2,99	0,37
7	CREF	3	11,11%	3,48	3,52	0,13
	CNTC0,2	3	11,11%	3,60	3,52	0,18
	CNTC0,4	3	11,11%	3,34	3,21	0,33
28	CREF	3	11,11%	3,86	3,88	0,10
	CNTC0,2	3	11,11%	4,21	4,20	0,18
	CNTC0,4	3	11,11%	4,28	4,17	0,40

Com os *boxplots* das Figuras 8.10 e 8.11 é possível analisar a distribuição e o comportamento da variável de interesse. Na Figura 8.10 é possível observar que a maior mediana está presente na amostra CNTC0,2. Já na Figura 8.11 pode-se observar uma tendência de que com o aumento da idade aumenta-se também os valores de resistência à tração na flexão. Espera-se que a análise de variância (ANOVA) confirme esses fatos.

A Figura 8.12 mostra a distribuição da resistência à tração na flexão para cada uma das replicações feitas no experimento. Uma das suposições do teste ANOVA é que a homogeneidade das variâncias dos níveis dos fatores seja a mesma. Na Figura 8.12 e no *boxplot* da Figura 8.10 é possível observar que o nível de variância dos valores da amostra CNTC0,4 é maior que os demais níveis, contrariando o pressuposto na ANOVA. Ao fazer o Teste de Bartlett para comparar a homogeneidade rejeitou-se ao nível de 5% de significância a hipótese de que a variância era igual para todos os níveis do fator concentração. Logo, não sendo possível a realização da amostra, utilizou-se o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis para variáveis independentes, pois o mesmo não necessita dessa suposição.

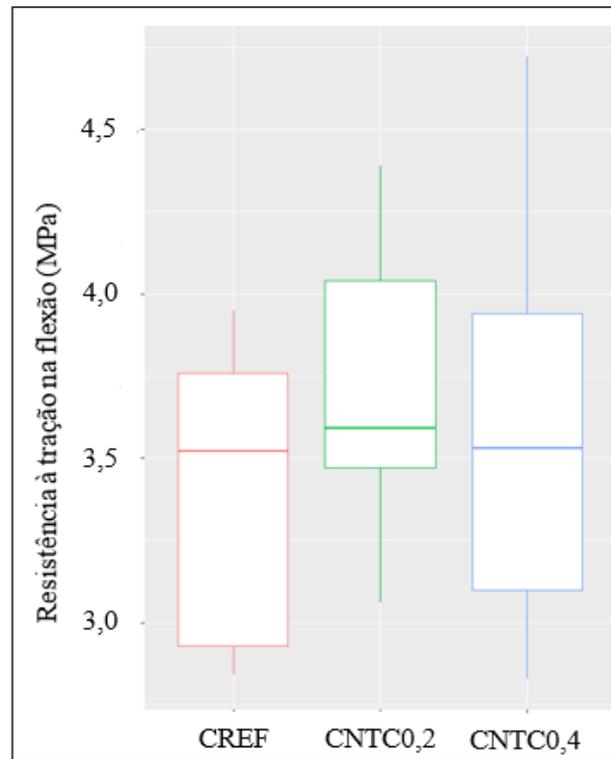
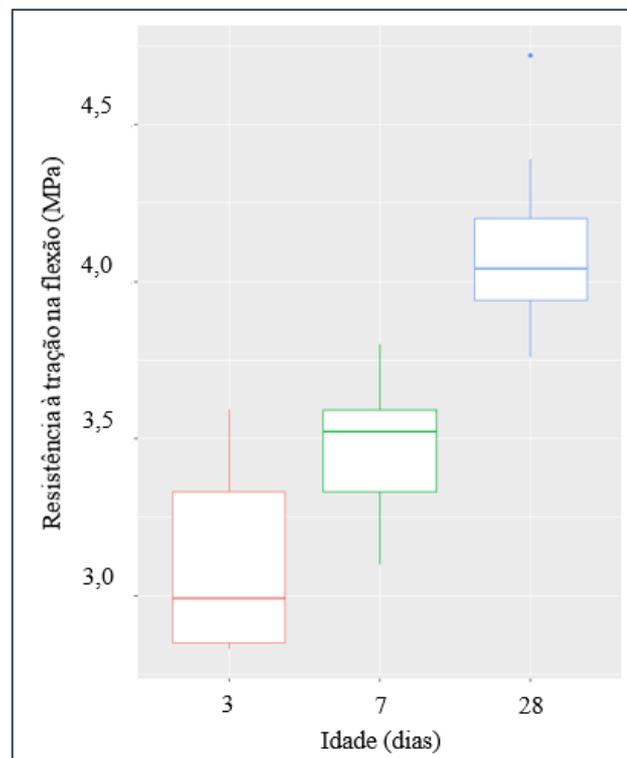
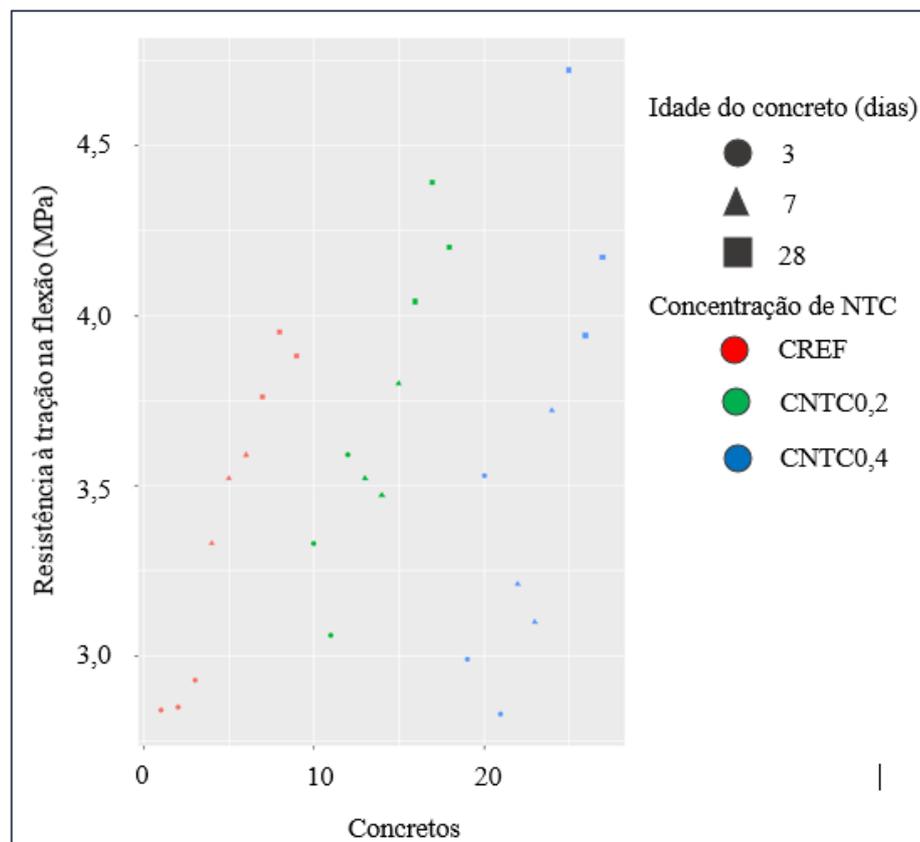
Figura 8.10 - *Boxplot* para o fator concentração de NTC para a variável resistência à tração na flexãoFigura 8.11 - *Boxplot* para o fator idade para a variável resistência à tração na flexão

Figura 8.12 - Distribuição da resistência à tração na flexão nos corpos de prova condicionados aos fatores de concentração de NTC e idade do concreto

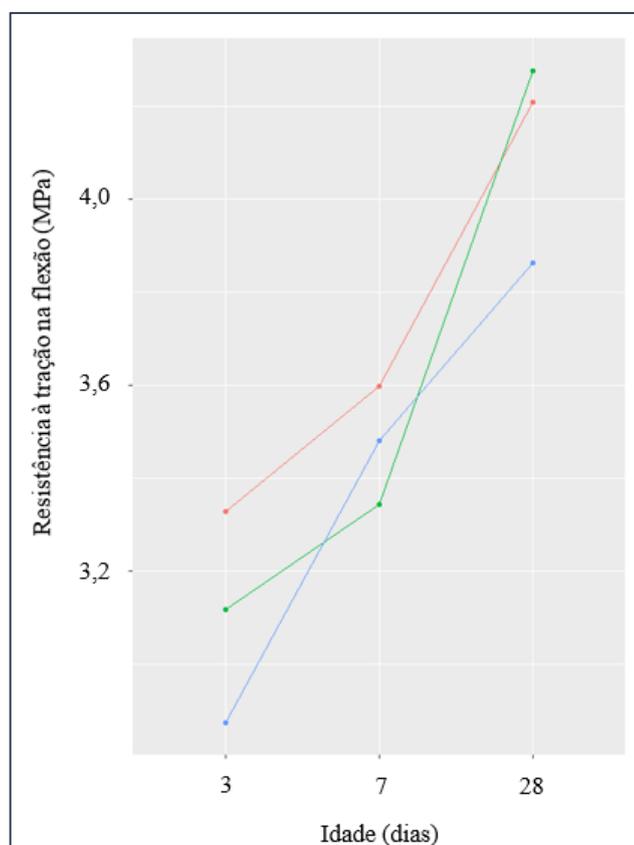


Os resultados do teste de Kruskal-Wallis para a resistência à tração na flexão estão dispostos na Tabela 8.36. Nesse teste a interação entre os fatores não foi testada. A interpretação se dá pelo gráfico de interação dos pontos mostrado na Figura 8.13.

Tabela 8.36 - Teste para significância dos fatores para a variável resistência à tração na flexão

Fator	Estatística do Teste	P - valor
Idade	19,33	< 0,001
Concentração	1,49	0,474

Figura 8.13 - Média da resistência à tração na flexão nas interações dos fatores para a variável resistência à tração dos concretos



A análise desses resultados permite concluir ao nível de 5% de significância que:

- Rejeita-se a hipótese de que não existe diferença para a resistência à tração na flexão nos concretos entre os níveis do fator idade, pois  $p - \text{valor}$  é menor que 0,05. Logo, pode-se dizer que a idade do concreto é um fator que impacta significativamente na resistência à tração na flexão do concreto;
- A hipótese de que não existe diferença para a resistência à tração na flexão nos concretos entre os níveis do fator concentração de NTC não foi rejeitada pois  $p - \text{valor}$  é maior que 0,05. Logo, não se pode dizer que a concentração de NTC no concreto é um fator que impacta significativamente na resistência à tração na flexão concreto.

Realizou-se então as comparações múltiplas para o fator significativo, cujos resultados estão apresentados nas Tabelas 8.37 e 8.38. Concluiu-se que ao nível de 5% de significância as idades de ensaio impactam no valor resistência média da tração na flexão. Além disso, é possível dizer

que o concreto com 28 dias de idade apresenta média significativamente maior para a resistência à tração na flexão se comparada às demais idades do experimento.

Tabela 8.37 - Comparação múltipla entre os níveis do fator idade para a variável resistência à tração na flexão considerando a interação da concentração de NTC no concreto

<b>Comparação</b>	<b>P - valor</b>
3-7	0,027
3-28	< 0,001
7-28	< 0,001

Tabela 8.38 - Média e indicativo de diferença significativa dos níveis do fator idade para a variável resistência à tração na flexão considerando a interação da concentração de NTC no concreto

<b>Nível</b>	<b>Resistência</b>	<b>Grupo</b>
28	4,12	a
7	3,47	b
3	3,11	c