

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

**“DESEMPENHO DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM NANOTUBOS DE  
CARBONO SINTETIZADOS DIRETAMENTE SOBRE O CLÍNQUER”**

Autor: Leonardo Araujo Borges

Orientador: Prof. Dr. José Marcio Fonseca Calixto

Coorientador: Prof. Dr. Luiz Orlando Ladeira

Belo Horizonte

Abril/2019

Leonardo Araujo Borges

**“DESEMPENHO DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM NANOTUBOS DE CARBONO SINTETIZADOS DIRETAMENTE SOBRE O 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 Mestre em Construção Civil. Área de concentração: Tecnologia na Construção Civil. Linha de pesquisa: Materiais de Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. José Márcio Fonseca Calixto

Coorientador: Prof. Dr. Luiz Orlando Ladeira

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2019

B732d	<p>Borges, Leonardo Araujo. Desempenho de concretos produzidos com nanotubos de carbono sintetizados diretamente sobre o clínquer [recurso eletrônico] / Leonardo Araujo Borges. - 2019. 1 recurso online (xxiii, 131 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: José Marcio Fonseca Calixto. Coorientador: Luiz Orlando Ladeira.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Anexos: f. 115-131.</p> <p>Bibliografia: f. 104-114. Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Construção civil - Teses. 2. Materiais de construção. 3. Concreto - Teses. 4. Concreto - Propriedades mecânicas - Teses. 5. Nanotubos de carbono - Teses. I. Calixto, José Marcio Fonseca. II. Ladeira, Luiz Orlando. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 691(043)</p>
-------	--

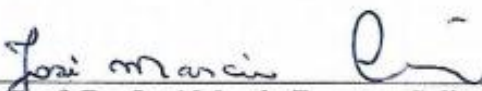
LEONARDO ARAUJO BORGES

**"DESEMPENHO DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM NANOTUBOS DE CARBONO SINTETIZADOS DIRETAMENTE SOBRE O CLÍNQUER"**

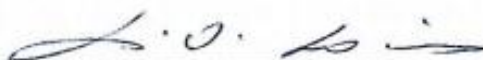
Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Construção Civil e aprovada em sua forma final pelo Mestrado em Construção Civil do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

Belo Horizonte, 11 de abril de 2019

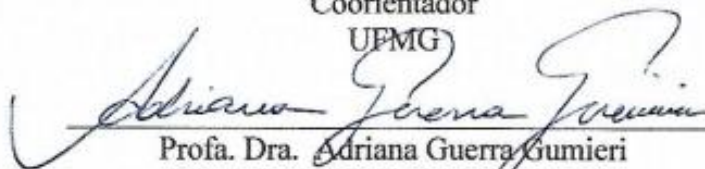
BANCA EXAMINADORA



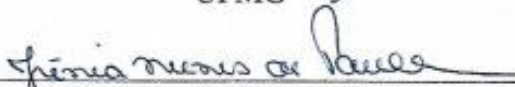
Prof. Dr. José Marcio Fonseca Calixto  
Orientador  
UFMG



Prof. Dr. Luiz Orlando Ladeira  
Coorientador  
UFMG



Profa. Dra. Adriana Guerra Gumieri  
UFMG



Profa. Dra. Júnia Nunes de Paula  
CEFET/MG

### **Para a vida**

“Enquanto a história relaciona a intervenção de fadas, referindo-se aos gênios tutelares, aos palácios ocultos e às maravilhas da floresta desconhecida, as crianças escutam atentas, estampando alegria e interesse no semblante feliz.

Todavia, quando o narrador modifica a palavra, fixando-a nas realidades educativas, retrai-se à mente infantil, contrafeita, cansada... Não compreende a promessa da vida futura, com os seus trabalhos e responsabilidades.

Os corações, ainda tenros, amam o sonho, aguardam heroísmo fácil, estimam o menor esforço, não entendem, de pronto, o labor divino da perfeição eterna e, por isso, afastam-se do ensinamento real, admirados, espantadiços. A vida, porém, espera-os com as suas leis imutáveis e revela-lhes a verdade, gradativamente, sem ruídos espetaculares, com serenidade de mãe...”

Do espírito Emmanuel, extraído do prefácio do livro *Missionários da Luz*, psicografado por Francisco Cândido Xavier e ditado pelo espírito André Luiz.

Livro lido pelo autor, no período de realização deste trabalho.

### **A importância do concreto**

“O material mais largamente usado em construção é o concreto, normalmente feito com a mistura de cimento Portland com areia, pedra e água. No ano passado, nos Estados Unidos, 63 milhões de toneladas de cimento Portland foram convertidas em 500 milhões de toneladas de concreto, cinco vezes o consumo de aço, em massa. Em muitos países, o consumo de concreto é 10 vezes maior do que o de aço. O consumo mundial total de concreto, no ano passado, foi estimado em três bilhões de toneladas, ou seja, uma tonelada por ser humano vivo. O homem não consome nenhum outro material em tal quantidade, a não ser a água”. (Brunauer e Copeland, 1964).

Hoje, o volume de utilização do concreto é muito maior do que foi há 40 anos. Estima-se que o consumo atual de concreto no mundo seja da ordem de 11 bilhões de toneladas por ano. (Mehta e Monteiro, 2014)

À Rivi pelo incentivo, pelo  
companheirismo, pelo  
carinho, pelo amor e pela  
minha evolução como  
homem.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha amada esposa Riviane pelo amor incondicional e por sua dedicação a mim, mesmo com tantos afazeres e trabalhos, inclusive seu doutorado. Sem você eu não teria começado este trabalho e muito menos terminado.

Aos meus pais, Jair e Regina, pela amorosidade, pelo carinho e por me apoiarem sempre, mesmo em momentos que parecem improváveis. Aos meus irmãos Cristiano e Lucas por representarem para mim o sentido de partilha, de saber dividir para que todos possam ter e participar.

Ao meu orientador Calixto por ser o grande professor que é. Orientador de verdade, que instrui, ensina e quase escreve junto do aluno. Aprendi muito contigo, querido professor. E você quase sempre tem a razão. Impressionante!

Ao meu co-orientador Luiz Orlando Ladeira pela genialidade de tantas invenções e patentes e por ser a mola propulsora do CTNano.

Aos professores componentes das bancas de defesa da qualificação e da dissertação a minha admiração e apreço pelas correções que se fizeram necessárias: professor White José dos Santos, professora Adriana Guerra Gumieri e professora Júnia Nunes de Paula.

À CAPES pela cessão de bolsa que muito me ajudou durante todo o período do curso de mestrado.

Ao meu grande amigo Wiliam Faria, secretário do Programa de Pós-Graduação em Construção Civil do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da UFMG, que muito me ajudou e me incentivou durante toda a trajetória no departamento.



À professora Maria Teresa Paulino Aguilhar por ser esta fortaleza e se importar tanto com os caminhos da ciência, incentivando seus alunos na seara da pesquisa com viés acadêmico.

À professora Glaura e ao professor Marcos Pimenta por me aceitarem a viver e aprender no CTNano pelos anos de 2017, 2018 e parte de 2019.

Ao amigo Tarcizo pelas dicas valiosas ao longo de toda a caminhada, pelo incentivo no início, no meio e no fim e por acreditar que eu conseguiria finalizar a dissertação e fazer um bom trabalho, ajudando o CTNano.

Ao pessoal do CTNano que representou para mim uma segunda família enquanto estive cursando o mestrado e dissertando. Não citarei nomes aqui para que eu não me furte, e assim, me esqueça de alguém. Vocês são demais!

Companheiros especiais, Carlos e Raquel, por serem quem são e assim carregarem a alegria do CTNano em suas risadas. Gosto muito de vocês!

Aos IC's Victor, Eliana, Guilherme, Marcus, Danilo, Carlos Henrique e Vinícius que tanto se esforçaram para ver este trabalho completado: a engenharia vos espera ansiosamente para desbravarem o globo.

Ao companheiros de mestrado Paloma, Alice, Lucas e Laís por me emprestarem um pouco de seu conhecimento nesta minha trilha pelo mestrado.

Aos companheiros da InterCement que são parceiros do CTNano em vasto projeto de síntese de NTC em matrizes cimentícias, em especial aos engenheiros Seiiti Suzuki, Anderson Yokoyama e Rogério Falco e aos técnicos e irmãos Jorge e Valdenir Ribeiro por me ciceronearem e me guiarem nos ensaios em Praia Grande. Também não poderia me esquecer do Carlos José Massucato, da Mariana Menezes e da Janaína Morais, que tanto se esforçaram com informações e preparo técnico para que este estudo saísse do papel.

Ao Ricardo “Mr. M”, do Laboratório de Tecnologia de Rochas do Departamento de Engenharia de Minas, por me ajudar nos cortes de CP’s para os ensaios de absorção.

Ao pessoal do Centro de Microscopia da UFMG pelas imagens feitas pelo MEV.  
Ao Thiago Abdala pelas dicas acerca de ensaios em concreto endurecido.

Aos amigos do CEDE que me ajudaram na pavimentação deste meu caminho, num dos momentos mais difíceis de minha vida até o presente momento. Em especial às amáveis Elza e Ivanilda pelas doces palavras para os amargos momentos, à Akemi pela determinação e esforço em carregar a Casa Espírita nos ombros, ao querido Messias pelo incentivo, entendimento e apoio no início de toda esta história do mestrado, ao Júnior, pelos vultosos ensinamentos das noites das segundas-feiras e ao Brunão por ser um grande amigo espírita e engenheiro metuculoso que encontrei na seara terrena e que iniciou comigo este percurso.

## RESUMO

Em função das melhorias das propriedades de pastas e argamassas produzidas com nanotubos de carbono (NTC) sintetizados diretamente sobre o clínquer, este trabalho apresenta o estudo do efeito dos NTC em concretos. Foram avaliados a trabalhabilidade, as resistências mecânicas à compressão, à tração por compressão diametral, o módulo de elasticidade e a absorção de água por capilaridade e por imersão de concretos preparados com clínquer nanoestruturado. Como comparação, foram produzidos dois tipos de concretos, sendo um convencional e outro autoadensável, com 0,15 e 0,30 % de massa de NTC em relação à massa de cimento CP-V ARI, bem como concretos de referência, sem NTC. O concreto convencional foi produzido com relação água/cimento de 0,60. Já o concreto autoadensável foi confeccionado com relação água/cimento de 0,45. Os resultados mostram que a incorporação de NTC no clínquer nanoestruturado não afetou a trabalhabilidade de ambos os concretos. Por outro lado, reduziu a absorção de água por capilaridade e promoveu aumento da resistência à tração por compressão diametral e do módulo de elasticidade no concreto autoadensável.

**Palavras-Chave:** concreto, clínquer, nanotubos de carbono, trabalhabilidade, resistências mecânicas, absorção de água.

## **ABSTRACT**

Based on the improved behavior of Portland cement pastes and mortars produced with carbon nanotubes (CNT) grown directly on the clinker, this work presents a study of the effect of the CNTs in concretes. The investigated properties were the workability, compressive and splitting tensile strength, modulus of elasticity and water absorption of concretes produced with nanostructured clinker. For comparison, a conventional and a self-compacting concrete were investigated with 0.15 and 0.30 % of CNTs with respect to cement content. Reference concretes without CNTs were also produced with Brazilian CP-V type cement. The conventional concrete had a water/cement ratio of 0.60 while for the self-compacting concrete this ratio was set to 0.45. The results showed that the incorporation of the CNTs in both contents did not affect concrete workability. On the other hand, the presence of CNTs reduced water absorption and increased splitting tensile strength and the modulus of elasticity of the self-compacting concrete.

**Keywords:** concrete, carbon nanotubes, workability, mechanical strength, water absorption.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Formação de NTC: (a) folha de grafeno; (b) e (c) folha de grafeno se enrolando; (d) nanotubo formado.....	8
Figura 3.2 – Diferentes formações de paredes de NTC.....	8
Figura 3.3 – Representação esquemática da estrutura de NTC: (a) NTC de parede simples; (b) NTC de paredes múltiplas. ....	8
Figura 3.4 – “Efeito de costura” de fissuras vista em compósitos cimentícios com NTC.....	11
Figura 3.5 – Resultados de resistência à compressão de concretos de Lu <i>et al.</i> (2016).....	22
Figura 3.6 – Resultados de resistência à tração na flexão de concretos de Lu <i>et al.</i> (2016).....	23
Figura 3.7 – Componentes do MEV.....	28
Figura 3.8 – Observações via MEV de efeitos diversos de NTC em traços de concreto com relação água/cimento a 0,55 de Carriço <i>et al.</i> (2018): a) 0,05 % de NTCPL; b)0,05 % de NTCCOOH; c) e d) 0,1 % de NTCSS.....	29
Figura 3.9 – Observações via MEV de NTC em traços de UHSC de Lu <i>et al.</i> (2016): a) NTC destacado em meio aos produtos de hidratação; b) NTC destacado com 70 nm de diâmetro; c) efeito de costura provocado por NTC e d) ampliação da área (c). ....	30
Figura 4.1 – Análise termogravimétrica do lote CNT00418.....	33
Figura 4.2 – Imagens de MEV (A) e de MET (B) do lote CNT00418.....	34
Figura 4.3 – Histograma dos diâmetros dos NTC e NFC produzidos sobre o clínquer do lote CNT00418. ....	34
Figura 4.4 – Curva de defloculação do aditivo MIRA 481. ....	41
Figura 4.5 – Curva de defloculação do aditivo ADVA 518. ....	42
Figura 4.6 – Curvas da composição granulométrica do agregado miúdo do concreto convencional. ....	44
Figura 4.7 – Curvas da composição granulométrica do agregado graúdo do concreto convencional. ....	46
Figura 4.8 – Curvas da composição granulométrica do agregado miúdo do concreto autoadensável.....	48

Figura 4.9 – Curvas da composição granulométrica da brita 0, único agregado graúdo do concreto autoadensável. ....	49
Figura 4.10 – Imagens de etapas do processo de preparo dos concretos: a) separação dos materiais; b) preparação dos CP's; c) aditivo MIRA 481; d) mistura. ....	52
Figura 4.11 – Ensaio de abatimento do tronco de cone (slump test) no concreto convencional. ....	54
Figura 4.12 – Ensaio de determinação do espalhamento (slump flow test) no concreto autoadensável. ....	55
Figura 4.13 – Ensaio de teor de ar incorporado pelo método pressométrico nos dois tipos de concreto estudados: convencional e autoadensável. ....	57
Figura 4.14 – Moldagem dos corpos de prova de concreto. ....	58
Figura 4.15 – Máquina de ensaios utilizada para ensaio de resistências mecânicas. ....	60
Figura 4.16 – Realização de retificação de corpo de prova de concreto. ....	61
Figura 4.17 – Aparato para ensaio de resistência à tração por compressão diametral. ....	62
Figura 4.18 – Ensaio de resistência à tração por compressão diametral. ....	62
Figura 4.19 – Compressômetro de bases dependentes utilizado no ensaio de módulo de elasticidade. ....	64
Figura 4.20 – Execução de ensaio de módulo de elasticidade. ....	64
Figura 4.21 – Esquema do ensaio de absorção de água por capilaridade. ....	67
Figura 4.22 – Execução de ensaio de absorção de água por capilaridade. ....	67
Figura 4.23 – Etapa de fervura dos corpos de prova para o ensaio de imersão. ...	69
Figura 4.24 – MEV modelo FEG - Quanta 200 FEI do Centro de Microscopia da UFMG. ....	70
Figura 5.1 – Resultados de slump test do concreto convencional. ....	71
Figura 5.2 – Resultados do slump flow test do concreto autoadensável. ....	73
Figura 5.3 – Resultados do teor de ar incorporado do concreto convencional. ....	74
Figura 5.4 – Resultados do teor de ar incorporado do concreto autoadensável. ...	74
Figura 5.5 – Resultados de resistência à compressão do concreto convencional por idade. ....	76
Figura 5.6 – Resultados de resistência à compressão do concreto autoadensável por idade. ....	78

Figura 5.7 – Resultados de resistência à tração por compressão diametral do concreto convencional por idade.....	79
Figura 5.8 – Resultados de resistência à tração por compressão diametral do concreto autoadensável por idade. ....	81
Figura 5.9 – Corpos de prova de concreto convencional rompidos em ensaio de resistência à tração por compressão diametral na idade de 3 dias.....	83
Figura 5.10 – Resultados de módulo de elasticidade do concreto convencional por idade. ....	84
Figura 5.11 – Resultados de módulo de elasticidade do concreto autoadensável por idade. ....	86
Figura 5.12 – Valor médio de absorção de água por capilaridade por intervalo de tempo do concreto convencional.....	89
Figura 5.13 – Valor médio de absorção de água por capilaridade por intervalo de tempo do concreto autoadensável. ....	90
Figura 5.14 – Valor médio de absorção de água por imersão por intervalo de tempo do concreto convencional.....	92
Figura 5.15 – Valor médio da absorção de água por imersão por intervalo de tempo do concreto autoadensável. ....	93
Figura 5.16 – Imagens de MEV do traço de referência do concreto convencional (CCREF): a) amostra rompida à compressão e, b) ampliação da área 1. ....	95
Figura 5.17 – Imagens de MEV do traço com 0,15 % de NTC do concreto convencional (CCNTC015): a) amostra rompida à compressão; b) ampliação da área 1.....	95
Figura 5.18 – Imagens de MEV do traço com 0,30 % de NTC do concreto convencional (CCNTC030): a) amostra rompida à compressão; b) ampliação da área 1.....	96
Figura 5.19 – Imagens de MEV do traço de referência do concreto autoadensável (CAAREF): a) amostra rompida à compressão; b) ampliação da área 1. ....	96
Figura 5.20 – Imagens de MEV do traço com 0,15 % de NTC do concreto autoadensável (CAANTC015): a) ancoragem por NTC; b) efeito de costura promovido por NTC.....	97
Figura 5.21 – Imagens de MEV do traço com 0,30 % de NTC do concreto autoadensável (CAANTC030): a) amostra rompida à compressão; b) ampliação da área 1.....	97

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Comparativo de propriedades mecânicas de alguns materiais. ....	10
Tabela 3.2 – Propriedades dos NTC utilizados por Carriço <i>et al.</i> (2018). ....	18
Tabela 3.3 – Materiais constituintes de concretos produzidos por Carriço <i>et al.</i> (2018). ....	18
Tabela 3.4 – Resultados de slump test e de teor de ar incorporado de concretos produzidos por Carriço <i>et al.</i> (2018). ....	19
Tabela 3.5 – Resistências à compressão encontradas por Marcondes (2012). ....	21
Tabela 3.6 – Resistências à tração por compressão diametral encontradas por Marcondes (2012). ....	21
Tabela 3.7 – Materiais utilizados em concretos estudados por Lu <i>et al.</i> (2016). ....	22
Tabela 3.8 – Materiais constituintes de concretos de Marcondes <i>et al.</i> (2015). ....	25
Tabela 4.1 – Características do clínquer nanoestruturado. ....	33
Tabela 4.2 – Características físicas do cimento CP-V ARI. ....	35
Tabela 4.3 – Características químicas do cimento CP-V ARI. ....	36
Tabela 4.4 – Características da areia natural fina e da areia artificial. ....	37
Tabela 4.5 – Distribuição granulométrica da areia natural fina. ....	37
Tabela 4.6 – Distribuição granulométrica da areia artificial. ....	37
Tabela 4.7 – Características das britas 0 e 1. ....	38
Tabela 4.8 – Distribuição granulométrica da brita 0. ....	38
Tabela 4.9 – Distribuição granulométrica da brita 1. ....	39
Tabela 4.10 – Aditivos utilizados na pesquisa. ....	40
Tabela 4.11 – Proporções dos materiais constituintes do traço convencional. ....	43
Tabela 4.12 – Composição do agregado miúdo para o concreto convencional. ....	44
Tabela 4.13 – Composição do agregado graúdo para o concreto convencional. ....	45
Tabela 4.14 – Proporções dos materiais constituintes do traço autoadensável. ....	47
Tabela 4.15 – Composição do agregado miúdo para o concreto autoadensável. ....	47
Tabela 4.16 – Quantidades de corpos de prova por idade dos dois tipos de concretos propostos: convencional e autoadensável. ....	58
Tabela 5.1 – Resumo de resistência à compressão do concreto convencional por idade. ....	75
Tabela 5.2 – Resumo de teste t-Student para resistência à compressão do concreto convencional por idade. ....	76



Tabela 5.3 – Resumo de resistência à compressão do concreto autoadensável por idade. ....	77
Tabela 5.4 – Resumo de teste t-Student para resistência à compressão do concreto autoadensável por idade. ....	78
Tabela 5.5 – Resumo de resistência à tração por compressão diametral do concreto convencional por idade.....	79
Tabela 5.6 – Resumo de teste t-Student para resistência à tração por compressão diametral do concreto convencional por idade. ....	80
Tabela 5.7 – Resumo de resistência à tração por compressão diametral do concreto autoadensável por idade. ....	81
Tabela 5.8 – Resumo de teste t-Student para resistência à tração por compressão diametral do concreto autoadensável por idade.....	82
Tabela 5.9 – Resumo de módulo de elasticidade do concreto convencional por idade. ....	84
Tabela 5.10 – Resumo de teste t-Student para módulo de elasticidade do concreto convencional por idade. ....	85
Tabela 5.11 – Resumo de módulo de elasticidade do concreto autoadensável por idade. ....	86
Tabela 5.12 – Resumo de teste t-Student para módulo de elasticidade do concreto autoadensável por idade. ....	86
Tabela 5.13 – Valor médio da absorção de água por capilaridade por intervalo de tempo do concreto convencional.....	88
Tabela 5.14 – Valor médio da absorção de água por capilaridade por intervalo de tempo do concreto autoadensável. ....	89
Tabela 5.15 – Valor médio da absorção de água por imersão por intervalo de tempo do concreto convencional.....	92
Tabela 5.16 – Valor médio da absorção de água por imersão por intervalo de tempo do concreto autoadensável. ....	93

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
a/c	Relação água/cimento
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
ASCE	<i>American Society of Civil Engineers</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CP	Corpo de prova
CP-V ARI	Cimento Portland do tipo V – Alta Resistência Inicial
CTNano	Centro de Tecnologia em Nanomateriais e Grafeno
CVD	<i>Chemical Vapor Deposition</i>
EI	Equivalente alcalino
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Portugal)
MET	Microscopia eletrônica de transmissão
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
NBR	Norma Brasileira Registrada
NM	Norma Mercosul
NFC	Nanofibras de carbono
NTC	Nanotubos de carbono
NTCPM	Nanotubos de carbono de paredes múltiplas
NTCPS	Nanotubos de carbono de paredes simples
PF	Perda ao fogo
RI	Resíduo insolúvel
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UHSC	<i>Ultra High Strength Concrete</i>
ZTI	Zona de transição intersticial

## LISTA DE SÍMBOLOS

~	Aproximadamente
%	Porcentagem ou por cento
U\$	Dólar norte-americano
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de alumínio
-COOH	Carboxila (radical)
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono (gás carbônico)
C <sub>3</sub> A	Aluminato tricálcico
C <sub>2</sub> S – 2CaO.SiO <sub>2</sub>	Silicato dicálcico
C <sub>3</sub> S	Silicato tricálcico
CaO	Óxido de cálcio
CaCO <sub>3</sub>	Carbonato de cálcio
C-S-H – xCaO.SiO <sub>2</sub> .yH <sub>2</sub> O	Silicato de cálcio hidratado
C <sub>4</sub> AF – 4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ferroaluminato tetracálcico
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de ferro
K <sub>2</sub> O	Óxido de potássio
MgO	Óxido de magnésio
Na <sub>2</sub> O	Óxido de sódio
-OH	Hidroxila (radical)
PVP	Polivinilpirrolidona
SO <sub>3</sub>	Trióxido de enxofre
SiO <sub>2</sub>	Sílica
TiO <sub>2</sub>	Dióxido de titânio
$\pi$	Letra grega <i>pi</i> - relação direta entre perímetro e diâmetro de uma circunferência
$\sigma$	Letra grega <i>sigma</i> - tensão
$\varepsilon$	Letra grega <i>epsilon</i> - deformação

**LISTA DE UNIDADES**

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

**SUMÁRIO**

<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>viii</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>xi</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xii</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>xiii</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>xvi</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....</b>	<b>xviii</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS.....</b>	<b>xix</b>
<b>LISTA DE UNIDADES .....</b>	<b>xx</b>
<b>SUMÁRIO .....</b>	<b>xxi</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 Considerações iniciais .....	1
1.2 Justificativa .....	4
<b>2. OBJETIVO.....</b>	<b>5</b>
2.1 Objetivo geral.....	5
2.2 Objetivos específicos.....	5
2.3 Estrutura da Dissertação .....	6
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>7</b>
3.1 Nanotubos de Carbono (NTC).....	7
3.2 Emprego de nanotubos de carbono (NTC) em matrizes cimentícias.....	10
3.2.1 Trabalhabilidade do concreto com nanotubos de carbono (NTC) .....	15
3.2.2 Resistências mecânicas do concreto com nanotubos de carbono (NTC).....	19
3.2.3 Absorção de água do concreto com nanotubos de carbono (NTC) .....	24

3.2.4	Caracterização da microestrutura do concreto com NTC via MEV .....	27
3.3	Considerações finais sobre a revisão bibliográfica .....	30
<b>4.</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>32</b>
4.1	Materiais envolvidos na pesquisa .....	32
4.1.1	Clínquer de cimento Portland e clínquer nanoestruturado .....	32
4.1.2	Cimento Portland.....	35
4.1.3	Agregados miúdos .....	36
4.1.4	Agregados graúdos.....	38
4.1.5	Aditivos.....	39
4.2	Descrição dos traços desenvolvidos.....	42
4.2.1	Concreto convencional.....	43
4.2.2	Concreto autoadensável .....	46
4.3	Produção dos concretos .....	49
4.4	Ensaio de caracterização dos concretos no estado fresco .....	53
4.4.1	Ensaio do abatimento do tronco de cone (slump test) .....	53
4.4.2	Ensaio de espalhamento (slump flow test).....	54
4.4.3	Ensaio do teor de ar incorporado pelo método pressométrico .....	55
4.5	Moldagem dos corpos de prova.....	57
4.6	Ensaio de caracterização dos concretos no estado endurecido .....	59
4.6.1	Resistência à compressão .....	60
4.6.2	Resistência à tração por compressão diametral .....	61
4.6.3	Módulo de elasticidade.....	63
4.6.4	Determinação da absorção de água por capilaridade .....	66
4.6.5	Determinação da absorção de água por imersão.....	68
4.7	Avaliação da microestrutura dos concretos .....	69

<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>71</b>
5.1 Resultados e análises de ensaios realizados no estado fresco.....	71
5.1.1 Ensaio do abatimento do tronco de cone (slump test) .....	71
5.1.2 Ensaio de espalhamento (slump flow test).....	72
5.1.3 Ensaio do teor de ar incorporado pelo método pressométrico .....	73
5.2 Resultados e análises de ensaios realizados no estado endurecido.....	74
5.2.1 Resistência mecânica à compressão.....	75
5.2.2 Resistência mecânica à tração por compressão diametral .....	78
5.2.3 Módulo de elasticidade.....	83
5.2.4 Determinação da absorção de água por capilaridade .....	88
5.2.5 Determinação da absorção de água por imersão.....	91
5.2.6 Avaliação da microestrutura dos concretos.....	94
<b>6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>98</b>
<b>7. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>104</b>
<b>8. APÊNDICES.....</b>	<b>115</b>
A. Resistências Mecânicas do Concreto Convencional – $a/c = 0,60$ .....	115
B. Resistências Mecânicas do Concreto Autoadensável – $a/c = 0,45$ .....	119
C. Análise estatística dos resultados de resistência à compressão .....	123
D. Análise estatística dos resultados de resistência à tração por compressão diametral .....	126
E. Análise estatística dos resultados de módulo de elasticidade .....	129

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Considerações iniciais

O envelhecimento das estruturas de concreto armado em todo o mundo tem preocupado cada vez mais as autoridades responsáveis pela segurança e conservação destas construções. Gastos elevados em manutenções de pontes, viadutos, barragens e edificações estão sempre na pauta do dia dos governantes e dos órgãos que zelam por infraestruturas em seus países.

Fávero (2016) afirmou que diversas estruturas de concreto armado estão constantemente apresentando uma série de problemas de durabilidade associadas principalmente à corrosão, à presença de umidade, ataque por íons cloreto, por sulfatos, reação álcali-agregado, dentre outros mais.

Dados do Departamento de Transportes Norte-Americano, apresentados pela *American Society of Civil Engineers - ASCE* (2017), mostram que, em 2016, nos Estados Unidos haviam 614.387 pontes rodoviárias catalogadas. Deste montante, quase 40 % tinham 50 anos de idade, ou até mais. Naquele ano, 9,1 % destas pontes foram consideradas estruturalmente deficientes e apenas por elas passaram, em média, 188 milhões de veículos por dia. Apesar do percentual destes elementos em condições de risco estrutural estar diminuindo anualmente (em 2006 era de 12,3 %) devido ao aumento do cuidado que as autoridades tem tomado, sua idade média não para de crescer e muitas destas estruturas caminham para seu horizonte de vida útil de projeto. As estimativas mais recentes dão conta de que a melhoria apenas destas estruturas custaria cerca de U\$123 bilhões aos cofres públicos estadunidenses.

Ainda de acordo com a ASCE (2017), citando dados da Associação dos Funcionários Públicos de Segurança em Barragens dos Estados Unidos, estima-se que atualmente seria necessário se gastar mais de U\$64 bilhões para se reparar o montante mais crítico de cerca de 15.500 das 95.580 barragens daquele país. A idade média destas estruturas já chegava aos 56 anos em 2016 e a expectativa é de que 70 % delas tenham pelo menos 50 anos de idade em 2025.



Pela extensa forma de utilizações deste composto cerâmico no mundo, milhões de estruturas de concreto armado enfrentam diariamente condições climáticas adversas, poluição e outros ataques químicos que penetram seu interior e provocam danos nas barras de aço contidas nestas peças que custarão altos valores para serem reparadas como aqueles apresentados pela ASCE em seus anuários.

O concreto, segundo Tyson (2010), é o segundo material mais empregado na Terra (atrás apenas da água) e o mais empregado material na indústria da construção civil. Porém, completa este pesquisador, este material é de ruptura frágil e é caracterizado por apresentar resistência à tração muito baixa.

É neste ponto que se deve atentar para novos materiais que vêm sendo pesquisados, mas que possuem dimensões bem pequenas. Segundo Tonder e Mafokoane (2014), a nanotecnologia é um campo emergente da ciência e da engenharia. É uma nova alternativa de reengenharia de *design* de concreto e que oferece extraordinários benefícios ambientais. Estes autores citam ainda que a nanotecnologia promete melhorias significativas nas resistências do concreto, algo que é crítico nas construções. Os nanomateriais melhoram a capacidade de interação de partículas e a durabilidade do concreto.

Produto que tem chamado a atenção de diversos estudiosos há quase 30 anos são os nanotubos de carbono (NTC). Estes alótropos do elemento químico carbono têm sido estudados para aplicações múltiplas em diversas áreas do conhecimento e em diferentes materiais. Com as matrizes cimentícias acontece da mesma forma e um composto que muito pode se beneficiar disto é o concreto, se tornando mais resistente, menos poroso e mais durável. Para Sanchez e Sobolev (2010), os avanços na caracterização da estrutura nanométrica de materiais à base de cimento e na computação proporcionaram aos cientistas e engenheiros novas e promissoras ferramentas para melhor compreender a engenharia da estrutura do concreto e melhorar o seu desempenho mecânico e a sua durabilidade.

Entretanto, existem muitas questões para serem resolvidas, tais como dispersão dos NTC na matriz cimentícia e sua fabricação e distribuição em larga escala para o mercado consumidor. Apesar de não serem diretamente abordados neste estudo, são aspectos relevantes e que devem ser sempre citados como possíveis gargalos para sua implantação em nível industrial.

Neste contexto, a proposta desta pesquisa é de apresentar os resultados dos testes de trabalhabilidade, de resistências mecânicas à compressão, à tração por compressão diametral, de módulo de elasticidade e de absorção de água em concretos produzidos com clínquer nanoestruturado, produto este que demonstra uma diversificação das formas de dispersão dos NTC na matriz cimentícia.

Porém, é por trás dos reais objetivos da pesquisa de análise de trabalhabilidade, de resistências mecânicas e de absorção de água que se alicerça este estudo. A incorporação de NTC em concretos e suas variações serão discutidas e avaliadas, sendo este seu foco principal. Todavia, não se pode deixar de citar todo o conjunto de fatores tais como dispersão, funcionalização, redução de custos para produção em larga escala e comercialização, que foram pensados e que ainda estão em desenvolvimento para fazer um concreto nanoestruturado o mais holístico possível.

Este trabalho é um desdobramento de um criterioso estudo que vem sendo desenvolvido no Centro de Tecnologia em Nanomateriais e Grafeno (CTNano) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) que lida com nanomateriais em diversas matrizes, dentre elas a do cimento. Em trabalhos anteriores como os de Melo (2009), Ludvig (2012), Paula (2014), Souza (2015), Ladeira (2017), Neto (2018), Benedetti (2018) e Soares (2019), abordagens de caracterização em matrizes de cimento como pastas e argamassas com os NTC já foram estudadas e resultados positivos foram encontrados.

## 1.2 Justificativa

Para Khitab *et al.* (2017), um concreto convencional já não comporta as diferentes solicitações de cargas e serviços a que é submetido. Khalid *et al.* (2016) complementam que a produção de concreto com propriedades excepcionais em termos de resistência mecânica e com menor quantidade de cimento é altamente desejada para se conseguir estruturas não só econômicas, mas também ambientalmente mais adequadas, a partir de redução de emissão de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) na atmosfera.

Segundo Khitab *et al.* (2015), a ideia de se utilizar a nanotecnologia como forma de modificação de propriedades na nanoescala não é nova nos materiais de construção. Estes autores destacam que diversos outros autores como Raki *et al.* (2010), Lopez *et al.* (2013) e Ferro *et al.* (2014) comprovaram que as propriedades dos compósitos cimentícios podem ser amplamente modificadas trabalhando-se na nano e na microescala das matrizes destes materiais.

Nos estudos citados por Khitab *et al.* (2017), materiais como a nanosílica, grafeno, nano dióxido de titânio (TiO<sub>2</sub>), nano calcita (CaCO<sub>3</sub>) e NTC foram utilizados misturados ao concreto e mostraram melhorias na durabilidade e nas resistências mecânicas, reduzindo a porosidade e os custos. Elrahman e Hillemeier (2014) e Ulm (2012), com base em seus estudos, mostram que estas adições de nanomateriais não somente provocam um melhor empacotamento de partículas, mas também criam o fenômeno de “efeito de costura”, com consequente aumento da densidade promovido pelas nanoestruturas. Ainda segundo estes autores, as nanopartículas controlam as reações de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e aumentam a durabilidade do concreto.

Desta forma, utilizando-se também da nanotecnologia, esta pesquisa pretende apresentar uma forma alternativa de se produzir concretos mais resistentes e adequados a cada tipo de utilização, utilizando-se, para isso, o clínquer nanoestruturado com NTC, sintetizados diretamente sobre as partículas de clínquer pelo método *Chemical Vapor Deposition* (CVD) em processo contínuo (LADEIRA *et al.*, 2015).

## **2. OBJETIVO**

### **2.1 Objetivo geral**

Nesta pesquisa, objetiva-se analisar experimentalmente as propriedades mecânicas e a durabilidade de concretos convencional e autoadensável produzidos com NTC sintetizados diretamente sobre o clínquer.

### **2.2 Objetivos específicos**

Os objetivos específicos deste estudo são:

- 1) Analisar a trabalhabilidade destes concretos no estado fresco (reologia);
- 2) Analisar as propriedades mecânicas (resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade) de concretos produzidos com clínquer nanoestruturado com diferentes teores de NTC;
- 3) Em termos de durabilidade, determinar a absorção de água por capilaridade e por imersão de concretos produzidos com clínquer nanoestruturado com diferentes teores de NTC;
- 4) Analisar a microestrutura de concretos feitos com clínquer nanoestruturado com diferentes teores de NTC por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV);
- 5) Com base nos resultados acima, realizar uma análise comparativa do desempenho de concretos produzidos com cimento Portland (CP-V ARI) fabricado com NTC, em relação a concretos sem NTC.

### **2.3 Estrutura da Dissertação**

A maneira que este trabalho foi organizado demonstra preocupação com o leitor, inclusive aquele pouco familiarizado com o tema abordado. Sendo assim, foi pensada a mais objetiva forma de apresentação que se segue.

No Capítulo 2 são apresentados os objetivos da pesquisa, divididos em objetivo geral e objetivos específicos.

No Capítulo 3 está contida a revisão bibliográfica, que é iniciada com a apresentação dos NTC, delineando breve histórico e suas principais características. Na sequência, é abordada a utilização dos NTC em matrizes cimentícias, para então serem apresentadas as medidas de desempenho que embasam o título deste trabalho: trabalhabilidade, resistências mecânicas e absorção de água do concreto com NTC.

No Capítulo 4 é apresentado o programa experimental, com o delineamento dos materiais e métodos que foram utilizados no trabalho.

O Capítulo 5 é destinado à apresentação e análise dos resultados de comparativos entre os concretos sem NTC e os concretos produzidos com NTC sintetizados diretamente sobre o clínquer.

Finalmente, o Capítulo 6 foi destinado para as conclusões dos resultados obtidos nesta pesquisa e para as sugestões de trabalhos futuros que abordem o tema.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Nanotubos de Carbono (NTC)

O propósito de estudo da nanotecnologia abrange várias áreas do conhecimento como a física, a química e a biologia (Sanchez e Sobolev, 2010). Ao descortinar o mundo nano nos fins do século XX, o homem abriu enormes possibilidades de melhoria de desempenho de seus materiais e preparou os moldes da ciência do novo milênio.

De acordo com Gleize (2007), o estudo da nanotecnologia explora as propriedades e fenômenos que ocorrem na nanoescala da matéria, que tem como características marcantes as altíssimas superfícies e interfaces, aumentando as superfícies de contato e as reatividades.

Produto advindo da nanotecnologia e que tem apresentado frequentes estudos é o nanotubo de carbono (NTC), que é uma das estruturas possíveis da ligação do átomo de carbono, elemento químico amplamente utilizado através dos tempos, tanto na fabricação de vestuário quanto na de combustíveis (Melo, 2009).

Descobertos por Sumio Iijima, em 1991, nos laboratórios da empresa japonesa *NEC Corporation*®, os NTC são estruturas sintetizadas de carbono, equivalendo a folhas de grafeno enroladas em dimensões nano (a bilionésima parte do metro), compondo cilindros (Figura 3.1) cujos formatos de paredes podem ser quirais, em ziguezague ou do tipo *armchair* (Figura 3.2) e em que o número de paredes pode ser a unidade (nanotubos de carbono de parede simples - NTCPS) ou várias unidades (nanotubos de carbono de parede múltiplas - NTCPM), que deslizam umas sobre as outras (Figura 3.3). Sua área específica pode atingir de 100.000 a 700.000 m<sup>2</sup>/kg e seu diâmetro pode variar de 1 a 5 nm no caso dos NTCPS e de 10 a 100 nm no caso dos NTCPM. Seu comprimento tem tamanho variado, podendo ser de alguns nanômetros a muitos micrômetros e alguns até atingindo a escala dos milímetros (Rashad, 2017).

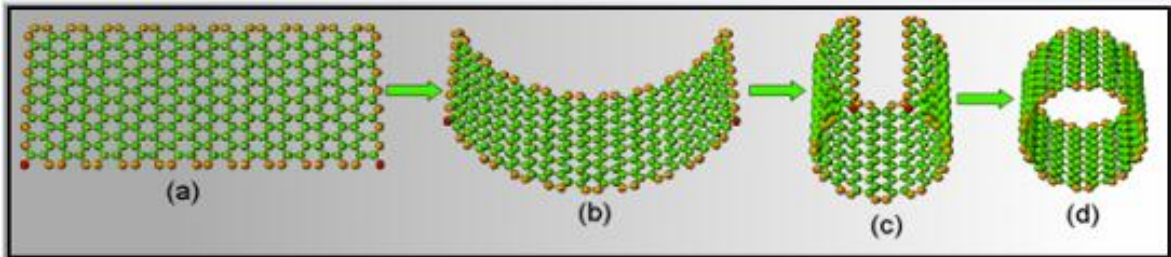


Figura 3.1 – Formação de NTC: (a) folha de grafeno; (b) e (c) folha de grafeno se enrolando; (d) nanotubo formado.

Fonte: Couto (2006)

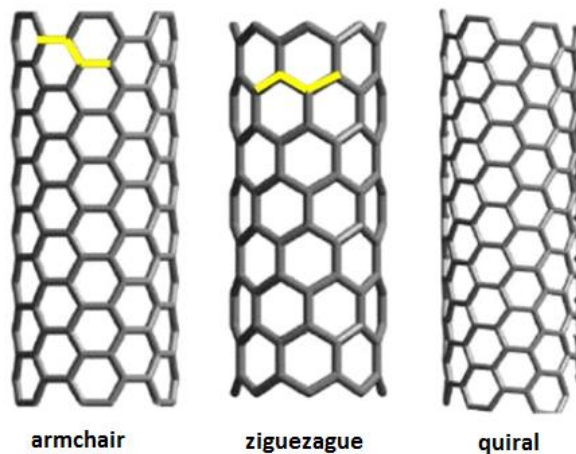


Figura 3.2 – Diferentes formações de paredes de NTC.

Fonte: Adaptado de Rashad (2017)

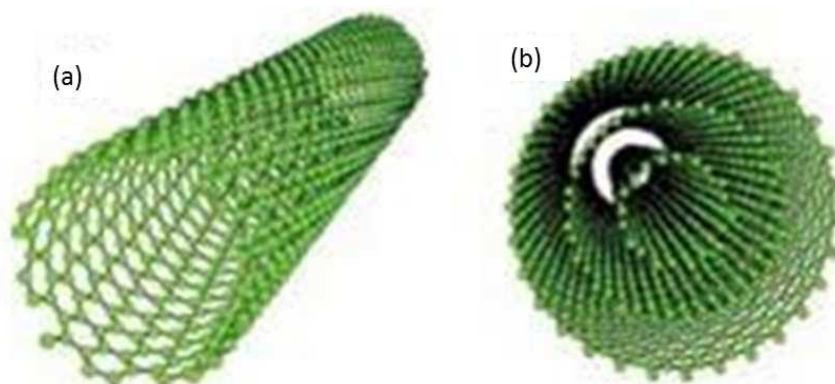


Figura 3.3 – Representação esquemática da estrutura de NTC: (a) NTC de parede simples; (b) NTC de paredes múltiplas.

Fonte: Adaptado de Zarbin (2007)

Segundo Siddique e Metha (2013), o diâmetro mínimo de um NTCPS é de 0,4 nm e o diâmetro médio é de 1,2 nm. Para Wang *et al.* (2000), NTCPS com diâmetros

tão pequenos quanto 0,4 nm foram sintetizados com sucesso. De acordo com Couto (2006) e Bhushan (2007) os diâmetros externos dos NTCPM variam de acordo com as dimensões da partícula catalisadora nos processos de síntese, bem como os métodos de síntese realizados, e que o espaçamento entre as paredes das unidades cilíndricas é de aproximadamente 0,34 nm, que é a mesma distância interlamelar do grafite.

Para se trabalhar com novos materiais, como é o caso dos NTC, é essencial que se busque conhecer suas propriedades para que se entenda com mais segurança suas formas de aplicação e relação com outros materiais já existentes e consolidados no mercado. Segundo Souza (2015), o conhecimento das propriedades físico-químicas de um material ajuda a entender e a compreender os mecanismos de interação de uns com os outros. Com relação aos NTC, este conhecimento precisa ser tal que permita aplicá-los de forma a retirar o máximo de benefícios das propriedades que eles possam oferecer.

É sabido, por exemplo, que os NTC possuem boa condutividade elétrica e térmica que podem ser exploradas, além de poderem atuar como semicondutores, sendo empregados até mesmo como sensores, objeto de estudo de autores diversos, inclusive para uso em estruturas de concreto. Para Avouris (2004), os NTC podem ser considerados como possíveis substitutos para circuitos à base de silício devido às suas características elétricas atraentes. Eles podem ainda ser muito mais resistentes que o aço, mais leve do que o alumínio e mais condutores do que o cobre. Suas aplicações potenciais variam de tecidos ultrafinos, respiráveis e impermeáveis, a monitores de telas planas brilhantes e robustas para televisores e computadores. Este autor, num tom mais otimista vai além, dizendo que os NTC serão, sem dúvida, o grande material do século XXI.

Porém, segundo Mahar *et al.* (2007), não são apenas as propriedades elétricas dos NTC que são interessantes. Os nanotubos também possuem propriedades mecânicas significativas a serem exploradas. Siddique e Mehta (2013) informam que isto se deve às ligações carbono-carbono do tipo  $sp^2$  que são encontradas nos NTC. Para Xie *et al.* (2005), os NTC são materiais resistentes por serem baseados em anéis de grafeno altamente estruturados. Bernholc *et al.* (2002)



ênfatizam que os NTC, além de serem resistentes, são extremamente elásticos, podendo se curvar reversivelmente para ângulos muito grandes.

Gopalakrishnan *et al.* (2011) afirmam que os NTC possuem módulo de elasticidade em torno de 1 TPa, o que significa valor 5 vezes maior do que o do aço e resistência à tração em torno de 63 GPa, o que é aproximadamente 50 vezes maior do que a do aço. O módulo de elasticidade e a resistência à tração dos NTC são 10 e 20 vezes maiores do que os de fibras curtas de carbono, respectivamente.

Para termos de comparação, Melo (2009) apresenta valores relativos às propriedades mecânicas de alguns materiais diferentes e que estão representados na Tabela 3.1.

*Tabela 3.1 – Comparativo de propriedades mecânicas de alguns materiais.*

<b>Material</b>	<b>Módulo de elasticidade (TPa)</b>	<b>Resistência à tração (GPa)</b>	<b>Alongamento até a ruptura (%)</b>
<b>NTCPS</b>	~1 (de 1 a 5)	13-53	16
<b>NTCPM</b>	0,8-0,9	150	-
<b>Aço</b>	0,21 (longitudinal)	1-2	25
<b>Aço inoxidável</b>	~0,2	~0,65-1	15-50

*Fonte: Adaptado de Melo (2009)*

*Para as referências apresentadas, ver fonte de consulta.*

### **3.2 Emprego de nanotubos de carbono (NTC) em matrizes cimentícias**

Segundo Manzur *et al.* (2016), em relação a aplicações, os NTC vêm sendo estudados para serem utilizados em vários materiais, dentre eles as matrizes cimentícias, como é o caso do concreto. Neste caso, os NTC podem atuar, por exemplo, como pontes ou costuras entre poros e fissuras do concreto, levando a uma redução na porosidade e na permeabilidade e, por sua vez, a um aumento de resistências que elevariam assim a vida útil não só da estrutura de concreto, mas de toda a edificação. E por sua utilização ser de grande abrangência, muitas edificações pelo mundo, principalmente as de concreto armado, podem se beneficiar da utilização destes nanomateriais.

Parveen *et al.* (2015) afirmam que o concreto é o material de construção mais utilizado em todo o mundo. Entretanto, sua principal desvantagem é a fragilidade e susceptibilidade à formação e ao crescimento de fissuras que reduzem o seu desempenho e sua durabilidade. Ainda de acordo com estes autores, estão em curso ultimamente, pesquisas que utilizam o conceito de dispersão de nanomateriais no concreto e em outros materiais de construção para deixá-los mais dúcteis e duráveis.

Já Chowdhury *et al.* (2012), afirmam que o “efeito de costura” dos NTC fornece uma transferência de carga eficiente da matriz para os nanotubos dentro dos compósitos, de modo a retardar o crescimento de fissuras de poros ou lacunas de tamanho nano e dificultar a formação de poros ou lacunas de tamanho micro. Ladeira (2017) corrobora com a ideia que os NTC agem como pontes de transferência de tensões, costurando as microfissuras em matrizes de cimento e melhorando a resistência à tração. Este “efeito de costura” das microfissuras pode ser visto na Figura 3.4.

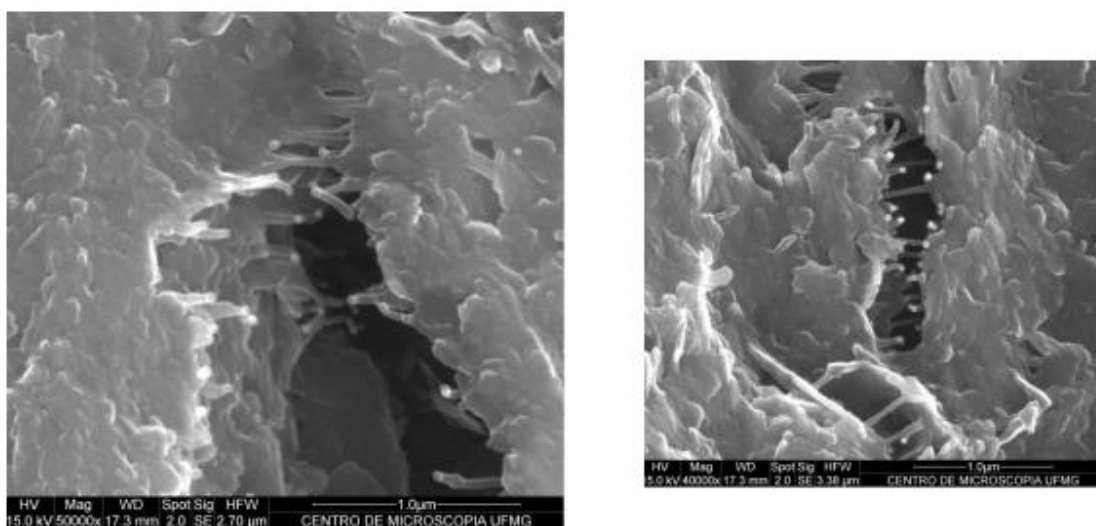


Figura 3.4 – “Efeito de costura” de fissuras vista em compósitos cimentícios com NTC.  
Fonte: Adaptado de Ladeira (2017)

A aplicação de NTC em compósitos de cimento é muito atrativa, partindo-se do pressuposto de que este material é capaz de incorporar melhorias em suas propriedades. Uma alternativa para que este processo seja viável e aplicável na indústria da construção civil foi estudado por Mudimela *et al.* (2009) e Ladeira *et al.* (2009). Nessas pesquisas, os NTC são sintetizados diretamente sobre o clínquer de cimento Portland pelo método CVD.

### *Funcionalização de NTC em matriz cimentícia*

Funcionalização de NTC é o nome dado ao processo que incorpora moléculas específicas às suas superfícies. Em seus trabalhos, Hu *et al.* (2006) e Chae *et al.* (2006) observaram que neste processo são incorporados radicais como as carboxilas (-COOH) ou as hidroxilas (-OH). Estes grupos funcionais favorecem as ligações moleculares. Os NTC funcionalizados mostram aumento da solubilidade em solventes orgânicos, o que implica em uma melhor dispersão durante o processo de mistura.

### *Dispersão de NTC em matriz cimentícia*

Segundo Rashad (2017), a ligação insuficiente dos NTC à matriz cimentícia limita os benefícios de se usar este material. Além disso, os NTC são hidrofóbicos, o que dificulta a dispersão eficiente e, portanto, a distribuição homogênea na matriz cimentícia.

Está na dispersão o desafio mais difícil de lidar em relação à incorporação dos NTC à matriz. A dispersão nada mais é que a homogeneização ou espalhamento por igual dos NTC nos compósitos. Este é um fator preponderante para que os NTC atuem também nos compostos cimentícios, já que os compostos de carbono possuem uma tendência natural de se aglomerarem, podendo afetar, desta forma, sua distribuição equânime por todo o volume de material que se pretende produzir.

De acordo com Parveen *et al.* (2013), os NTC têm uma forte tendência de se aglomerarem devido à presença de forças de van der Waals. Essas forças são originadas de seus sistemas polarizados de elétrons  $\pi$ .

Alguns estudos relataram não haver melhoria nas propriedades da matriz de cimento com adição de NTC devido a uma dispersão ruim ou insuficiente destes nanomateriais. Ibarra *et al.* (2006) relatam que uma distribuição fraca dos pacotes de NTC dentro da matriz cimentícia leva a uma degradação nas propriedades

mecânicas. Konsta-Gdoutos *et al.* (2010) informam que quando a dispersão de NTC é conduzida sem uso de surfactante ou tensoativo, os NTCPM apresentam pouca dispersão na matriz de cimento, e, com isso, grandes aglomerados e feixes destes nanomateriais são observados.

Liew *et al.* (2016) afirmam que, em geral, as tecnologias projetadas para dispersar NTC podem ser divididas em métodos físicos e químicos. Os métodos físicos incluem a sonicação, o moinho de bolas e a agitação mecânica. Já os métodos químicos são introduzidos para adicionar ligações covalentes ou não covalentes para melhorar a molhagem das superfícies dos NTC. Para estes autores existe também um método de crescimento “*in situ*” utilizado para dispersar NTC em compósitos de cimento, misturando-os com o cimento seco e adicionando minerais ou areia para uni-los a estes materiais.

O processo de crescimento “*in situ*” foi estudado e proposto por Ladeira *et al.* (2009), sendo, então, depositado o pedido de patente. Anos mais tarde esta tecnologia foi implantada no CTNano/UFMG, inicialmente em escala laboratorial e depois em nível pré-industrial. Em 2015, a patente norte-americana deste processo foi concedida à Ladeira *et al.* (2015). Os detalhes deste método serão explicitados no item de NTC sintetizados diretamente sobre o clínquer.

Detalhe fundamental a ser citado é a questão de custos, uma vez que, apesar de cada dia mais baratos, os NTC ainda são um produto nobre e, por isso, muito dispendiosos para serem utilizados em larga escala como na construção civil.

Os NTCPM são mais baratos e mais facilmente obtidos que os NTCPs. Segundo Chauhan *et al.* (2012), o grama de NTC pode ser encontrado no mercado por até centenas de dólares. Para Rashad (2017) estes últimos podem atingir facilmente preços entre 50 e 100 vezes o preço do ouro, considerando sua alta qualidade e pureza. Entretanto, estes custos vêm caindo consideravelmente a uma ordem de 50 % ao ano, devido às melhorias dos processos de síntese. Gopalakrishnan *et al.* (2011) citam que o preço da produção de NTC caiu mais de 100 vezes desde 1990 e a expectativa é que estes custos diminuam cada vez mais.

### *NTC sintetizados sobre o clínquer*

O clínquer é um material cimentício que é produzido a partir de uma mistura de argila e calcário, sendo estes calcinados a altas temperaturas e depois moídos. Quando este produto está formado, adicionam-se a ele sulfatos de cálcio e outras adições que o tornam específicos para cada uso. Está assim formado o cimento.

De acordo com Ollivier e Vichot (2014), o clínquer de cimento Portland é um produto obtido pela calcinação a aproximadamente 1.450 °C, em um forno rotativo, de calcário e argila misturados, homogeneizados e finamente moídos através de moinho de bolas, numa proporção aproximada de 80 % e 20 %, respectivamente, formando, então, silicato dicálcico ( $C_2S$ ), aluminato tricálcico ( $C_3A$ ), silicato tricálcico ( $C_3S$ ) e ferroaluminato tetracálcico ( $C_4AF$ ).

Para Isaia (2011), a adição de corretivos químicos advindos da sílica, aluminosa ou ferrífera, tem a função de garantir o quimismo, de forma que dentro de limites específicos formem os compostos hidráulicos e a característica aglomerante do cimento.

Apostando numa proposta inovadora para matrizes cimentícias, Mudimela *et al.* (2009) relataram uma nova abordagem para obter uma boa dispersão de NTC em cimento ao sintetizá-los diretamente sobre partículas de clínquer. Já Nasibulin *et al.* (2013), relataram o crescimento de NTC diretamente no clínquer em processo contínuo, utilizando acetileno como fonte de carbono e o próprio teor de ferro do clínquer como catalisador, proporcionando uma boa dispersão do nanomaterial de carbono na matriz. O material então obtido aumentava em 2 vezes a resistência à compressão da pasta endurecida.

Na mesma época, Ladeira *et al.* (2009) tiveram semelhante ideia e depositaram a patente partindo deste método, chamado CVD. Este processo utilizado para a síntese de NTC se dá pela decomposição ou pirólise de hidrocarbonetos leves (gases do tipo metano, etileno, acetileno, etc.) como agentes precursores de carbono sobre partículas metálicas que catalisam a reação de pirólise.

Ladeira *et al.* (2015) obtiveram, nos Estados Unidos, o registro da patente nomeada “Processo de síntese contínua e em larga escala de nanotubos de carbono sobre o clínquer de cimento e produtos nanoestruturados”. Nesta patente, estes autores descrevem que, baseados no método CVD, o clínquer é utilizado como substrato para síntese de NTC, que já crescem ancorados nas partículas deste composto cimentício, além de permitirem produção em etapa única e contínua e em grande escala. Este modo ainda permite que sejam criadas opções de enriquecimento deste clínquer com metais de transição, normalmente partículas de óxido de ferro, para integrá-lo na indústria de cimento convencional (SOUZA, 2015).

Desta maneira, a síntese de NTC diretamente sobre clínquer pelo método CVD é uma forma elaborada que leva em consideração variados fatores físicos e químicos como funcionalização e dispersão, por exemplo. Além de otimizar o processo de incorporação de NTC em matriz cimentícia, o método é viável economicamente, considerando que ele foi engenhado para ser adaptado para a escala industrial. Neste sentido, o CVD tende a ser um redutor de custos de produção de clínquer com NTC (Ladeira *et al.*, 2009).

Fato adicional, que vai além das melhorias de custos e de produção deste método e toca a questão ambiental, é que os catalisadores metálicos a serem utilizados no processo normalmente são rejeitos advindos da indústria de mineração ou siderúrgica, o que demonstra alinhamento com os princípios do desenvolvimento sustentável.

### *3.2.1 Trabalhabilidade do concreto com nanotubos de carbono (NTC)*

Aspecto de grande importância analisado nesta pesquisa é a trabalhabilidade do concreto. De acordo com o ACI CT-18 (2018) a trabalhabilidade é a propriedade dos concretos frescos, que permite que eles sejam misturados, lançados, adensados e moldados em uma condição homogênea.

Segundo Du e Folliard (2004), a incorporação de ar no concreto é um fator que interfere diretamente na trabalhabilidade e deve ser, portanto, analisada. Estes autores ressaltam que, principalmente para utilizações em locais de clima frio em que pode ocorrer o fenômeno de gelo-degelo, este aspecto deve ser levado em consideração para se evitar danos estruturais ao concreto e consequente aumento de sua resistência e vida útil.

A trabalhabilidade do concreto é também alterada pela diminuição do particulado presente num composto de matriz cimentícia como o concreto, além da influência causada pelos aditivos plastificantes e superplastificantes. De acordo com Roco *et al.* (1999), na mudança das dimensões de um material, passando de tamanho macro para tamanho nano, ocorrem significativas mudanças nas reações químicas e nas propriedades mecânicas. Sobolev *et al.* (2006) completam que com a redução de tamanho, mais átomos ficam localizados nas superfícies das partículas, implicando assim numa significativa mudança na energia de superfície e em sua morfologia. Desta forma, todos esses fatores ajudam a alterar as propriedades básicas e a reatividade química dos nanomateriais e, por conseguinte, sua interação com os demais componentes do concreto.

A seguir são apresentados alguns trabalhos de outros autores sobre concretos com NTC em que se pode verificar certa variabilidade dos resultados em função do modo pelo qual os NTC foram dispersos, das relações água/cimento e dos aditivos utilizados. Isso demonstra a elevada gama de fatores influenciadores nos resultados das pesquisas com concreto.

Marcondes (2012) adicionou fisicamente a proporção de 0,3 % de NTCPM, pela massa de cimento, dispersos em um surfactante iônico que confere dispersão e estabilidade em meio aquoso. Este pesquisador confeccionou 4 traços em seu trabalho, sendo um traço de referência e três traços distintos contendo NTC. A nomenclatura por ele empregada se refere ao REF, como traço de referência sem os nanotubos de carbono; ao AQUA, como o traço preparado com o produto AQUACYL AQ0301 (nome comercial do produto da empresa belga Nanocyl S.A.®) que contém os NTC já dispersos em meio aquoso; ao CD, como ao traço com a inserção dos NTC e aditivo superplastificante (com dispersão prévia em

água e aditivo); e ao SD, ao traço contendo apenas os NTC adicionados em pó (sem a pré-dispersão no aditivo e sem aplicação da sonicação – misturado apenas com hélice misturadora acoplada a uma furadeira).

O traço em peso do concreto de referência de Marcondes (2012) foi de 1: 2,25: 2,75 (cimento: areia natural: brita 1) com relação água/cimento de 0,55. O consumo de cimento por m<sup>3</sup> foi de 352 kg e o teor de aditivo foi de 1 % em relação à massa de cimento. O aditivo utilizado foi o Tec Flow 8000 da empresa Rheoset®, que é constituído por policarboxilatos. As misturas foram realizadas numa betoneira de eixo horizontal de 145 litros.

Este autor reportou que a trabalhabilidade nos traços com NTC, estudada por meio do ensaio de abatimento por tronco de cone, influenciou na reologia do concreto e fez com que o abatimento fosse menor. Este autor concluiu, desta forma, que os NTC devem ser utilizados na presença de aditivos plastificantes ou superplastificantes para evitar o acréscimo desnecessário de água ao concreto.

Nos estudos de Carriço *et al.* (2018), a adição de NTC não causou variações significativas na trabalhabilidade dos concretos produzidos. Estes autores fizeram seus testes utilizando NTCPM de três tipologias diferentes, comprados da empresa Timesnano®: NTC de alta pureza (NTCPL) em pó, NTC carboxi-funcionalizados (NTCCOOH), também em pó, e NTC de alta pureza em suspensão aquosa (NTCSS). Esta água da suspensão aquosa não foi descontada da quantidade de água adicionada ao traço.

Estes pesquisadores adicionaram fisicamente (em pó ou solução aquosa) quantidades de 0,05 a 0,1 % destes NTCPM (diâmetros de 20 nm e até mesmo maiores que 50 nm e comprimentos entre 10 e 30 nm) por peso de cimento. Além disso, um surfactante polianiônico (ácido carboxílico), de nome comercial Dolapix PC67 (–COONa), foi adotado para auxiliar na dispersão dos NTC em pó. As características dos NTC adicionados aos concretos deste trabalho estão contidas na Tabela 3.2.



Tabela 3.2 – Propriedades dos NTC utilizados por Carriço et al. (2018).

Nome	Pureza (% peso)	Diâmetro externo (nm)	Diâmetro interno (nm)	Comprimento ( $\mu\text{m}$ )	Área superficial específica ( $\text{m}^2/\text{g}$ )	COOH (% peso)
<b>NTCPL</b>	> 90	20-40	5-10	10-30	> 80	-
<b>NTCCOOH</b>	> 90	20-40	5-10	10-30	> 80	1,36-1,5
<b>NTCSS</b>	> 90	> 50	5-15	10-20	> 40	-

Fonte: Adaptado de Carriço et al. (2018)

Para as referências apresentadas, ver fonte de consulta.

As relações água/cimento por eles utilizadas em sua pesquisa foram de 0,55, 0,45 e 0,35, o que pode ser notado pela terminação de cada traço. Foi utilizado ainda um aditivo superplastificante à base de policarboxilato e incorporador de ar para os concretos de relações água cimento de 0,45 e 0,35. Da mesma forma, a massa de cimento por  $\text{m}^3$  de concreto sofreu variação entre 380 e 450  $\text{kg}/\text{m}^3$ , fazendo variar todos os materiais dos traços, como mostrado na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Materiais constituintes de concretos produzidos por Carriço et al. (2018).

Traço	a/c	Cimento	Água	Brita 1	Brita 0	Areia grossa	Areia fina	Aditivo SP*	NTC
	-	( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	%
<b>REF55</b>	0,55	380	209	709,5	241,8	453,80	303,0	-	0,05
<b>NTCPL55</b>	0,55	380	209	709,5	241,8	453,80	303,0	-	0,05
<b>NTCCOOH55</b>	0,55	380	209	709,5	241,8	453,80	303,0	-	0,1
<b>NTCSS55</b>	0,55	380	209	709,5	241,8	453,80	303,0	-	-
<b>REF45</b>	0,45	400	180	737,1	249,9	474,4	306,0	2,0	-
<b>NTCPL45</b>	0,45	400	180	737,1	249,9	474,4	306,0	2,0	0,05
<b>REF35</b>	0,35	450	157,5	754,6	251,0	502,9	265,0	4,5	-
<b>NTCPL35</b>	0,35	450	157,5	754,6	251,0	502,9	265,0	4,5	0,05

Fonte: Adaptado de Carriço et al. (2018)

Para as referências apresentadas, ver fonte de consulta.

\*Aditivo SP: Superplastificante

Segundo estes pesquisadores, assim como ocorre com outras fibras, aumentando-se o número de interfaces na massa de concreto, tem-se uma redução natural na trabalhabilidade. Adicionalmente a este fato, a adição de baixos teores de NTC (até 0,1 %), não promove alterações significativas nos valores de *slumps* de concretos. Nesta pesquisa, os *slumps* dos concretos com NTC e relação água/cimento de 0,55 foram 20 % maiores do que no concreto de

referência. A Tabela 3.4 mostra os resultados de *slump test* da pesquisa destes autores, seguido do teor de ar incorporado ao concreto, e que é também uma medida de trabalhabilidade como a utilizada neste trabalho.

*Tabela 3.4 – Resultados de slump test e de teor de ar incorporado de concretos produzidos por Carriço et al. (2018).*

Traço	Slump	Teor de ar incorporado
	mm	%
REF55	125	1,5
NTCPL55	140	1,5
NTCCOOH55	150	1,8
NTCSS55	142	1,5
REF45	135	2,7
NTCPL45	120	2,6
REF35	140	2,5
NTCPL35	140	2,7

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

*Para as referências apresentadas, ver fonte de consulta.*

Como alertaram estes pesquisadores, todos os concretos apresentaram valores dentro da classe S3 da norma portuguesa EN 12350-2, com pequenas variações de até  $\pm 15$  mm entre concretos com e sem NTC. Os autores haviam especificado esta classificação como um de seus objetivos.

Rashad (2017), num estudo amplo de revisão bibliográfica sobre pesquisas envolvendo NTC em compostos cimentícios, revela a carência de investigações mais aprofundadas sobre a reologia no estado fresco (trabalhabilidade) destes compósitos com NTC.

### 3.2.2 Resistências mecânicas do concreto com nanotubos de carbono (NTC)

De acordo com Mehta e Monteiro (2014), as resistências mecânicas são definidas como a capacidade dos materiais resistirem a tensões sem, entretanto, entrarem em colapso. No concreto, não necessariamente consegue-se notar esta ruptura em forma de fissuras como em outros materiais. Este material possui uma característica de apresentar fissuras finas antes mesmo de sofrer carregamento.

Portanto, no concreto, a resistência está relacionada à tensão necessária para causar a ruptura do material, sendo esta definida como a tensão máxima que o material resiste ao receber uma determinada carga. No ensaio de tração, normalmente a peça se rompe. Já na compressão, a amostra sofre rompimento a ponto de não suportar mais cargas, mas o efeito de fissuração pode não ser aparente.

Para Hamzaoui *et al.* (2012), diversos estudos têm sido desenvolvidos a partir da utilização de NTC em matrizes cimentícias e em grande parte deles chama a atenção o comportamento estruturante que estes nanocompostos de carbono promovem, atuando como elemento de costura em microfissuras e microporos e aumentando as resistências mecânicas de todo o conjunto. Segundo Rashad (2017), é possível se notar também que são variadas as formas com que os NTC são dispersos. Se esta dispersão não for feita de maneira adequada, as concentrações de NTC que se formam normalmente interferem de forma negativa também nas resistências.

A seguir, são apresentadas algumas pesquisas em que se pode verificar uma variabilidade de resultados em função do modo pelo qual os NTC foram dispersos, das relações água/cimento e dos aditivos utilizados, por exemplo. Isso demonstra a elevada gama de fatores influenciadores nos resultados das pesquisas com concreto.

Marcondes (2012) obteve ganhos relevantes de resistências à compressão (até 36 %) e à tração por compressão diametral (até 19 %) para traços com adição de 0,3 % de NTC, em relação à massa do cimento, comparados à referência. A relação água/cimento utilizada nesta pesquisa foi de 0,55. A massa de cimento por m<sup>3</sup> de concreto foi de 352 kg e o aditivo adicionado às misturas foi o Tec Flow 8000 da empresa Rheoset®, que é constituído por polímeros de éteres carboxílicos modificados. A Tabela 3.5 mostra as médias e desvios padrão das resistências à compressão e a Tabela 3.6 mostra as médias da tração por compressão diametral encontradas por este pesquisador.

Tabela 3.5 – Resistências à compressão encontradas por Marcondes (2012).

CP's	Resistência à compressão (MPa)			
	Referência	AQUA (NTC)	CD (NTC)	SD (NTC)
<b>Média</b>	25,8	33,25	35,08	30,55
<b>Desvio padrão</b>	1,4	1,33	1,61	1,63

Fonte: Adaptado de Marcondes (2012)

Para as referências apresentadas, ver fonte de consulta.

Tabela 3.6 – Resistências à tração por compressão diametral encontradas por Marcondes (2012).

CP's	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)			
	Referência	AQUA (NTC)	CD (NTC)	SD (NTC)
<b>Média</b>	3,29	3,49	3,92	3,86
<b>Desvio padrão</b>	0,28	0,37	0,26	0,40

Fonte: Adaptado de Marcondes (2012)

Para as referências apresentadas, ver fonte de consulta.

Este autor concluiu sua análise de resistências mecânicas afirmando que a adição de NTC manteve constante ou diminuiu a relação entre as duas resistências.

Lu *et al.* (2016) fizeram a adição de NTCPM (diâmetros entre 20 e 40 nm e comprimentos entre 5 e 1,5  $\mu\text{m}$ ) ao UHSC (*Ultra High Strength Concrete*) em quantidades entre 0 e 0,15 % por peso de cimento, com uma relação água/materiais cimentícios constante de 0,2. Os NTCPM foram dispersos em um moinho de areia na presença de um surfactante (Polivinilpirrolidona – PVP) em meio à água. Foi utilizado cimento Portland do tipo II 42.5R no teor de 420  $\text{kg}/\text{m}^3$ , agregados miúdos (módulo de finura de 2,79) e graúdos (máximo de 20 mm), além de sílica ativa em quantidade de 60  $\text{kg}/\text{m}^3$ , escória de alto forno granulada na proporção de 120  $\text{kg}/\text{m}^3$  e um aditivo superplastificante à base de policarboxilato, para melhorar a trabalhabilidade dos concretos, em todos os cinco traços confeccionados. Estes traços estão representados na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Materiais utilizados em concretos estudados por Lu et al. (2016).

Traço	NTC (%)	Cimento	Sílica	Escória	NTC	Areia	Brita
		Kg/m <sup>3</sup>					
NTC00	0,00	420	60	120	0,00	798	976
NTC03	0,03	420	60	120	0,126	798	976
NTC05	0,05	420	60	120	0,210	798	976
NTC10	0,10	420	60	120	0,420	798	976
NTC15	0,15	420	60	120	0,630	798	976

Fonte: Adaptado de Lu et al. (2016)

Para as referências apresentadas, ver fonte de consulta.

Os resultados de resistência à compressão destes autores mostram que, na proporção de 0,05 % de NTCPM, houve um aumento em relação à referência de 5,7 % e de 4,6 % aos 7 e 28 dias, respectivamente. Na proporção de 0,10 % de NTCPM, houve um aumento em relação à referência de 2,9 % e de 2,1 % aos 7 e 28 dias, respectivamente. Já na proporção de 0,15 % de NTCPM, houve um aumento, em relação à referência, inferior a 1,0 % aos 7 dias e uma diminuição de valores aos 28 dias, como pode ser observado no gráfico da Figura 3.5. Isso demonstra que houve um valor ótimo de adição de NTCPM de 0,05 %, o que, segundo eles, corrobora com valores ótimos encontrados na literatura, que estão entre 0,02 e 0,10 % de adições de NTC.

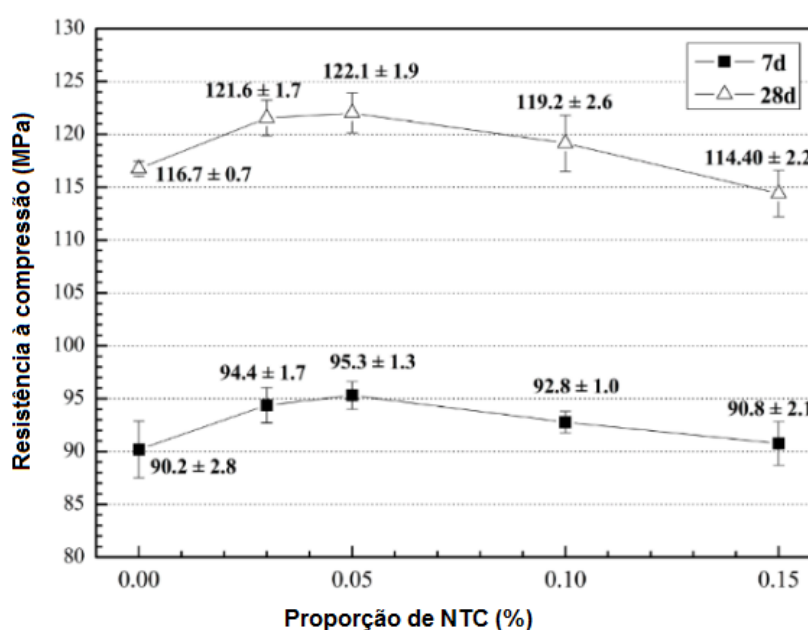


Figura 3.5 – Resultados de resistência à compressão de concretos de Lu et al. (2016).

Fonte: Lu et al. (2016)

Com relação aos resultados de resistência à tração na flexão estes autores relatam que, na proporção de 0,05 e 0,10 % de NTCPM, houve um aumento em relação à referência de 7,6 e 3,3 %, respectivamente. Já no teor de 0,15 % de NTCPM, houve diminuição de valores, como pode ser observado no gráfico da Figura 3.6. Isto demonstra que houve um valor ótimo de adição de NTCPM de 0,05 %, o que, segundo eles, corrobora com valores ótimos encontrados na literatura, que estão entre 0,02 e 0,10 % de adições de NTC. Não foram apresentados os resultados de 28 dias para este ensaio. Adicionalmente, foi relatado que a adição de NTCPM também melhorou a capacidade de deformação do concreto.

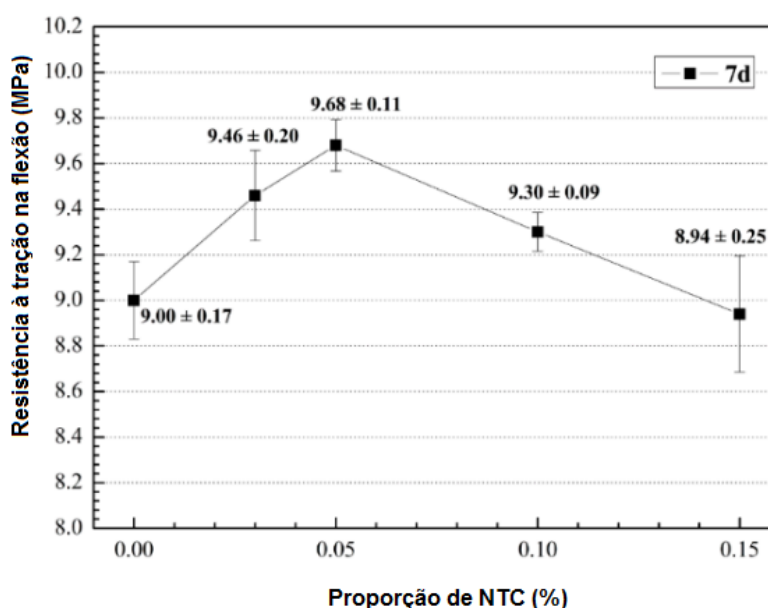


Figura 3.6 – Resultados de resistência à tração na flexão de concretos de Lu et al. (2016).  
Fonte: Lu et al. (2016)

De acordo com Carriço *et al.* (2018), em geral, a adição de NTC aos concretos produzidos, provocou um aumento na resistência à compressão, independentemente da relação água/cimento e do tipo de NTC. Esse aumento pode ser atribuído a efeitos de preenchimento, de nucleação e de ponte fornecidos pelos NTC.

Segundo estes pesquisadores, quando comparado ao concreto de referência, a maior diferença de resistência à compressão aos 28 dias foi obtida para o concreto com 0,1 % de NTCSS, que apresentou 21,1 % de melhoria, seguido pelo

traço com 0,05 % de NTCPL, que apresentou 9,7 % de melhoria e o de 0,05 % de NTCCOOH, que apresentou melhora de 8,6 % comparados à referência. Estas diferenças entre concretos com tipos distintos de NTC foram atribuídas às diferentes razões de aspecto, às formas de dispersão e ao espaçamento entre NTC.

É de se ressaltar ainda, que as diferenças mais robustas entre concretos com e sem NTC estudados por estes autores, ocorreram na maior relação água/cimento, que foi de 0,55, apesar de serem estes os resultados mais baixos entre as três relações água/cimento utilizadas: entre 47,5 e 57,5 MPa. Nas relações água/cimento de 0,35, os concretos apresentaram valores entre 84,9 e 78,3 MPa.

### *3.2.3 Absorção de água do concreto com nanotubos de carbono (NTC)*

A taxa de absorção de água de um concreto por capilaridade é uma boa forma de avaliar a sua durabilidade potencial quando submetido a ambientes agressivos. Quando a taxa de absorção é baixa, significa que os íons agressivos do meio terão dificuldade de penetrar no concreto. Pesquisas experimentais mostram que os valores de absorção de água nos concretos diminuem com a redução da relação água/cimento (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Alves (2008) afirmou que o fluxo de água percolante em um concreto é fortemente influenciado pelos poros capilares da pasta, causados, sobretudo, pela relação água/cimento, pelo nível de hidratação do cimento, pelas características dos agregados, pelo adensamento da massa e pelo método de cura do concreto.

Em suas pesquisas quanto à absorção de água por capilaridade no concreto, Marcondes (2012) afirmou que em todos os traços com NTC houve um aumento de absorção. Segundo este autor, isto pode estar relacionado ao aumento de poros capilares no concreto. Marcondes afirmou ainda que o traço de referência obteve o melhor resultado, o que significa menor absorção de água. Para este pesquisador, entretanto, a presença dos NTC pode ter causado uma melhor distribuição dos poros, transformando os macroporos em microporos, já que no

ensaio de absorção por imersão os resultados indicaram menor penetração de água nas amostras com NTC.

A relação água/cimento utilizada por este autor em toda a sua pesquisa foi de 0,55. A massa de cimento por m<sup>3</sup> de concreto foi de 352 kg e o aditivo adicionado às misturas foi o Tec Flow 8000 da empresa Rheoset®, que é constituído por polímeros de éteres carboxílicos modificados.

Já Marcondes *et al.* (2015), estudaram a influência da dispersão de NTC nas propriedades mecânicas e na absorção de água, adicionando 0,3 % de NTCPM (diâmetro médio de 9,5 nm e comprimento de 1,5 µm) por peso de cimento aos seus dois traços (CD e SD), em comparação ao traço de referência (sem NTC). A nomenclatura empregada para os traços foi de traço CD (traço com NTC + aditivo e dispersão prévia em água através de ultrassom) e traço SD (traço contendo apenas os NTC adicionados em pó, sem a pré-dispersão no aditivo e sem aplicação de energia ultrassônica, misturando os NTC ao cimento utilizando apenas uma hélice misturadora acoplada a uma furadeira).

Para a realização deste estudo, estes autores utilizaram uma relação água/cimento de 0,55, cimento Portland do tipo CP-V ARI no teor de 352 kg/m<sup>3</sup>, areia natural (módulo de finura de 2,92), brita 1 de origem granítica e aditivo superplastificante à base de policarboxilato, empregado para regular a consistência desejada, em todos os três traços confeccionados. Estes traços estão representados na Tabela 3.8.

*Tabela 3.8 – Materiais constituintes de concretos de Marcondes et al. (2015).*

Traço	Cimento	NTC	Areia natural	Brita 1	C	a/c	Aditivo
	(kg)	(g)	(kg)	(kg)	(kg/m <sup>3</sup> )	-	(g)
<b>Traço unitário</b>	1,00	0,30 %	2,25	2,75	-	0,55	1 %
<b>REF</b>	10,90	0,00	24,40	29,80	352	0,55	108,5
<b>CD</b>	10,90	32,55	24,40	29,80	352	0,55	108,5
<b>SD</b>	10,90	32,55	24,40	29,80	352	0,55	108,5

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

*Para as referências apresentadas, ver fonte de consulta.*



Estes pesquisadores afirmaram, com relação ao ensaio de absorção de água por imersão, que obtiveram discretas reduções de 4,4 % para o traço SD e de 3,9 % para o CD. Isso significa que a adição de NTC reduziu a absorção de água.

Segundo Carriço *et al.* (2018), cujos quantitativos de traços estão expressos na Tabela 3.3, a incorporação de NTC pode reduzir a absorção de água por capilaridade de concretos de duas maneiras: por efeitos de *filler* e nucleação, reduzindo a porosidade do concreto, notadamente na zona de transição agregado/pasta; e, por “efeito de costura”, contribuindo para a redução da formação e propagação de macroporos, o que pode aumentar a conectividade dos poros existentes. Estes autores fizeram seus testes de absorção de água por capilaridade baseados na norma portuguesa LNEC E393. Para cada traço foram usados três CP’s cilíndricos de 10 x 15 cm.

Ainda de acordo com estes pesquisadores, a absorção de água por imersão é uma medida de porosidade a que a água tem acesso, isto é, do volume total de poros penetráveis pela água na amostra. Estes pesquisadores fizeram seus testes de absorção de água por imersão pela norma LNEC E394. Para cada traço foram usados três CP’s cilíndricos de 10 x 15 cm.

Os resultados das pesquisas destes autores mostraram que, para a absorção de água por capilaridade, houve redução de 16 % para o traço NTCSS, produzido com 0,1 % de NTC, e de até 7 e 1 % para os traços NTCPL e NTCCOOH, respectivamente, produzidos com 0,05 % de NTC, em relação às referências.

Já para a absorção de água por imersão, os concretos NTCSS apresentaram o melhor desempenho com redução de 12 % da absorção, seguido do concreto NTCPL, que reduziu a absorção em 9 %. Uma redução ligeiramente maior da absorção foi encontrada nos concretos com menor relação água/cimento. Esta modesta redução também foi relatada por outros autores e foi atribuída ao preenchimento com NTC e ao efeito de nucleação após o refinamento dos poros.

### 3.2.4 Caracterização da microestrutura do concreto com NTC via MEV

De acordo com Maliska (2013), numa era de intenso avanço tecnológico, os cientistas sentem cada vez mais a necessidade de observar, analisar e explicar os fenômenos que ocorrem na escala micrométrica ou submicrométrica da matéria. O Microscópio Eletrônico de Varredura se apresenta como aparelho mais adequado para esta tarefa, já que permite alcançar aumentos bem significativos do material analisado. Dependendo do material, o MEV pode atingir até 900.000 vezes de aumento, mas para a análise de materiais, em geral, toma-se um aumento de 10.000 vezes.

Dedavid *et al.* (2007) citam que o MEV utiliza um feixe de elétrons de diâmetro bem pequeno que permite explorar a amostra superficialmente, ponto a ponto, por um conjunto sucessivo de linhas, transmitido o sinal do detector para uma tela catódica em que a varredura é sincronizada perfeitamente com aquela do feixe incidente. Através de um sistema de bobinas de deflexão, o feixe é controlado a fim de se varrer a superfície da amostra segundo uma malha retangular. O sinal de imagem é o resultado da interação do feixe incidente com a superfície da amostra. O sinal que é recolhido pelo detector é utilizado para modulação do brilho do monitor, permitindo assim a observação.

Maliska (2013), diz que o MEV, como pode ser visto na Figura 3.7, consiste basicamente numa coluna optico-eletrônica (canhão de elétrons e sistema de demagnificação ou de redução do diâmetro do feixe), da unidade de varredura, da câmara de amostra, do sistema de detectores e do sistema de visualização da imagem.

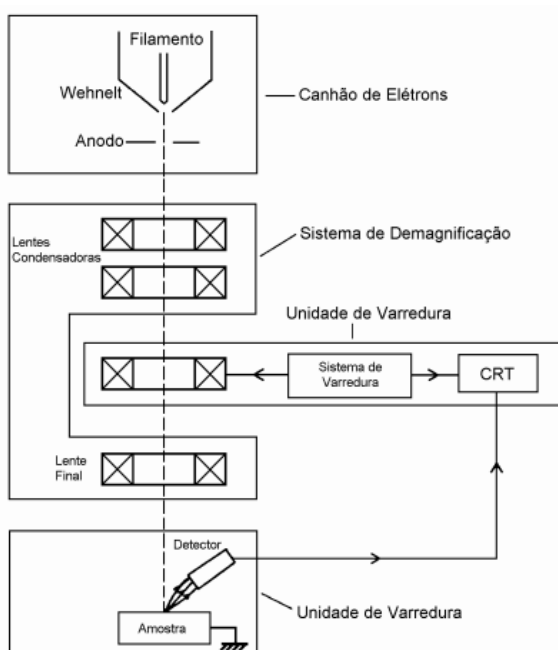


Figura 3.7 – Componentes do MEV.

Fonte: Maliska (2013)

Ainda de acordo com esta autora, este tipo de microscópio pode ser ainda mais potencializado a partir de uma adaptação que se faz na câmara da amostra de detectores de raios-X, o que permite se realizar análises químicas na amostra observada. Através da captação pelos detectores e da análise dos raios-X característicos que são emitidos pela amostra, resultado da interação dos elétrons primários com a superfície, obtém-se informações qualitativas e quantitativas da composição da amostra na região submicrométrica de incidência do feixe de elétrons. Isto facilita a identificação de precipitados e mesmo de variações de composição química no interior de um grão.

Continuando com esta pesquisadora, no MEV os sinais mais importantes para a formação da imagem são os elétrons secundários e os retroespalhados. Na medida em que o feixe de elétrons primários varre a amostra, estes sinais vão sofrendo modificações de acordo com a variação da superfície. Os elétrons secundários fornecem imagens topográficas da superfície da amostra e são os responsáveis pelas imagens de alta resolução. Já os elétrons retroespalhados fornecem imagens características de variação de composição do material.

Sobre as observações feitas em concretos com NTC, Carriço *et al.* (2018) informaram que a análise via MEV foi realizada em superfícies fraturadas de concreto para conferir a qualidade de dispersão dos NTC e a interação com a matriz de cimento nos traços de concreto realizados.

Para todos os tipos de traços de concretos com NTC testados por estes pesquisadores, foi possível diferenciar, por exemplo, regiões cuja dispersão foi considerada adequada, daquelas consideradas inadequadas, ou mesmo o “efeito de costura” dos NTC nos concretos. Estes e outros fatores foram enfatizados pelos autores e na Figura 3.8 pode-se observar os efeitos dos NTC, cada qual com uma particularidade explicitada no artigo em análise.

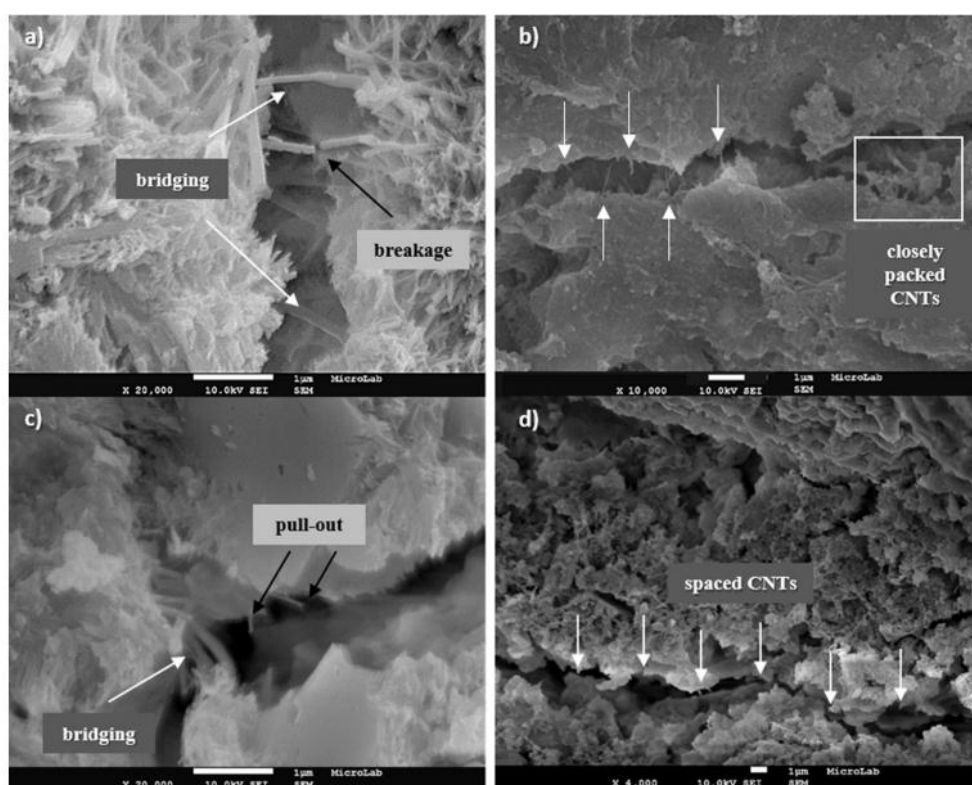
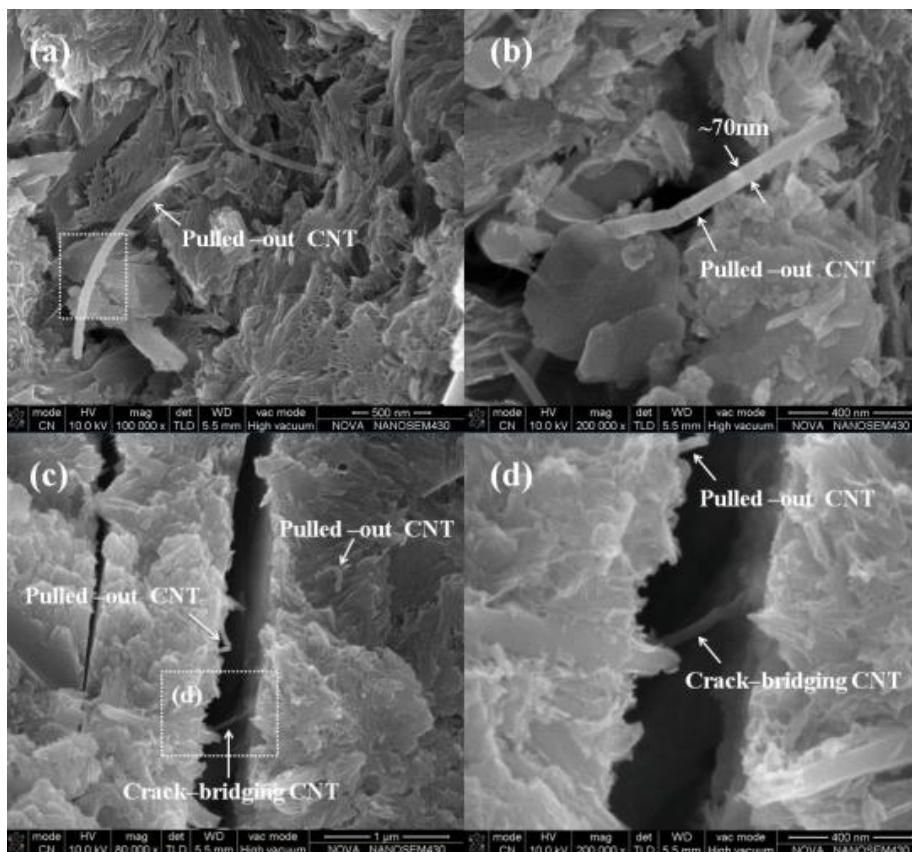


Figura 3.8 – Observações via MEV de efeitos diversos de NTC em traços de concreto com relação água/cimento a 0,55 de Carriço *et al.* (2018): a) 0,05 % de NTCPL; b) 0,05 % de NTCCOOH; c) e d) 0,1 % de NTCSS.  
Fonte: Carriço *et al.* (2018)

Lu *et al.* (2016) fizeram a adição de NTCPM ao *Ultra High Strength Concrete* (UHSC). Na Figura 3.9 pode-se observar com maior clareza em (a) e (b) a presença dos NTC no concreto endurecido. Ainda em (a), é possível notar a ligação do NTC a uma pequena quantidade de produtos de hidratação do cimento e em (b) é notável que um NTCPM, extraído com ~ 70 nm de diâmetro, é maior

que o dos NTCPM típicos do traço, que estão entre 20 e 40 nm, indicando que o NTCPM evidenciado foi envolvido pelos produtos de hidratação do cimento. Notadamente em (c), um NTCPM atua no chamado “efeito de costura” em uma fissura, enquanto outros NTC são observados em cada um dos lados. No zoom apresentado em (d), este NTC é observado mais claramente, mostrando que as duas extremidades do NTC estão engastadas e possuem  $\sim 0,4 \mu\text{m}$  de largura.



*Figura 3.9 – Observações via MEV de NTC em traços de UHSC de Lu et al. (2016): a) NTC destacado em meio aos produtos de hidratação; b) NTC destacado com 70 nm de diâmetro; c) efeito de costura provocado por NTC e d) ampliação da área (c).*

*Fonte: Lu et al. (2016)*

### 3.3 Considerações finais sobre a revisão bibliográfica

Estudos abordando a mistura de nanotubos de carbono (NTC) às matrizes cimentícias tem sido conduzidos em todo o mundo, principalmente nas últimas duas décadas. Todavia, os NTC são bem mais explorados em pesquisas relacionadas às pastas e as argamassas, enquanto que nos concretos estão presentes em número bem menor de abordagens científicas.

Naturalmente, as pesquisas tendem a ser iniciadas pelas pastas, passando pelas argamassas e só então adentram a complexidade dos concretos. A inserção de cada novo material em um concreto abre um promissor campo de estudos, de sugestões, de testes e resultados a serem realizados com vistas a uma continuidade de futuros estudos e conhecimento das características e propriedades de concretos com estes novos materiais.

Pela grande gama de variáveis do concreto, e também por sua enorme importância dentro da construção civil, é previsível que a ele se dê maior visibilidade frente aos demais produtos de cimento. Entretanto, numerosos desafios precisam ser vencidos ainda, notadamente em relação à dispersão de NTC e de produção de cimento com NTC em escala industrial.

Fazendo-se um levantamento bibliográfico sobre o tema, pode-se notar que a maioria dos estudos tem na mistura física dos NTC ao cimento o modo mais comum de se unir as micropartículas do cimento às nanopartículas de carbono. Muitas também são as formas como os NTC sofrem a dispersão, o que impede, muitas vezes, uma comparação de resultados mais direta e precisa.

Apesar de tudo isso, os estudos nesta área têm sido positivos e resultados importantes vêm sendo coletados, a ponto de se poder dizer que o emprego de NTC no concreto é promissor. Pelos resultados diversos mostrados ao longo desta revisão bibliográfica, é possível notar os avanços já conseguidos, principalmente no que se diz respeito às resistências mecânicas à tração, propriedade há muito explorada pelos engenheiros em busca de melhorias.

Como esta pesquisa é pioneira na utilização de NTC sintetizados diretamente sobre o clínquer em concretos, todo resultado encontrado será alvo de variadas discussões, já que ainda é desconhecido seu comportamento neste complexo composto cimentício. O que se pretende com este estudo é abrir caminhos para os que seguem, apontando, se possível, qual o tipo de concreto deverá receber maior atenção para a aplicação desta tecnologia no futuro.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Como este trabalho envolveu a produção de um material composto, como é o caso do concreto, é preciso realizar a descrição dos materiais constituintes, bem como os procedimentos experimentais para sua fabricação e caracterização. A etapa descritiva dos materiais foi realizada a partir de ensaios específicos para cada tipo de material envolvido, indicando-se também seu local de origem ou fabricação. Para os procedimentos, foi preciso recorrer às normas relativas à atividade, bem como a detalhes práticos de execução dos experimentos.

Este trabalho foi desenvolvido em dois locais diferentes: as moldagens, ensaios no concreto fresco e de resistências mecânicas foram realizados na central concreteira da InterCement®, parceira do CTNano/UFGM, em Praia Grande/SP. Já os ensaios de durabilidade e de microestrutura no concreto no estado endurecido foram realizados nas instalações do próprio CTNano/UFGM e no Centro de Microscopia da UFGM em Belo Horizonte/MG.

### 4.1 Materiais envolvidos na pesquisa

Os materiais constituintes foram disponibilizados na cidade de Praia Grande. Porém, cada um destes constituintes tem origem distinta, conforme pode ser observado nos itens que seguem.

#### 4.1.1 *Clínquer de cimento Portland e clínquer nanoestruturado*

O clínquer de cimento Portland utilizado para a síntese de NTC foi fornecido pela InterCement®, empresa parceira do CTNano/UFGM, de sua unidade em Pedro Leopoldo, em Minas Gerais.

O processo de síntese de NTC sobre o clínquer é realizado continuamente no CTNano/UFGM. Na Tabela 4.1 encontra-se a ficha técnica do material (lote CNT00418) que foi misturado ao cimento quando da realização dos experimentos.

Tabela 4.1 – Características do clínquer nanoestruturado.

Ficha técnica do clínquer nanoestruturado	
Nome	Clínquer nanoestruturado
Lote	CNT00418
Processo rotativo tipo	CVD ( <i>Chemical Vapor Deposition</i> )
Rendimento	15 % ( $\pm 2$ %)
Morfologia	NTC/NFC
Diâmetro	NTC (15 nm) / NFC (38 nm)

Fonte: CTNano/UFMG

No gráfico da Figura 4.1 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 expõe o percentual de rendimento de NTC obtido no processo de síntese. O rendimento de NTC do lote CNT00418 foi de 15 % no total, com uma temperatura média de queima a 530 °C.

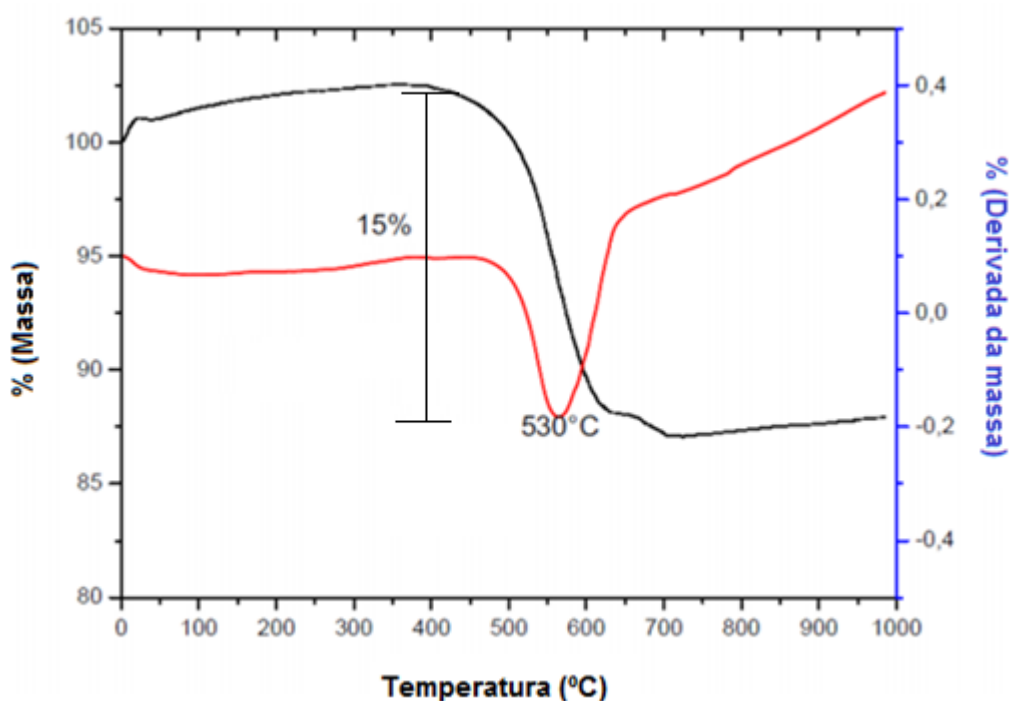


Figura 4.1 – Análise termogravimétrica do lote CNT00418.

Fonte: CTNano/UFMG

A análise morfológica do lote CNT00418 foi feita por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV). A figura 4.2(A) mostra uma partícula de clínquer recoberta com NTC. Já a forma interna dos NTC produzidos com relação à



estrutura estabelecida e seus respectivos diâmetros foram obtidos por microscopia eletrônica de transmissão (MET), como ilustra a Figura 4.2(B).

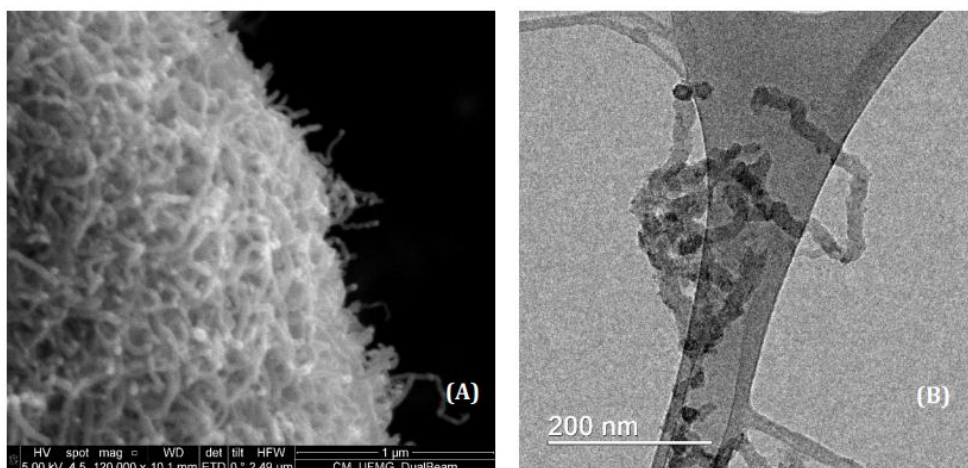


Figura 4.2 – Imagens de MEV (A) e de MET (B) do lote CNT00418.

Fonte: CTNano/UFMG

Os diâmetros dos NTC e NFC (nanofibras de carbono) produzidos pelo CTNano/UFMG e que foram utilizados nesta pesquisa estão entre 15 e 38 nm e possuem média de 24 nm, estando representados no histograma da Figura 4.3. A contagem de NTC é feita manualmente por meio do programa *Image J*.

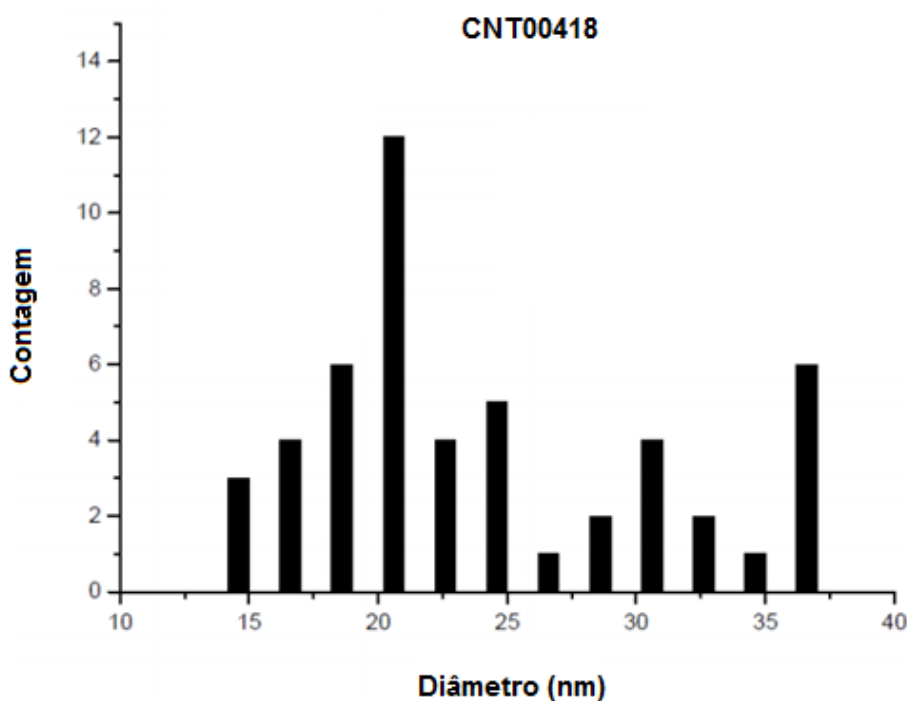


Figura 4.3 – Histograma dos diâmetros dos NTC e NFC produzidos sobre o clínquer do lote CNT00418.

Fonte: CTNano/UFMG

#### 4.1.2 Cimento Portland

O cimento utilizado nesta pesquisa foi o CP-V ARI da InterCement®, produzido na fábrica de Ijaci, em Minas Gerais. Este é um cimento de alta resistência inicial (ARI) e foi escolhido propositadamente, por se tratar de um cimento puro e que não contém adições, o que mostraria mais precisamente o efeito dos NTC no concreto. Além disto, o cimento ARI é um produto amplamente utilizado na construção de pré-fabricados de concreto, indústria que possui um alto controle de qualidade, garantia maior de visualização do efeito dos NTC no concreto.

As características físicas e químicas do cimento utilizado na pesquisa estão apresentadas, respectivamente, nas Tabelas 4.2 e 4.3 e foram disponibilizadas pela central concreteira da InterCement®. Estas análises foram analisadas e comparadas aos limites apresentados na ABNT NBR 5733 (1991). Esta norma foi substituída em 03/07/18 pela ABNT NBR 16697 (2018). Entretanto, como os ensaios foram realizados antes desta data, coube a utilização da norma anterior.

*Tabela 4.2 – Características físicas do cimento CP-V ARI.*

<b>Características físicas</b>	<b>Valor medido</b>	<b>Limites ABNT NBR 5733</b>
<b>Resíduo na peneira # 200</b>	0,12 %	≤ 6,0 %
<b>Resíduo na peneira # 325</b>	1,73 %	-
<b>Finura Blaine – área específica</b>	4690 cm <sup>2</sup> /g	≥ 3000 cm <sup>2</sup> /g
<b>Tempo inicial de pega</b>	160 min.	≥ 60 min.
<b>Tempo final de pega</b>	280 min.	≤ 600 min.
<b>Expansibilidade a quente</b>	0,5 mm	≤ 5 mm
<b>Resistência à compressão - 1 dia</b>	21,57 MPa	≥ 14,0 MPa
<b>Resistência à compressão - 3 dias</b>	36,43 MPa	≥ 24,0 MPa
<b>Resistência à compressão - 7 dias</b>	44,92 MPa	≥ 34,0 MPa

Fonte: *InterCement®*

Tabela 4.3 – Características químicas do cimento CP-V ARI.

Características químicas	Valor medido	Limites ABNT NBR 5733 (1991)
Perda ao fogo (PF)	3,83 %	≤ 4,5 %
Resíduo insolúvel (RI)	0,49 %	≤ 1,0 %
Equivalente alcalino (EA)	1,08 %	-
Trióxido de enxofre (SO <sub>3</sub> ) *	4,13 %	≤ 4,5 %
Óxido de magnésio (MgO)	2,87 %	< 6,5 %
Óxido de silício (SiO <sub>2</sub> )	19,95 %	-
Óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	5,48 %	-
Óxido de ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	2,28 %	-
Óxido de cálcio (CaO)	59,07 %	-
Óxido de sódio (Na <sub>2</sub> O)	0,30 %	-
Óxido de potássio (K <sub>2</sub> O)	0,88 %	-

\* Quando C<sub>3</sub>A do clínquer ≤ 8 % o limite é de ≤ 3,5 % da massa; Quando C<sub>3</sub>A do clínquer > 8 % o limite é de ≤ 4,5 % da massa.

Fonte: InterCement®

#### 4.1.3 Agregados miúdos

Os agregados miúdos empregados neste estudo foram a areia natural fina da Minermix e a areia artificial da Polimix, fornecedoras da InterCement®. A areia natural fina é oriunda da cidade de Bofete/SP. Já a areia artificial foi extraída na cidade de Barueri/SP. As características destes materiais estão em acordo com a norma ABNT NBR 7211 (2009) já que são de origem natural, encontrados fragmentados ou resultantes da britagem de rochas. Nesta pesquisa, a areia natural fina é quartzosa e a areia artificial é granítica. Os resultados de seus ensaios estão contidos na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Características da areia natural fina e da areia artificial.

Ensaio	Areia natural fina	Areia artificial	Método de ensaio	Limite normativo
Módulo de finura	0,93	2,61	ABNT NM 248 (2003)	-
Material pulverulento (%)	1,1	11,4*	ABNT NM 46 (2003)	3 a 5
Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,64	2,7	ABNT NM 52 (2009)	-
Massa específica saturada (g/cm <sup>3</sup> )	2,65	2,71	ABNT NM 52 (2009)	-
Massa específica absoluta (g/cm <sup>3</sup> )	2,68	2,75	ABNT NM 52 (2009)	-
Absorção (%)	0,5	0,6	ABNT NM 30 (2001)	-

\* Quando o material pulverulento for constituído totalmente de grãos gerados durante a britagem os limites podem ser alterados para: concreto submetido a desgaste (10%), concreto protegido de desgaste (12%), excluindo-se materiais micáceos, ferruginosos e argilo-minerais expansivos.

Fonte: InterCement®

As distribuições granulométricas da areia natural fina e da areia artificial estão contidas nas Tabelas 4.5 e 4.6, respectivamente.

Tabela 4.5 – Distribuição granulométrica da areia natural fina.

Peneiras (mm)	Retido (%)	Acumulado (%)
1,18	0	0
0,6	1	1
0,3	12	13
0,15	66	79
Fundo	21	100
Módulo de finura	0,93	
Dimensão máxima característica	0,6 mm	

Fonte: InterCement®

Tabela 4.6 – Distribuição granulométrica da areia artificial.

Peneiras (mm)	Retido (%)	Acumulado (%)
6,3	0	0
4,75	1	1
2,36	17	18
1,18	18	36
0,6	19	55
0,3	14	69
0,15	11	80
Fundo	20	100
Módulo de finura	2,61	
Dimensão máxima característica	4,75 mm	

Fonte: InterCement®

#### 4.1.4 Agregados graúdos

Os agregados graúdos empregados neste estudo são as britas 0 (4,75 mm  $\leq$  diâmetro  $\leq$  12,5 mm) e 1 (9,5 mm  $\leq$  diâmetro  $\leq$  25 mm) da empresa Polimix, uma fornecedora da InterCement®. Estes insumos são de origem granítica e provenientes da cidade de Barueri. As características destes materiais estão de acordo com a norma ABNT NBR 7211 (2009) e os resultados de seus ensaios estão contidos na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Características das britas 0 e 1.

Parâmetro	Brita 0	Brita 1	Método de ensaio	Limite normativo
<b>Absorção de água (%)</b>	0,5	0,4	ABNT NBR NM 53 (2003)	-
<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,68	2,69	ABNT NBR 7211 (2009)	-
<b>Massa específica aparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,72	2,72	ABNT NBR 7211 (2009)	-
<b>Massa unitária (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,45	1,45	ABNT NBR 7211 (2009)	-
<b>Teor de materiais pulverulentos (%)</b>	1,40	1,10	ABNT NBR NM 46 (2009)	2 *

\* Para agregados produzidos a partir de rochas com absorção de água inferior a 1 %, determinados conforme a ABNT NBR NM 53 (2003), o limite de material fino pode ser alterado de 1 % para 2 %.

Fonte: InterCement®

As distribuições granulométricas destas britas estão contidas nas Tabelas 4.8 e 4.9.

Tabela 4.8 – Distribuição granulométrica da brita 0.

Peneiras (mm)	Retido (%)	Acumulado (%)
9,5	4	4
6,3	36	40
4,75	29	69
2,36	23	92
1,18	3	95
0,6	1	96
0,3	1	97
0,15	1	98
Fundo	2	100
<b>Módulo de finura</b>	5,51	
<b>Dimensão máxima característica</b>	9,5 mm	

Fonte: InterCement®

Tabela 4.9 – Distribuição granulométrica da brita 1.

Peneiras (mm)	Retido (%)	Acumulado (%)
19,0	2	2
12,5	47	49
9,5	36	85
6,3	11	96
4,75	1	97
2,36	1	98
1,18	0	98
0,6	0	98
0,3	0	98
0,15	0	98
Fundo	2	100
<b>Módulo de finura</b>	6,72	
<b>Dimensão máxima característica</b>	19 mm	

Fonte: InterCement®

#### 4.1.5 Aditivos

Para esta pesquisa foram utilizados dois aditivos diferentes, que estão descritos na Tabela 4.10. Estes aditivos foram utilizados de acordo com a norma ABNT NBR 11768 (2011) e, segundo o fabricante *Grace Construction Products Applied Technologies®*, são compatíveis entre si.

Os aditivos utilizados foram submetidos à análise de teor ótimo pelo ensaio de fluxo contínuo de reometria rotacional. O objetivo desta análise, que é realizada em pasta de cimento, é obter a curva de deflocação para pastas de cimento com e sem a adição de nanotubos de carbono (NTC), visando avaliar as quantidades ótimas e a compatibilidade de aditivos plastificantes e superplastificantes, em função da viscosidade plástica. Neste caso os estudos foram realizados nas pastas de referência (sem NTC) e contendo NTC, para os aditivos MIRA 481 e ADVA 518. Esta análise utilizou relação água/cimento a 0,4.

Tabela 4.10 – Aditivos utilizados na pesquisa.

Aditivos utilizados nesta pesquisa					
Produto	Princípio ativo	Descrição do produto	Aspecto/cor	Dosagem recomendada (% SPC)	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> ) ABNT NBR 10908 (2008)
MIRA 481	<i>Lignosulfonato</i>	Efeito dispersante com melhoria nas resistências finais.	Líquido marrom escuro	0,5 a 1,0 %	1.180 - 1.240
ADVA 518	<i>Policarboxilato</i>	Redução da demanda de água e excelentes resistências iniciais nas primeiras horas.	Líquido alaranjado	0,5 a 1,0 %	1.060 - 1.080

Fonte: *Grace Construction Products Applied Technologies®*

Segundo o fabricante, o produto MIRA 481 é um aditivo polifuncional para concreto, com função de redução de água, para aplicações múltiplas e isento de cloretos. Contém polímeros naturais com moléculas de alto peso molecular, balanceados de acordo com demandas de corte de água, manutenção de abatimento e resistência inicial, promovendo melhora das propriedades reológicas das misturas cimentícias, reduzindo a tensão de cisalhamento e controlando a viscosidade aparente, facilitando assim a aplicação do concreto. Para o estado endurecido, a fabricante cita a redução da permeabilidade e de retrações e fissuras de origem plástica, além de aumentar a durabilidade e a vida útil das estruturas.

Para o aditivo MIRA 481, o gráfico da Figura 4.4 apresenta a curva de defloculação obtida a partir da análise dos três teores propostos, sugerindo, assim, que este aditivo deve ser utilizado em proporção entre 0,65 e 0,75 % da massa do cimento. Nestes pontos, observa-se que as curvas estão mais próximas entre si. Porém, no momento da produção deste concreto, foi preciso adotar um teor de 0,8 % de aditivo em relação à massa do cimento para se conseguir um melhor ajuste do traço convencional.

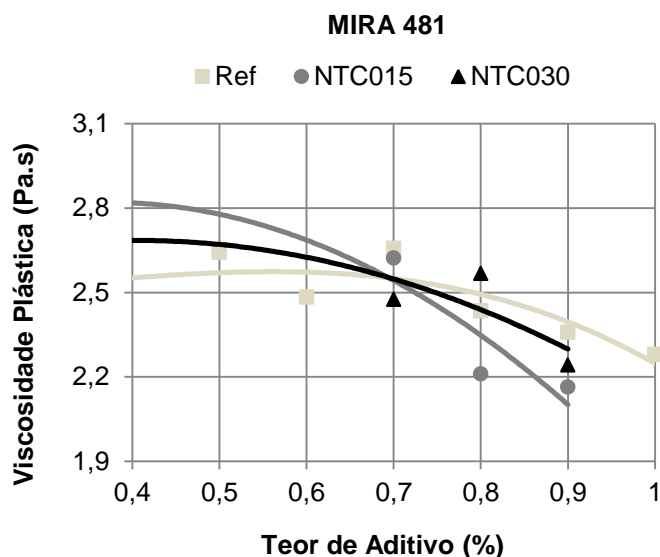


Figura 4.4 – Curva de defloculação do aditivo MIRA 481.

Já o produto ADVA 518 é um aditivo sem cloretos à base de policarboxilato, que, segundo o fabricante, permite reduzir a quantidade de água das misturas e foi formulado para satisfazer as demandas da indústria concreteira em relação à fluidez, redução de água e manutenção do abatimento. Foi desenvolvido para apresentar manutenção de abatimento e resistência à segregação, sendo indicado assim para a produção de concreto pré-moldado ou pré-fabricado, e servindo também para produção de concreto autoadensável.

O aditivo ADVA 518 apresenta efeito superplastificante e, pelo gráfico da Figura 4.5, pode-se observar a curva de defloculação obtida a partir da análise dos três teores propostos, sugerindo-se assim que este aditivo deve ser utilizado em proporção entre 0,70 e 0,85 % da massa do cimento. Nestes pontos, observa-se que as curvas estão mais próximas entre si. Entretanto, no momento da produção deste concreto, foi preciso adotar um teor de 0,92 % de aditivo em relação à massa do cimento para se conseguir o efeito de espalhamento necessário para o traço de concreto autoadensável.



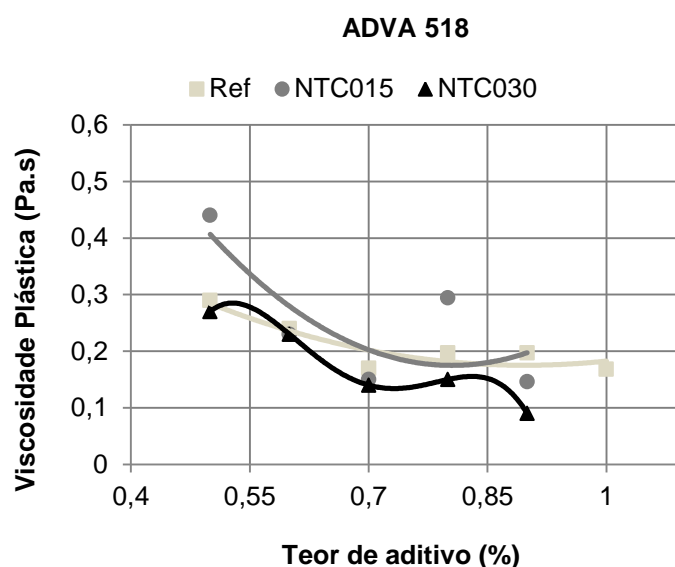


Figura 4.5 – Curva de defloculação do aditivo ADVA 518.

## 4.2 Descrição dos traços desenvolvidos

A fim de abranger uma gama maior de análises, a execução deste trabalho envolveu a produção de dois concretos distintos: um concreto chamado de convencional (CC), com relação água/cimento de 0,60 e aditivo plastificante MIRA 481 e um concreto chamado de autoadensável (CAA), com relação água/cimento de 0,45 e aditivo superplastificante ADVA 518.

A escolha destes concretos foi baseada nas exigências de durabilidade de estruturas de concreto requeridas pela ABNT NBR 6118 (2014). De acordo com esta norma, as estruturas de concreto devem ser projetadas e construídas de modo que diante das condições ambientais previstas quando da época da realização do projeto, e se respeitadas as condições de uso preconizadas, conservem suas segurança, estabilidade e utilização de serviço durante toda a sua vida útil.

#### 4.2.1 Concreto convencional

O concreto convencional foi escolhido por ser um representante de larga utilização em estruturas de concreto armado. Para isso, foi escolhido um concreto comumente utilizado em meios urbanos, de classe de agressividade ambiental moderada (CAA II) e relação água/cimento de 0,60, segundo a ABNT NBR 6118 (2014). As características iniciais esperadas para este concreto foram: concreto bombeável e de resistência característica à compressão de 35 MPa.

Para este tipo de concreto, foram realizados três traços com diferentes composições, sendo: um traço de referência, chamado CCREF (sem NTC), um traço contendo 0,15 % de NTC em relação à massa do cimento Portland, denominado CCNTC015, e um traço contendo 0,30 % de NTC, denominado CCNTC030. O traço em peso do concreto de referência foi de 1: 1,49: 1,23: 0,64: 3,14 (cimento: areia natural: areia artificial: brita 0: brita 1) com relação água/cimento de 0,60 e teor de aditivo de 0,8 % em relação à massa de cimento. O consumo de cimento por m<sup>3</sup> foi de 293 kg. A Tabela 4.11 apresenta a denominação bem como a composição de todos concretos para volume de 1 m<sup>3</sup> de massa.

Tabela 4.11 – Proporções dos materiais constituintes do traço convencional.

Denominação dos concretos	Concreto convencional - a/c = 0,60							Aditivo MIRA 481
	Cimento	Clínquer nano estruturado	Água	Areia natural	Areia artificial	Brita 0	Brita 1	
	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)
<b>CCREF</b>	293,00	0,00	175,8	436,6	360,4	187,5	920	2,34
<b>CCNTC015</b>	290,04	2,93*	175,8	436,6	360,4	187,5	920	2,34
<b>CCNTC030</b>	287,03	5,86**	175,8	436,6	360,4	187,5	920	2,34

\* Para CCNTC015 – 0,15 % de cimento =  $0,15 * 293/100 * 100/15 = 2,93$

\*\* Para CCNTC030 – 0,30 % de cimento =  $0,30 * 293/100 * 100/15 = 5,86$

Como o concreto convencional envolveu dois tipos de agregados miúdos (areia natural e areia artificial), houve a necessidade de se utilizar uma proporção em massa de 55 % de areia natural e de 45 % de areia artificial para promover melhor acerto granulométrico do traço. A Tabela 4.12 apresenta a composição do

agregado miúdo deste traço e o gráfico da Figura 4.6 mostra sua curva granulométrica segundo a ABNT NBR 7211 (2009).

Tabela 4.12 – Composição do agregado miúdo para o concreto convencional

Composição agregado miúdo – Concreto convencional				
Peneiras	Areia artificial (%)	Areia natural (%)	Composição (%)	% Retido acumulado
9,5	0	0	0	0
6,3	0	0	0	0
4,8	1	0	1	1
2,4	17	0	8	9
1,2	18	0	8	17
0,6	19	1	9	26
0,3	14	12	12	38
0,15	11	66	41	79
Fundo	20	21	21	100
Módulo de finura da composição do agregado miúdo				1,70
Dimensão máxima característica				4,8 mm

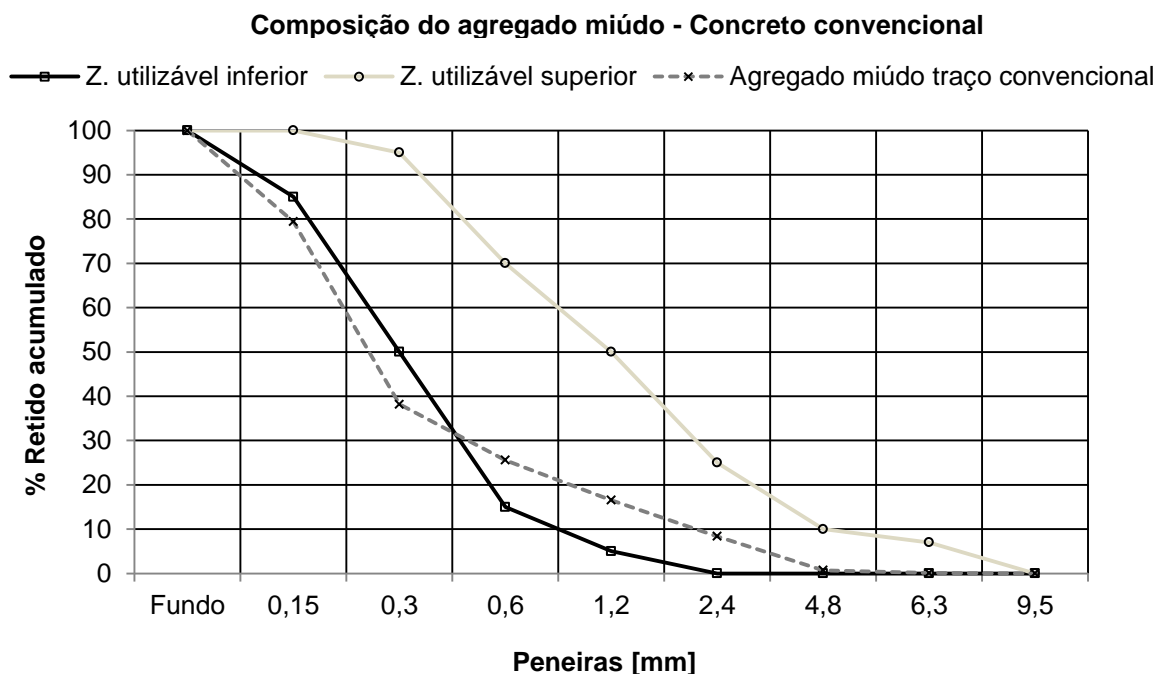


Figura 4.6 – Curvas da composição granulométrica do agregado miúdo do concreto convencional.

A propósito da desconformidade do agregado miúdo utilizado neste trabalho, tentou-se acertar o traço de acordo com a referida norma pelas zonas ótimas dos limites inferior e superior de sua Tabela 2. Entretanto, por causa da finura

excessiva da areia natural fina, foi necessário se expandir os limites para as zonas utilizáveis inferior e superior. Desta forma, calculando-se o módulo de finura deste agregado miúdo, que foi de 1,69, e utilizando-se ainda da nota 2 desta tabela, que permite variação de módulo de finura nas zonas utilizáveis inferiores entre 1,55 a 2,20, este agregado miúdo é considerado conforme.

Ademais, é prudente salientar que a areia natural fina empregada neste estudo tem sido largamente utilizada em concretos de obras diversas no estado de São Paulo e tem apresentado resultados satisfatórios, de acordo com a InterCement®.

Além do agregado miúdo, o concreto convencional envolveu dois tipos de agregados graúdos (brita 0 e brita 1). Por isso houve a necessidade de se utilizar uma proporção em massa de 17 % de brita 0 e de 83 % de brita 1 para o acerto granulométrico do traço. A Tabela 4.13 apresenta a composição do agregado graúdo deste traço e o gráfico da Figura 4.7 mostra sua curva granulométrica segundo a ABNT NBR 7211 (2009).

*Tabela 4.13 – Composição do agregado graúdo para o concreto convencional.*

<b>Composição agregado graúdo – Concreto convencional</b>				
<b>Peneiras</b>	<b>Brita 0 (%)</b>	<b>Brita 1 (%)</b>	<b>Composição (%)</b>	<b>% Retido acumulado</b>
<b>25,0</b>	0	0	0	0
<b>19,0</b>	0	2	2	2
<b>12,5</b>	0	47	39	41
<b>9,5</b>	4	37	31	72
<b>6,3</b>	36	10	15	87
<b>4,8</b>	29	1	4	91
<b>2,4</b>	23	1	3	94
<b>1,2</b>	3	0	1	95
<b>0,6</b>	1	0	1	96
<b>0,3</b>	1	0	1	97
<b>0,15</b>	1	0	1	98
<b>Fundo</b>	2	2	2	100
<b>Dimensão máxima característica</b>			<b>19 mm</b>	

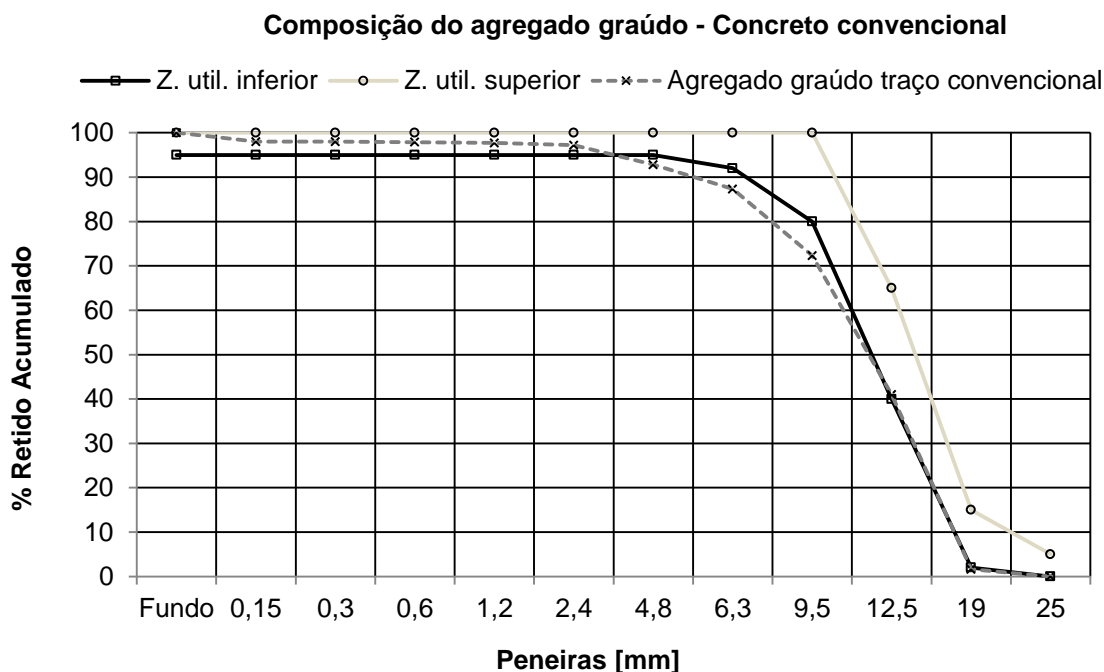


Figura 4.7 – Curvas da composição granulométrica do agregado graúdo do concreto convencional.

#### 4.2.2 Concreto autoadensável

O concreto autoadensável teve sua escolha determinada por se tratar de um concreto altamente utilizado em estruturas da indústria de concreto pré-fabricado, aonde o controle de qualidade é bastante alto, e o controle de fabricação é rigoroso. Para este concreto, foi escolhida uma relação água/cimento de 0,45, uma classe de espalhamento SF 2, de acordo com a ABNT NBR 15823-1 (2010) e uma resistência característica à compressão de 50 MPa.

Para este concreto, também foram realizados 3 traços com diferentes composições, sendo: um traço de referência, chamado CAAREF (sem NTC), um traço contendo 0,15 % de NTC em relação à massa do cimento Portland, denominado CAANTC015, e um traço contendo 0,30 % de NTC, denominado CAANTC030. O traço em peso do concreto de referência foi de 1: 1,40: 0,94: 2,00 (cimento: areia natural: areia artificial: brita 0) com relação água/cimento de 0,45 e teor de aditivo plastificante e superplastificante, respectivamente, de 0,8 % e 0,92 % em relação à massa de cimento. O consumo de cimento por m<sup>3</sup> foi de 409

kg. A Tabela 4.14 apresenta a denominação bem como a composição de todos concretos para volume de 1 m<sup>3</sup> de massa.

*Tabela 4.14 – Proporções dos materiais constituintes do traço autoadensável.*

Denominação dos concretos	Concreto autoadensável - a/c = 0,45							
	Cimento	Clínquer nano estruturado	Água	Areia natural	Areia artificial	Brita 0	Aditivo MIRA 481	Aditivo ADVA 518
	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)
<b>CAAREF</b>	409,00	0,00	184,05	572,6	384,5	818	3,27	3,76
<b>CAANTC015</b>	404,87	4,09*	184,05	572,6	384,5	818	3,27	3,76
<b>CAANTC030</b>	400,65	8,18**	184,05	572,6	384,5	818	3,27	3,76

\* Para CAANTC015 – 0,15 % de cimento = 0,15 \* 409/100 \* 100/15 = 4,09

\*\* Para CAANTC030 – 0,30 % de cimento = 0,30 \* 409/100 \* 100/15 = 8,18

Para o concreto autoadensável, como foi preciso realizar o acerto granulométrico dos dois tipos de agregados miúdos envolvidos (areia natural e areia artificial), houve a necessidade de se utilizar uma proporção em massa de 60 % de areia natural e de 40 % de areia artificial. A Tabela 4.15 apresenta a composição do agregado miúdo deste traço e o gráfico da Figura 4.8 mostra sua curva granulométrica segundo a ABNT NBR 7211 (2009).

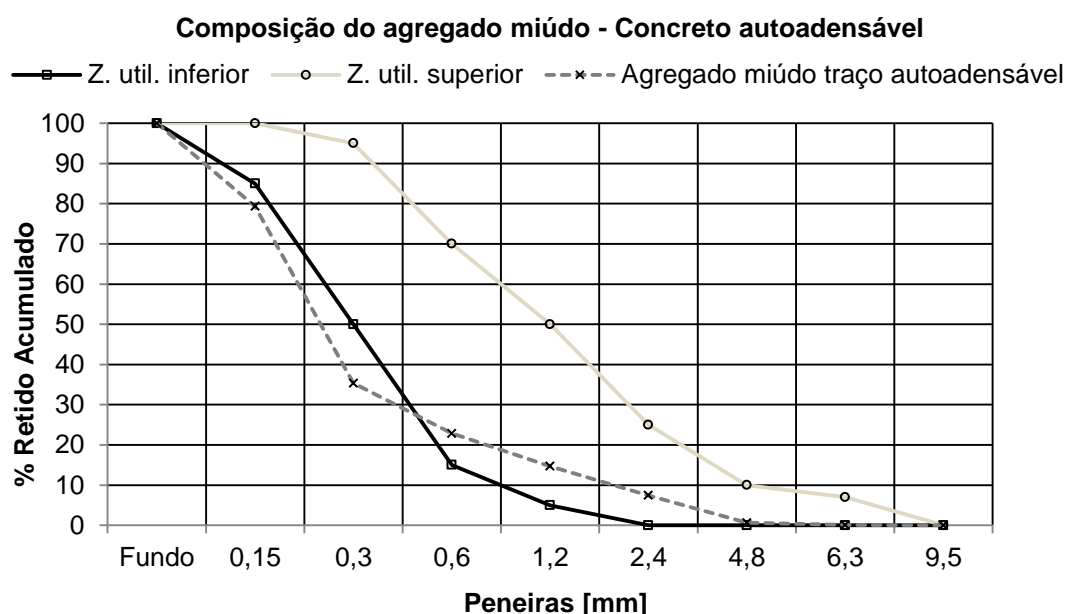
*Tabela 4.15 – Composição do agregado miúdo para o concreto autoadensável.*

Composição agregado miúdo – Concreto autoadensável				
Peneiras	Areia artificial (%)	Areia natural (%)	Composição (%)	% Retido acumulado
<b>9,5</b>	0	0	0	0
<b>6,3</b>	0	0	0	0
<b>4,8</b>	1	0	1	1
<b>2,4</b>	17	0	7	8
<b>1,2</b>	18	0	7	15
<b>0,6</b>	19	1	8	23
<b>0,3</b>	14	12	13	36
<b>0,15</b>	11	66	43	79
<b>Fundo</b>	20	21	21	100
<b>Módulo de finura da composição do agregado miúdo</b>				<b>1,60</b>
<b>Dimensão máxima característica</b>				<b>4,8 mm</b>

A propósito da desconformidade do agregado miúdo utilizado neste trabalho, buscou-se acertar o traço de acordo com a ABNT NBR 7211 (2009) pelas zonas ótimas dos limites inferior e superior de sua Tabela 2. Entretanto, por causa da

finura excessiva da areia natural fina, foi necessário se expandir os limites para as zonas utilizáveis inferior e superior. Desta forma, calculando-se o módulo de finura deste agregado miúdo, que foi de 1,60, e utilizando-se ainda da nota 2 desta tabela, que permite variação de módulo de finura nas zonas utilizáveis inferiores entre 1,55 a 2,20, este agregado miúdo é considerado conforme.

Além disso, é prudente se dizer que a areia natural fina empregada neste estudo tem sido largamente utilizada em concretos de obras diversas no estado de São Paulo e tem apresentado resultados satisfatórios, de acordo com a InterCement®.



*Figura 4.8 – Curvas da composição granulométrica do agregado miúdo do concreto autoadensável.*

Para o agregado graúdo, o concreto autoadensável envolveu apenas a brita 0. A Figura 4.9 mostra a curva da composição granulométrica e a Tabela 4.8 a análise granulométrica desta brita segundo a ABNT NBR 7211 (2009).

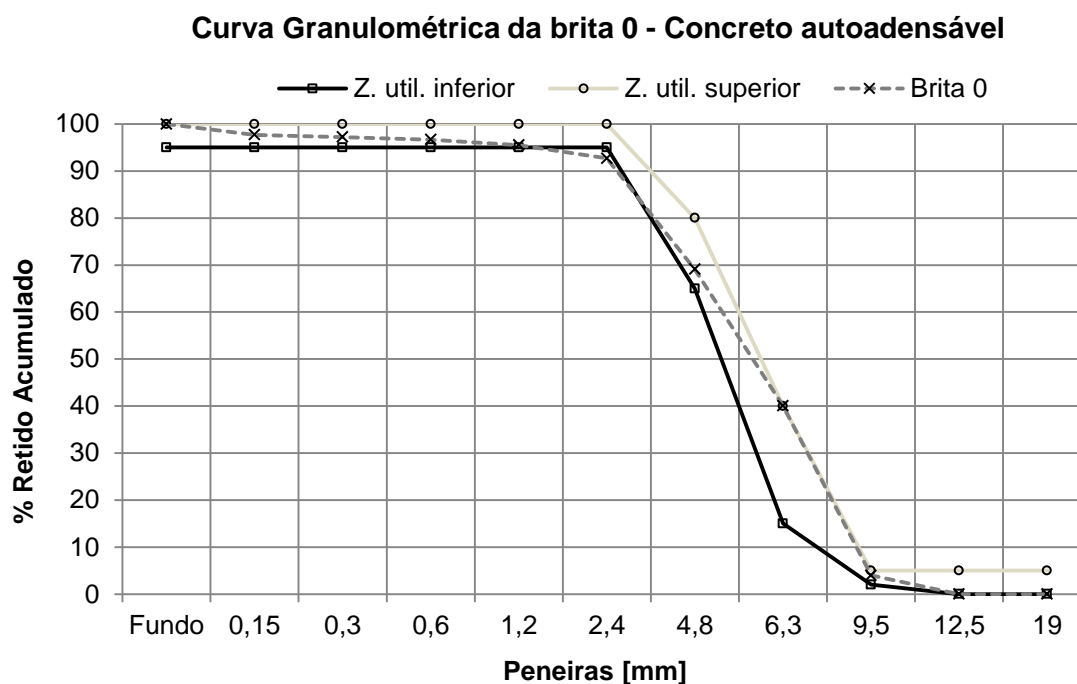


Figura 4.9 – Curvas da composição granulométrica da brita 0, único agregado graúdo do concreto autoadensável.

### 4.3 Produção dos concretos

A produção dos concretos foi feita em duas etapas durante o mês de junho de 2018, sendo a primeira destinada ao concreto convencional e a segunda ao concreto autoadensável. Os traços destes concretos foram feitos na seguinte ordem: primeiramente o traço de referência, em seguida o NTC015 e por fim o NTC030.

Os traços de concreto foram preparados em betoneira de eixo horizontal de 250 litros, enquanto a mistura de cimento Portland aos NTC sintetizados diretamente sobre o clínquer foi realizada em outra betoneira de eixo horizontal de 120 litros.

O preparo do concreto convencional foi realizado para cada traço conforme apresentado a seguir.

#### *Concreto convencional de referência – CCREF*

1 – Preparo das formas dos CP's, lubrificando-as com óleo desmoldante;



- 2 – Separação e pesagem dos materiais componentes do traço;
- 3 – Inserção das britas 0 e 1, da areia natural e da areia artificial com posterior início do giro da betoneira de 250 litros por 1 minuto;
- 4 – Inserção do cimento e mistura por 30 segundos;
- 5 – Inserção de metade do volume de água e mistura por 2 minutos;
- 6 – Inserção do aditivo MIRA 481 e mistura por 2 minutos;
- 7 – Lavagem do tubo de ensaio que continha o aditivo com o restante da água;
- 8 – Colocação desta água com o restante do aditivo com a betoneira ligada, mudando a sua inclinação, quando necessário, para uma melhor mistura, por 4 minutos;
- 9 – Operação de liga e desliga da betoneira para verificação de concreto aderido nas paredes e retirada com colher de pedreiro e régua metálica, até que não houvesse mais material nestas condições;
- 10 – Retirada do concreto da betoneira e colocação em carrinho de mão para prosseguimento dos demais ensaios no estado fresco e posterior moldagem.

#### *Concretos convencionais CCNTC015 e CCNTC030*

- 1 – Limpeza e secagem (com secador industrial) da betoneira de 120 litros para proceder à mistura do cimento Portland com o clínquer sintetizado com NTC;
- 2 – Mistura do clínquer sintetizado com NTC ao cimento Portland nas proporções adequadas\*, em betoneira de 120 litros, durante 10 minutos, tempo para que se pudesse atestar visualmente uma mistura bem realizada;
- 3 – Preparo das formas dos CP's, lubrificando-as com óleo desmoldante;
- 4 – Separação e pesagem dos materiais componentes do traço;
- 5 – Inserção das britas 0 e 1, da areia natural e da areia artificial, com posterior início do giro da betoneira de 250 litros por 1 minuto;
- 6 – Inserção do cimento (misturado no item 2) e mistura por 30 segundos;
- 7 – Inserção de metade do volume de água e mistura por 2 minutos;
- 8 – Inserção do aditivo MIRA 481 e mistura por 2 minutos;
- 9 – Lavagem do tubo de ensaio que continha o aditivo com o restante da água;
- 10 – Colocação desta água com o restante do aditivo com a betoneira ligada, mudando a sua inclinação, quando necessário, para uma melhor mistura, por 4 minutos;

- 11 – Operação de liga e desliga da betoneira para verificação de concreto aderido nas paredes e retirada com colher de pedreiro e régua metálica, até que não houvesse mais material nestas condições;
- 12 – Retirada do concreto da betoneira e colocação em carrinho de mão para prosseguimento dos demais ensaios no estado fresco e posterior moldagem.

O preparo do concreto autoadensável foi realizado para cada traço conforme apresentado a seguir.

#### *Concreto autoadensável de referência – CAAREF*

- 1 – Preparo das formas dos CP's, lubrificando-as com óleo desmoldante;
- 2 – Separação e pesagem dos materiais componentes do traço;
- 3 – Inserção da brita 0, da areia natural e da areia artificial com posterior início do giro da betoneira de 250 litros por 1 minuto;
- 4 – Inserção do cimento e mistura por 30 segundos;
- 5 – Inserção de metade do volume de água e mistura por 2 minutos;
- 6 – Inserção do aditivo MIRA 481 e mistura por 2 minutos;
- 7 – Inserção do aditivo ADVA 518 e mistura por 2 minutos;
- 8 – Lavagem dos tubos de ensaio que continham os aditivos com o restante da água;
- 9 – Colocação desta água com o restante dos aditivos com a betoneira ligada, mudando a sua inclinação, quando necessário, para uma melhor mistura, por 4 minutos;
- 10 – Operação de liga e desliga da betoneira para verificação de concreto aderido nas paredes e retirada com colher de pedreiro e régua metálica, até que não houvesse mais material nestas condições;
- 11 – Retirada do concreto da betoneira e colocação em carrinho de mão para prosseguimento dos demais ensaios no estado fresco e posterior moldagem.

#### *Concretos autoadensáveis CAANTC015 e CAANTC030*

- 1 – Limpeza e secagem (com secador industrial) da betoneira de 120 litros para proceder à mistura do cimento Portland com o clínquer sintetizado com NTC;

- 2 – Mistura do clínquer sintetizado com NTC ao cimento Portland nas proporções adequadas\*, em betoneira de 120 litros, durante 10 minutos, tempo para que se pudesse atestar visualmente uma mistura bem realizada;
- 3 – Preparo das formas dos CP's, lubrificando-as com óleo desmoldante;
- 4 – Separação e pesagem dos materiais componentes do traço;
- 5 – Inserção da brita 0, da areia natural e da areia artificial, com posterior início do giro da betoneira de 250 litros por 1 minuto;
- 6 – Inserção do cimento (misturado no item 2) e mistura por 30 segundos;
- 7 – Inserção de metade do volume de água e mistura por 2 minutos;
- 8 – Inserção do aditivo MIRA 481 e mistura por 2 minutos;
- 9 – Inserção do aditivo ADVA 518 e mistura por 2 minutos;
- 10 – Lavagem dos tubos de ensaio que continham os aditivos com o restante da água;
- 11 – Colocação desta água com o restante dos aditivos com a betoneira ligada, mudando a sua inclinação, quando necessário, para uma melhor mistura, por 4 minutos;
- 12 – Operação de liga e desliga da betoneira para verificação de concreto aderido nas paredes e retirada com colher de pedreiro e régua metálica, até que não houvesse mais material nestas condições;
- 13 – Retirada do concreto da betoneira e colocação em carrinho de mão para prosseguimento dos demais ensaios no estado fresco e posterior moldagem.

A Figura 4.10 ilustra as operações de produção dos concretos.



*Figura 4.10 – Imagens de etapas do processo de preparo dos concretos: a) separação dos materiais; b) preparação dos CP's; c) aditivo MIRA 481; d) mistura.*

#### 4.4 Ensaios de caracterização dos concretos no estado fresco

Antes das operações de moldagens dos corpos de prova (CP's), foram realizados os seguintes ensaios no concreto em seu estado fresco: ensaio de abatimento do tronco de cone (também conhecido como *slump test*) para o concreto convencional, ensaio de espalhamento (também conhecido como *slump flow test*) para o concreto autoadensável e ensaio de teor de ar incorporado pelo método pressométrico para ambos os concretos. Todos estes métodos fornecem parâmetros de trabalhabilidade dos concretos.

##### 4.4.1 Ensaio do abatimento do tronco de cone (*slump test*)

Segundo a terminologia da norma ASTM C125-00a (2015), a trabalhabilidade é a propriedade que determina o esforço necessário para manipular uma mistura de concreto em seu estado fresco com a mínima perda de homogeneidade. O ensaio mais usualmente realizado para verificação desta propriedade é o de abatimento do tronco de cone de Abrams. No Brasil, a norma utilizada para este fim é a ABNT NM 67 (1998). Esta normativa foi utilizada neste trabalho para analisar a trabalhabilidade do concreto convencional.

Realizado de acordo com a referida ABNT NM 67 (1998), tomou-se uma chapa metálica quadrada de dimensão lateral de 500 mm e de espessura igual a 3 mm e um tronco de cone metálico vazado de espessura de 1,5 mm, diâmetro inferior de 100 mm, diâmetro superior de 200 mm e de altura igual a 300 mm, contendo duas aletas laterais em que se podia pisar e duas alças feitas para sacar a peça do chão. Além disto, foi utilizada para compactação, uma haste metálica de 600 mm de comprimento e 16 mm de diâmetro, possuindo pontas arredondadas. Todos os instrumentos foram devidamente umedecidos antes do início dos testes.

O tronco de cone foi virado com o maior diâmetro na parte inferior. Então, o concreto convencional foi recolhido da betoneira conforme a ABNT NM 33 (1998), em recipiente metálico não absorvente, preenchendo-se o cone em três camadas iguais, sendo que cada uma destas camadas recebeu 25 golpes da haste

metálica, a fim de proceder melhor compactação do material. Ao final do procedimento, o tronco de cone foi sacado e posto ao lado do corpo de prova. Desta forma, realizou-se a medição do *slump*, por meio de uma régua metálica, como pode ser verificado na Figura 4.11. Para finalizar o ensaio, o concreto utilizado voltou para a betoneira para ser misturado por mais 2 minutos, antes da moldagem dos CP's.



*Figura 4.11 – Ensaio de abatimento do tronco de cone (slump test) no concreto convencional.*

#### *4.4.2 Ensaio de espalhamento (slump flow test)*

O ensaio de determinação do espalhamento pelo método do cone de Abrams, mais conhecido como *slump flow test*, é realizado conforme a ABNT NBR 15823-2 (2010). Trata-se de um ensaio para concreto autoadensável, que, por se apresentar de forma fluida, precisa ser medido em diâmetro de abertura, e não em altura, como no caso do concreto convencional.

Para a realização deste ensaio, tomou-se uma chapa metálica quadrada de dimensão lateral de 900 mm, contendo marcações centradas de 100, 200 e 500 mm, e de espessura igual a 1,5 mm. Além disso, utilizou-se um tronco de cone metálico vazado de espessura 1,5 mm, diâmetro inferior de 100 mm, diâmetro superior de 200 mm e de altura igual a 300 mm, contendo duas aletas laterais em

que se podia pisar e duas alças feitas para sacar a peça do chão. Para a leitura das medidas, foi utilizada uma régua metálica com graduação de 1 mm.

O tronco de cone foi virado com o maior diâmetro na parte inferior. Então, o concreto autoadensável foi recolhido da betoneira conforme a ABNT NM 33 (1998), em recipiente metálico não absorvente, sendo lançado continuamente até que fosse preenchida toda a altura do tronco. Ao final do preenchimento do espaço interno do tronco de cone, ele foi sacado com velocidade uniforme em 5 segundos. Desta forma, com o concreto formando um círculo na chapa metálica devido ao escoamento, procedeu-se a medição do espalhamento, com auxílio da régua metálica, como pode ser verificado na Figura 4.12.



*Figura 4.12 – Ensaio de determinação do espalhamento (slump flow test) no concreto autoadensável.*

#### *4.4.3 Ensaio do teor de ar incorporado pelo método pressométrico*

O ensaio do teor de ar incorporado pelo método pressométrico é regulamentado, no Brasil, pela ABNT NM 47 (2002) e tem como objetivo determinar o volume de ar incorporado percentualmente ao volume total de concreto em seu estado fresco. Este ensaio foi realizado para o concreto convencional e para o autoadensável.

Para a realização deste ensaio, foi utilizado um medidor de ar como o previsto no item 4.1.2 da referida norma, para determinar o volume de ar presente nos concretos. Trata-se de um medidor de aço (tipo B) com tampa que consiga 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 material. O manômetro contido na tampa deve estar calibrado em porcentagem de ar para a pressão final observada.

A tampa deste medidor possui válvulas de ar, válvula de saída de ar e chaves para injeção ou saída de água. Esta tampa também é provida de sistema de encaixe com o recipiente de medida, assegurando um fechamento estanque, sem ar aprisionado na junta entre as bordas. A aparelhagem inclui ainda uma bomba de ar manual, como peça acessória, que é permitida pela norma; uma haste metálica de 600 mm de comprimento e 16 mm de diâmetro, possuindo pontas arredondadas para compactação; um martelo de borracha; e uma seringa para injeção de água no sistema.

O teste se iniciou com a coleta do concreto diretamente da betoneira conforme a ABNT NM 33 (1998), em recipiente metálico não absorvente. Em seguida, preencheu-se o recipiente medidor de ar em três camadas iguais, sendo que cada uma destas camadas recebeu 14 golpes da haste metálica, a fim de proceder melhor compactação do material. Após o adensamento de cada camada, utilizando-se a haste metálica, o recipiente medidor de ar ainda foi golpeado por 15 vezes, em sua parede externa, com o martelo de borracha, a fim de se ajudar a eliminar as bolhas de ar que pudessem estar aprisionadas ao concreto em virtude do processo de compactação. Então o material sofreu alisamento para adequação do volume de concreto ao recipiente e, finalmente, a tampa fora colocada de modo que se fechasse o recipiente medidor hermeticamente.

Fechando-se a válvula de ar principal e abrindo-se as chaves da tampa, injetou-se água, por meio da seringa, numa destas chaves, até que a água saísse na outra chave. Sacudiu-se o aparelho até que o ar fosse completamente expulso, injetando-se mais água quando necessário. Ao fechar as chaves, adicionou-se ar

por meio da bomba de ar manual e fez-se a leitura no manômetro, conforme pode ser verificado na Figura 4.13.



*Figura 4.13 – Ensaio de teor de ar incorporado pelo método pressométrico nos dois tipos de concreto estudados: convencional e autoadensável.*

#### **4.5 Moldagem dos corpos de prova**

Os corpos de prova utilizados para realizar esta pesquisa foram cilíndricos, em formas de aço, com dimensões de 100 x 200 mm (diâmetro e altura) e foram moldados de acordo com as especificações da ABNT NBR 5738 (2003). Para compactação do concreto, foi utilizada uma haste metálica de 600 mm de comprimento e 16 mm de diâmetro, possuindo pontas arredondadas. Uma concha metálica também foi usada para a colocação do concreto nos moldes metálicos e uma colher de pedreiro para rasar o CP.

Primeiramente os CP's foram posicionados em uma mesa rígida e livre de vibrações e receberam uma fina camada de óleo desmoldante. Em seguida, o concreto foi colocado nos moldes em duas camadas, recebendo, cada camada, 12 golpes da haste metálica. Então, os corpos de prova receberam alisamento com colher de pedreiro, como pode ser visto na figura 4.14.





*Figura 4.14 – Moldagem dos corpos de prova de concreto.*

Na medida em que eram moldados, os CP's eram identificados através de fichas de papel coladas na superfície de cada um, a fim de não serem confundidos com os demais traços.

Finalizadas estas ações, os CP's permaneceram em local fechado, com temperatura ambiente, de um dia para o outro. Então, estes CP's foram desformados, recebendo nova identificação lateral com giz de cera e transportados para uma câmara úmida, com temperatura e umidade controladas, onde permaneceram até as idades em que eram ensaiados.

A Tabela 4.16 apresenta um levantamento do número de corpos de prova para cada concreto proposto (convencional e autoadensável) e para cada idade de realização dos ensaios de resistências mecânicas.

*Tabela 4.16 – Quantidades de corpos de prova por idade dos dois tipos de concretos propostos: convencional e autoadensável.*

<b>Quantidade de corpos de prova por tipo de ensaio e idade</b>			
<b>Idade dos ensaios</b>	<b>Resistência à compressão</b>	<b>Resistência à tração por compressão diametral</b>	<b>Módulo de elasticidade</b>
<b>3 dias</b>	3	5	3
<b>7 dias</b>	3	5	3
<b>28 dias</b>	3	5	3

Para os ensaios de resistências mecânicas de cada tipo de concreto (convencional e autoadensável), foram moldados 33 CP's para o concreto de referência, 33 CP's para o concreto NTC015 e 33 CP's para o concreto NTC030, totalizando, portanto, 99 CP's. Os três CP's utilizados para os ensaios de módulo de elasticidade, foram depois rompidos à compressão. Desta forma, os ensaios de resistência à compressão somaram seis CP's para cada idade: três moldados para este fim e três advindos do ensaio de módulo de elasticidade.

Já para os ensaios de absorção de água por capilaridade e absorção de água por imersão, foram moldados seis CP's de cada tipo de concreto (convencional e autoadensável) divididos da seguinte forma: dois CP's para o concreto de referência, dois CP's para o concreto NTC015 e dois CP's para o concreto NTC030. De cada dois corpos de prova, um foi destinado para o ensaio de absorção de água por capilaridade e outro para o ensaio de absorção de água por imersão.

#### **4.6 Ensaios de caracterização dos concretos no estado endurecido**

Após as operações de moldagens dos corpos de prova (CP's), foram realizados os seguintes ensaios no concreto em seu estado endurecido: ensaios de caracterização mecânica e de absorção de água por capilaridade e por imersão.

Os ensaios de caracterização mecânica realizados foram os de resistência à compressão, de resistência à tração por compressão diametral e de módulo de elasticidade, nas idades de 3, 7 e 28 dias. Os ensaios de absorção de água por capilaridade e por imersão foram realizados nas seguintes idades: para o concreto convencional aos 100 dias e para o concreto autoadensável aos 105 dias. Durante este tempo, os CP's destinados aos ensaios de absorção de água permaneceram em cura por imersão em tanque contendo mistura de água e cal e com temperatura controlada.

#### 4.6.1 Resistência à compressão

Mehta e Monteiro (2014) citam a resistência à compressão do concreto como uma espécie de balizador de sua qualidade, além de ser usada também como índice para as demais resistências mecânicas.

Marcondes (2012), afirma que valores de resistência à compressão abaixo do que é esperado, mostram que o concreto apresenta problemas em sua estrutura, que podem se apresentar desde uma dosagem inadequada, passando pela fabricação ou utilização de materiais indevidos, até uma má formação interna da estrutura por adensamento malsucedido ou por falta de cura.

Para as medições da resistência à compressão, foram utilizadas as prescrições da norma ABNT NBR 5739 (2007). A máquina de ensaios empregada para a realização destes testes mecânicos é da marca *Forney Test Equipment*®, modelo F-250F-02, com capacidade para 1.200 kN. Esta máquina foi aferida pela Dinateste Indústria e Comércio Ltda®, na data de 09/01/18. Este equipamento pode ser visualizado na Figura 4.15 e pertence à InterCement®, estando localizada em sua unidade de Praia Grande/SP.



Figura 4.15 – Máquina de ensaios utilizada para ensaio de resistências mecânicas.

Inicialmente, procedeu-se à retificação dos corpos de prova como mostrado na Figura 4.16 e preconizado em norma. Em seguida, tomou-se, com auxílio de um paquímetro, cada uma das dimensões dos corpos de prova, sendo todas estas anotadas em uma planilha. Foram realizados seis rompimentos por traço, sendo três deles feitos após a determinação de valores de módulo de elasticidade, como já explicado anteriormente.



*Figura 4.16 – Realização de retificação de corpo de prova de concreto.*

Segundo a norma, a resistência à compressão é obtida pela Equação 4.1.

$$f_c = \frac{4.F}{\pi.D^2} \quad (4.1)$$

em que:

$f_c$  = resistência mecânica à compressão, em MPa;

F = força máxima resistida pelo corpo de prova, em N;

D = diâmetro do corpo de prova, em mm.

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

Para a resistência à tração por compressão diametral, empregou-se a norma ABNT NBR 7222 (2011), que estabelece os parâmetros para este ensaio. Foram

utilizados cinco corpos de prova para cada idade. Eles foram retificados e então suas medidas foram coletadas por intermédio de um paquímetro e anotadas numa planilha.

As medições de resistência à tração por compressão diametral foram feitas também na mesma máquina de ensaios utilizada nas medições de resistência à compressão. Entretanto, a ela foi acoplado um aparato, discriminado na norma como sendo um dispositivo auxiliar que ajuda a posicionar o corpo de prova na máquina para que não haja interferência nos resultados. Este aparato está mostrado na Figura 4.17 e seu encaixe na máquina de ensaios na Figura 4.18.



*Figura 4.17 – Aparato para ensaio de resistência à tração por compressão diametral.*



*Figura 4.18 – Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.*

Segundo a norma utilizada, a resistência à tração por compressão diametral é obtida pela Equação 4.2.

$$f_{ct,sp} = \frac{2.F}{\pi.D.l} \quad (4.2)$$

em que:

$f_{ct,sp}$  = resistência à tração por compressão diametral, em MPa;

F = força máxima resistida pelo corpo de prova, em N;

D = diâmetro do corpo de prova, em mm;

l = comprimento do corpo de prova, em mm.

#### 4.6.3 Módulo de elasticidade

Com relação ao módulo de elasticidade, utilizou-se as prescrições da norma ABNT NBR 8522 (2017), que estabelece os procedimentos para este ensaio.

A determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão do concreto, nome que é trazido pela norma brasileira, também foi realizada na máquina de ensaios empregada para as medições de resistência à compressão. No entanto, a esta máquina foi acoplado um medidor de deformação mecânico (compressômetro) de bases dependentes e que continha um relógio comparador, com resolução mínima de 0,001 mm.

Este compressômetro se destina a realizar medidas do deslocamento relativo entre duas seções de corpos de prova cilíndricos de concreto submetidos a tensões de compressão de curta duração. Por se tratar de compressômetro de bases dependentes, de acordo com a ABNT NBR 8522 (2017), o deslocamento medido pelo relógio comparador corresponde à metade do deslocamento real do corpo de prova medido entre as suas bases. O compressômetro utilizado e sua montagem no corpo de prova e na máquina de testes podem ser visualizados nas Figuras 4.19 e 4.20, respectivamente.



*Figura 4.19 – Compressômetro de bases dependentes utilizado no ensaio de módulo de elasticidade.*



*Figura 4.20 – Execução de ensaio de módulo de elasticidade.*

Para realizar o ensaio, foram utilizados três corpos de prova, assim como determina a norma brasileira. Eles foram retificados e então suas medidas foram tomadas por intermédio de um paquímetro e anotadas numa planilha. O ensaio se inicia com o posicionamento do CP na máquina de ensaios, ficando o espécime centrado geometricamente e tendo seu eixo coincidindo com o eixo de aplicação da carga.

Inicialmente foi realizado o ensaio de tensão versus deformação, utilizando-se como referência os seguintes valores de tensão: 0,5 MPa; 0,2  $f_c$ ; 0,3  $f_c$ ; 0,4  $f_c$ ; 0,50  $f_c$ ; 0,6  $f_c$ ; 0,7  $f_c$ ; e, 0,8  $f_c$ . O parâmetro  $f_c$  corresponde à resistência média à compressão determinada em três corpos de prova similares, de mesmo tamanho e forma dos que foram utilizados para determinar a curva tensão versus deformação, provenientes da mesma betonada, preparados e curados sob as mesmas condições. A deformação foi medida 5  $\pm$  2 segundos após a estabilização da carga correspondente a cada nível de tensão.

A partir da curva tensão versus deformação de cada corpo de prova, foi calculado o módulo de elasticidade de acordo com a norma ABNT NBR 8522 (2017). Esta norma estabelece que o módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente à origem ou inicial, deve ser considerado equivalente ao módulo de deformação secante ou cordal entre 0,5 MPa e 30 %  $f_c$ . O módulo de elasticidade inicial,  $E_{ci}$ , em GPa, foi calculado pela Equação 4.3.

$$E_{ci} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \times 10^{-3} = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \times 10^{-3} \quad (4.3)$$

em que:

$E_{ci}$  = módulo de elasticidade inicial, em GPa;

$\sigma_b$  = tensão maior  $\sigma_b$  igual a 0,3  $f_c$ , com  $f_c$ , em MPa;

$\sigma_a$  = tensão básica  $\sigma_a$ , igual a 0,5 MPa;

$\varepsilon_b$  = deformação específica do corpo de prova ensaiado sob a tensão maior;

$\varepsilon_a$  = deformação específica do corpo de prova ensaiado sob a tensão básica.

Os resultados devem ser arredondados para a primeira casa decimal e expressos em GPa.

Após a realização dos ensaios da relação tensão versus deformação de cada concreto e daquela idade, os respectivos corpos de prova foram recolocados na máquina de ensaios e levados até a sua ruptura por compressão. Quando a



resistência efetiva ( $f_{cef}$ ) à compressão do corpo de prova diferiu de  $f_c$  em mais de 20 %, os resultados do corpo de prova foram descartados.

#### 4.6.4 *Determinação da absorção de água por capilaridade*

O ensaio de absorção de água por capilaridade, realizado com base na ABNT NBR 9779 (1995), é um ensaio que objetiva verificar a absorção de água por ascensão capilar. O ensaio foi executado em duas etapas, sendo uma etapa de secagem e outra de contato dos CP's com a água.

O teste foi iniciado tomando-se cada corpo de prova de altura igual a 200 mm e procedendo-se cortes de 10 mm do topo e do fundo do CP, uma vez que estas partes podem sofrido maiores variações em virtude do processo de moldagem. Os 180 mm restantes foram serrados em três partes iguais, sendo classificados em: parte superior, do meio e inferior. Em seguida os CP's foram identificados e colocados em estufa a  $70 \pm 5$  °C, até que se conseguisse constância de massa igual ou inferior a 0,5 % em leituras feitas a cada 24 h.

Terminada a secagem, os CP's foram resfriados até que atingissem a temperatura de  $23 \pm 2$  °C. Em seguida, receberam três demãos de resina impermeabilizante em suas faces lateral e superior, a fim de que toda a água que os penetrasse não encontrasse possibilidade de saída até o fim do experimento. O objetivo era saturá-los, dando maior visibilidade ao efeito dos NTC naqueles CP's em que estivessem presentes, comparando-os aos CP's sem NTC.

Para a etapa de contato com a água, os corpos de prova foram pesados e colocados dentro de um recipiente com suportes internos fixos, que ficavam por baixo dos CP's, garantindo nivelamento e penetração de água total pela parte inferior, e com volume de água constante. A lâmina d'água deveria permanecer cobrindo constantemente os CP's, durante todo o tempo de medições, com  $5 \pm 1$  mm da parte inferior de cada CP imersos em água, em um recipiente com tampa, durante 72 h, conforme pode ser visto nas Figuras 4.21 e 4.22. As pesagens, nesta condição de ascensão capilar, ocorreram da primeira à sexta hora bem

como após 24, 48 e 72 horas do início do contato dos corpos de prova com a lâmina d'água.

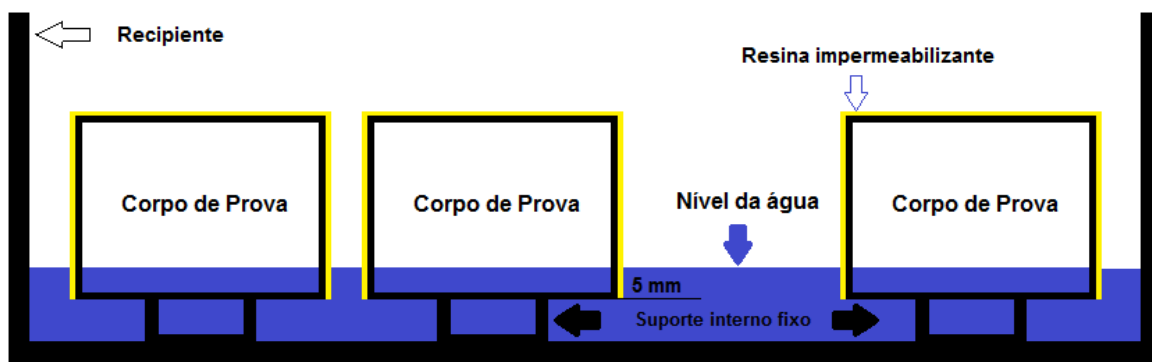


Figura 30 – Esquema do ensaio de absorção de água por capilaridade.



Figura 4.22 – Execução de ensaio de absorção de água por capilaridade.

A absorção de água por capilaridade, expressa em  $\text{g}/\text{cm}^2$ , é calculada pela Equação 4.4, em que se divide o aumento de massa pela área da seção transversal da superfície do corpo de prova em contato com a água.

$$C = \frac{A - B}{S} \quad (4.4)$$

em que:

C = absorção de água por capilaridade, em g/cm<sup>2</sup>;

A = massa do corpo de prova, que permanece em contato com a água, durante um período de tempo especificado, em g;

B = massa do corpo de prova seco, assim que este atingir a temperatura de  $23 \pm 2$  °C, em g;

S = área da seção transversal da base do corpo de prova em contato com a água, em cm<sup>2</sup>.

#### 4.6.5 Determinação da absorção de água por imersão

Este ensaio foi realizado com base na norma ABNT NBR 9778 (2005) que objetiva a determinação da absorção de água em corpos de prova de concreto imersos em água. O ensaio foi realizado em três etapas, sendo uma etapa de secagem, uma de imersão em água e, a última, de fervura dos CP's.

O teste foi iniciado pela secagem, que se deu conforme o ensaio de absorção de água por capilaridade. Findada esta etapa, os CP's foram resfriados até a temperatura de  $23 \pm 2$  °C, sendo, em seguida, pesados e colocados, imersos em água, em um recipiente com tampa, durante 72 h. As pesagens nesta condição saturada ocorreram da primeira à sexta hora bem como após 24, 48 e 72 horas. Ao fim deste período, os CP's passaram para a última etapa: a fervura.

Ainda dentro deste recipiente, iniciou-se a fervura, que deveria ocorrer essencialmente entre o minuto 15 e o minuto 30 e que se alongaria por 5 horas, procedimento este mostrado na Figura 4.23. Ao final deste processo, os CP's foram colocados para resfriar novamente, sendo pesados quando atingissem a temperatura de  $23 \pm 2$  °C.



Figura 4.23 – Etapa de fervura dos corpos de prova para o ensaio de imersão.

A absorção de água, mostrada em porcentagem, é calculada pela Equação 4.5.

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 , \quad (4.5)$$

em que:

$A$  = absorção (%);

$m_{sat}$  = massa da amostra saturada em água após imersão e fervura, em g;

$m_s$  = massa da amostra seca em estufa, em g.

#### 4.7 Avaliação da microestrutura dos concretos

Quando da realização dos rompimentos dos corpos de prova para os ensaios de resistências mecânicas à compressão, na idade de 28 dias, foram coletados alguns espécimes representativos para serem analisados via microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os espécimes foram então colocados em potes plásticos contendo álcool isopropílico a fim de interromper o processo de hidratação do cimento nessa idade.

Estes potes foram identificados e guardados até a semana anterior à semana de realização da microscopia, quando os espécimes foram levados a uma estufa a  $40 \pm 3$  °C por 24 horas, e depois a um dessecador por um período de 2 horas. Em seguida, cada espécime recebeu um fino filme de carbono, a fim de recobrir as amostras para melhorar a condutividade durante a análise de microscopia.

A Figura 4.24 mostra o MEV modelo *FEG - Quanta 200 FEI* do Centro de Microscopia da UFMG, utilizado para visualizar as amostras desta pesquisa por meio da reflexão de elétrons secundários. O objetivo da análise por MEV foi observar a dispersão, a forma e o tamanho dos NTC no concreto.



Figura 4.24 – MEV modelo *FEG - Quanta 200 FEI* do Centro de Microscopia da UFMG.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir, são apresentados os resultados dos efeitos dos nanotubos de carbono (NTC) sobre a trabalhabilidade, as resistências mecânicas e a absorção de água nos concretos ensaiados. Também são mostradas imagens feitas no MEV em que se pode observar a atuação dos NTC nestes concretos.

### 5.1 Resultados e análises de ensaios realizados no estado fresco

A avaliação da trabalhabilidade de concretos produzidos com e sem NTC foi feita pela comparação de resultados de *slump test* para o concreto convencional e de *slump flow test* para o concreto autoadensável. Além disso, para os dois concretos analisados, foi realizado o ensaio de teor de ar incorporado. Os resultados são apresentados na sequência.

#### 5.1.1 Ensaio do abatimento do tronco de cone (*slump test*)

O histograma da Figura 5.1 apresenta os resultados de abatimento para os traços de concreto convencional. Verifica-se que o traço de referência (CCREF) apresentou menor abatimento em relação aos traços com NTC (CCNTC015 e CCNTC030), que, por sua vez, apresentaram resultados iguais.

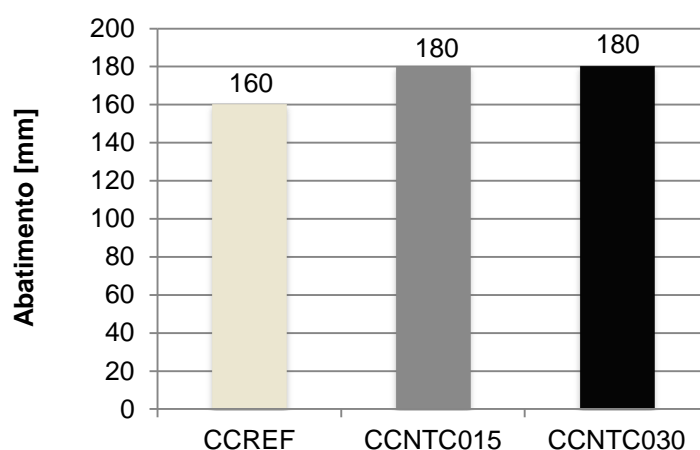


Figura 5.1 – Resultados de *slump test* do concreto convencional.

Ao analisar estes resultados, e diante da realização de apenas uma amostra de cada traço de concreto (CCREF, CCNTC015 e CCNTC030), pode-se dizer que os NTC não influenciaram a trabalhabilidade do concreto. Cabe ressaltar, entretanto, a importância da realização de estudos prévios de reologia da pasta, como os que foram feitos neste trabalho. Estes estudos, realizados em pastas com relação água/cimento de 0,4, mostraram, de antemão, que o aditivo MIRA 481, num teor ótimo entre 0,65 e 0,75 %, proporcionou a menor viscosidade plástica em pastas com e sem NTC.

Os resultados de abatimento obtidos nesta pesquisa divergem daqueles obtidos por Marcondes (2012). Este autor realizou mistura física de NTC aos concretos produzidos e concluiu que a adição de NTC desfavoreceu a trabalhabilidade de dois de seus três traços com NTC, dificultando o manuseio da massa. Este fato, segundo Marcondes, pode estar relacionado à inserção do nanomaterial, que possui maior superfície específica (250-300 m<sup>2</sup>/g) que os demais componentes do concreto.

Por outro lado, os resultados deste estudo corroboram com os encontrados por Carriço *et al.* (2018): para as maiores relações água/cimento (0,55) utilizadas por estes autores, os maiores abatimentos encontrados foram para os concretos contendo NTC.

### 5.1.2 Ensaio de espalhamento (*slump flow test*)

Pelo que se observa no histograma da Figura 5.2, o concreto autoadensável apresentou uma diferença de até 9 % em relação aos traços com NTC (CAANTC015 e CAANTC030), que, por sua vez, apresentaram resultados praticamente iguais. Estes resultados classificaram todos estes três traços como sendo de classe de espalhamento *SF 2*, segundo o anexo A da ABNT NBR 15823-1 (2010), como era inicialmente esperado, e o que os deixam adequados para a maioria de aplicações correntes como lajes, vigas e pilares. Da mesma forma que o concreto convencional, pode-se dizer que os NTC não influenciaram a trabalhabilidade do concreto autoadensável.

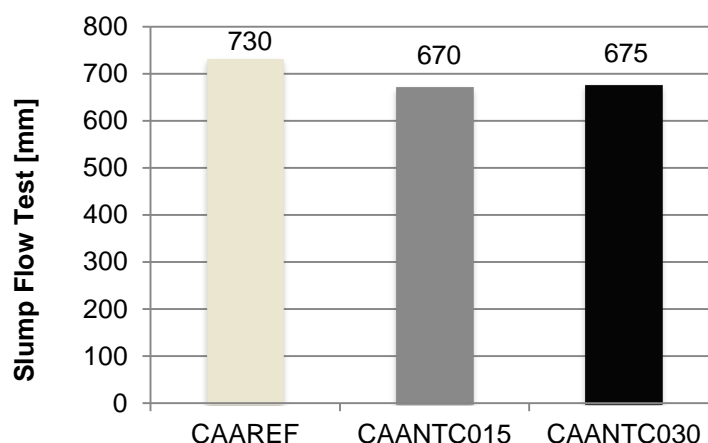


Figura 5.2 – Resultados do slump flow test do concreto autoadensável.

### 5.1.3 Ensaio do teor de ar incorporado pelo método pressométrico

Como pode ser observado no histograma da Figura 5.3, o concreto convencional apresentou uma diferença de 11 % entre o traço de referência e o traço CCNTC015. Já o traço CCNTC030, destoou um pouco dos demais, apresentando uma diferença de 67 % em relação à referência. Ao analisar estes resultados, e diante da realização de apenas uma amostra de cada traço de concreto (CCREF, CCNTC015 e CCNTC030), pode-se dizer que os NTC não influenciaram os resultados de teor de ar incorporado no concreto convencional, não influenciando, por conseguinte, na trabalhabilidade.

Os resultados do concreto autoadensável são apresentados no histograma da Figura 5.4. Como pode ser observado, no concreto autoadensável, houve um aumento de valores progressivo do CAAREF para o CAANTC015 e deste para o CAANTC030. Todavia, diante da realização de apenas uma amostra de cada traço de concreto (CAAREF, CAANTC015 e CAANTC030), os resultados revelam que os NTC também não influenciaram os resultados de teor de ar incorporado no concreto autoadensável, não alterando, desta forma, a trabalhabilidade deste concreto.



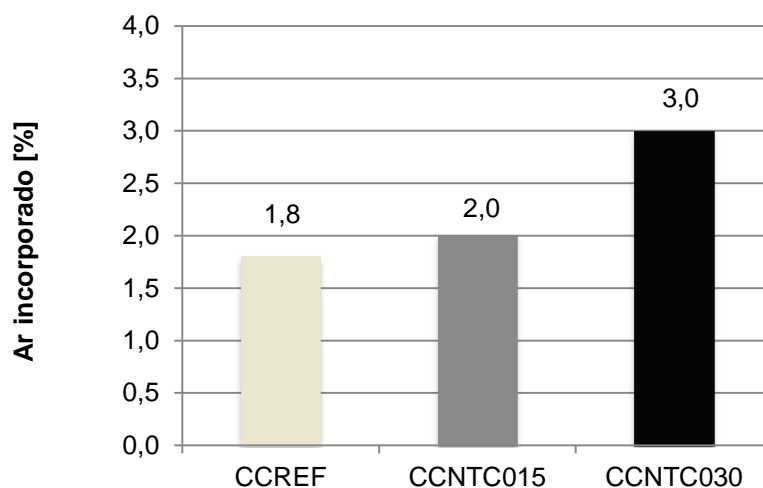


Figura 5.3 – Resultados do teor de ar incorporado do concreto convencional.

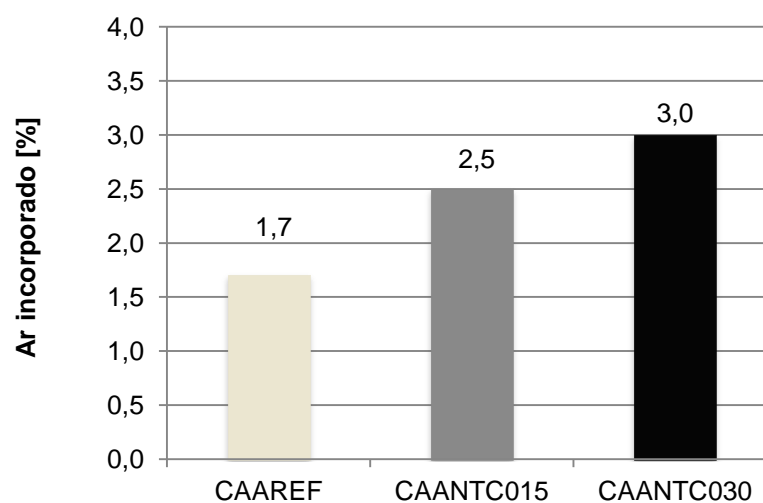


Figura 5.4 – Resultados do teor de ar incorporado do concreto autoadensável.

Como comparativo de incorporação de ar ao concreto convencional, os resultados desta pesquisa corroboraram com os resultados de Carriço *et al.* (2018): maiores porcentagens de ar incorporado foram encontradas para os concretos com maiores valores de abatimento do tronco de cone, tal como nesta pesquisa.

## 5.2 Resultados e análises de ensaios realizados no estado endurecido

As avaliações realizadas no estado endurecido dos concretos convencional e autoadensável, produzidos com e sem NTC, foram feitas pela comparação de resultados de resistências mecânicas à compressão, à tração por compressão

diametral e de módulo de elasticidade. Além disso, a fim de se observar o efeito de absorção de água nos concretos produzidos, ensaios de determinação de absorção de água por capilaridade e por imersão foram realizados. Estes resultados são apresentados na sequência.

### 5.2.1 Resistência mecânica à compressão

Ao se romper os corpos de prova para cada um dos concretos produzidos, e em cada uma das idades analisadas (3, 7 e 28 dias), foram realizados, em paralelo, os cálculos de resistência à compressão. Todas as seis amostras ensaiadas foram escolhidas para compor os resultados. Como já dito no capítulo 4, para a composição de valores de resistência à compressão, tomou-se três corpos de prova exclusivamente destinados para a compressão e três corpos de prova advindos do ensaio de módulo de elasticidade.

Para o concreto convencional, o resumo dos resultados de resistência à compressão está representado na Tabela 5.1 e no gráfico da Figura 5.5. Os resultados obtidos estão apresentados no Apêndice A. Já as análises estatísticas realizadas com o teste *t-Student* estão apresentadas resumidamente na Tabela 5.2 e mais detalhadamente no Apêndice C.

*Tabela 5.1 – Resumo de resistência à compressão do concreto convencional por idade.*

Idade (dias)	Parâmetros	CCREF	CCNTC015	CCNTC030
3	Resistência média (MPa)	28,45	28,84	23,67
	Desvio padrão (MPa)	1,34	1,40	1,66
	Coeficiente de variação (%)	4,70	4,87	7,03
	Diferença relação CCREF (%)	-	1,4	-20,2
7	Resistência média (MPa)	33,45	31,93	30,43
	Desvio padrão (MPa)	1,16	2,06	1,22
	Coeficiente de variação (%)	3,48	6,44	4,02
	Diferença relação CCREF (%)	-	-4,8	-10,0
28	Resistência média (MPa)	40,32	38,62	35,37
	Desvio padrão (MPa)	0,88	1,72	2,66
	Coeficiente de variação (%)	2,18	4,45	7,52
	Diferença relação CCREF (%)	-	-4,4	-13,0

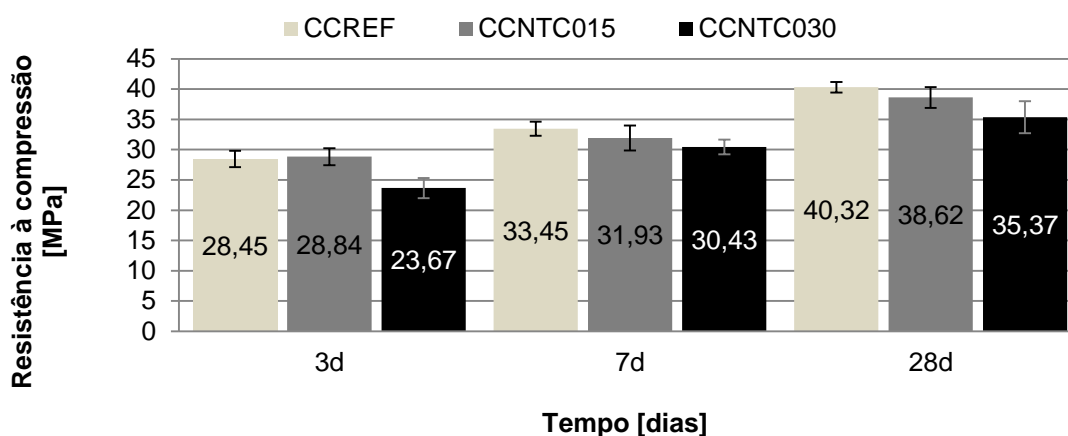


Figura 5.5 – Resultados de resistência à compressão do concreto convencional por idade.

Tabela 5.2 – Resumo de teste *t-Student* para resistência à compressão do concreto convencional por idade.

Idade (dias)	CCREF x CCNTC015	CCREF x CCNTC030	CCNTC015 x CCNTC030
3	CCREF = CCNTC015	CCREF > CCNTC030	CCNTC015 > CCNTC030
7	CCREF = CCNTC015	CCREF > CCNTC030	CCNTC015 = CCNTC030
28	CCREF = CCNTC015	CCREF > CCNTC030	CCNTC015 > CCNTC030

A análise estatística dos resultados do concreto convencional, em todas as idades, realizada pelo teste *t-Student* com um nível de confiança de 95 %, revela que não houve diferença significativa de resistência do concreto CCNTC015 em relação à referência. Já o concreto CCNTC030, apresentou resultados de resistência à compressão menores que os demais, exceto aos 7 dias, em relação ao concreto CCNTC015. Esta diminuição nos valores da resistência à compressão do concreto CCNTC030 pode estar relacionada ao fato de o traço convencional apresentar uma elevada relação água/cimento (0,60). Estes resultados sugerem também a avaliação da resistência à compressão em idades mais avançadas visto que o percentual de diferença entre as resistências diminui com o passar do tempo.

Estes resultados divergem da afirmação de Carriço *et al.* (2018), que mostraram que, independentemente da relação água/cimento e do tipo de NTC, a adição de NTC à concretos, provocou um aumento na resistência à compressão de suas misturas. Os resultados destes autores mostraram ganhos máximos, aos 28 dias,

de 21,1 % (0,1 % de NTCSS), de 9,7 % (0,05 % de NTCPL) e de 8,6 % (de 0,05 % de NTCCOOH) nas resistências à compressão. Vale lembrar que no estudo de Carriço *et al.* (2018), foi utilizada mistura física dos NTC aos concretos.

Para o concreto autoadensável, o resumo dos resultados de resistência mecânica à compressão está representado na Tabela 5.3 e no gráfico da Figura 5.6. Os resultados obtidos estão apresentados no Apêndice B. Já as análises estatísticas com o teste *t-Student* estão apresentadas resumidamente na Tabela 5.4 e mais detalhadamente no Apêndice C.

A análise dos resultados do concreto autoadensável, em todas as idades, realizada pelo teste *t-Student* com um nível de confiança de 95 %, indica que não houve diferença significativa de resistência à compressão dos concretos com NTC (CAANTC015 e CAANTC030) em relação à referência (CAAREF).

*Tabela 5.3 – Resumo de resistência à compressão do concreto autoadensável por idade.*

Idade (dias)	Parâmetros	CAAREF	CAANTC015	CAANTC030
3	Resistência média (MPa)	37,44	35,82	37,18
	Desvio padrão (MPa)	1,93	0,86	2,19
	Coefficiente de variação (%)	5,15	2,39	5,90
	Diferença relação CAAREF (%)	-	-4,5	-0,7
7	Resistência média (MPa)	50,49	49,12	51,66
	Desvio padrão (MPa)	1,82	3,07	3,32
	Coefficiente de variação (%)	3,61	6,26	6,42
	Diferença relação CAAREF (%)	-	-2,8	2,3
28	Resistência média (MPa)	59,87	60,45	61,51
	Desvio padrão (MPa)	2,31	4,51	1,28
	Coefficiente de variação (%)	3,86	7,47	2,08
	Diferença relação CAAREF (%)	-	1,0	2,7

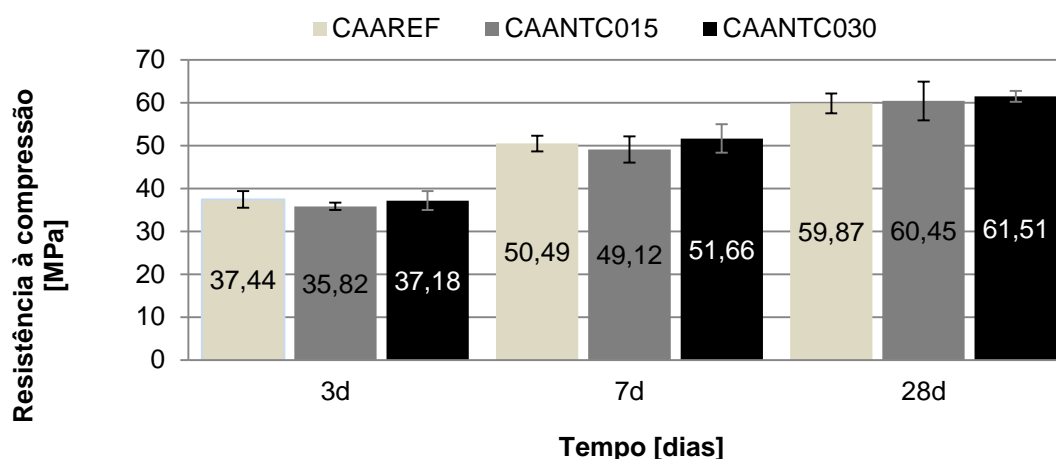


Figura 5.6 – Resultados de resistência à compressão do concreto autoadensável por idade.

Tabela 5.4 – Resumo de teste t-Student para resistência à compressão do concreto autoadensável por idade.

Idade (dias)	CAAREF x CAANTC015	CAAREF x CAANTC030	CAANTC015 x CAANTC030
3	CAAREF = CAANTC015	CAAREF = CAANTC030	CAANTC015 = CAANTC030
7	CAAREF = CAANTC015	CAAREF = CAANTC030	CAANTC015 = CAANTC030
28	CAAREF = CAANTC015	CAAREF = CAANTC030	CAANTC015 = CAANTC030

Ainda que não tenham apresentado ganhos significativos de resistência, os concretos com NTC tiveram resultados mais satisfatórios, não havendo diferenças como no caso do concreto convencional. Este fato se deve à composição dos concretos autoadensáveis: eles foram produzidos com relação água/cimento menor e com um aditivo superplastificante com função de espalhamento. Além disso, esse concreto possui um maior teor de argamassa e, conseqüentemente, um melhor empacotamento de partículas, promovendo maior interação com os NTC.

### 5.2.2 Resistência mecânica à tração por compressão diametral

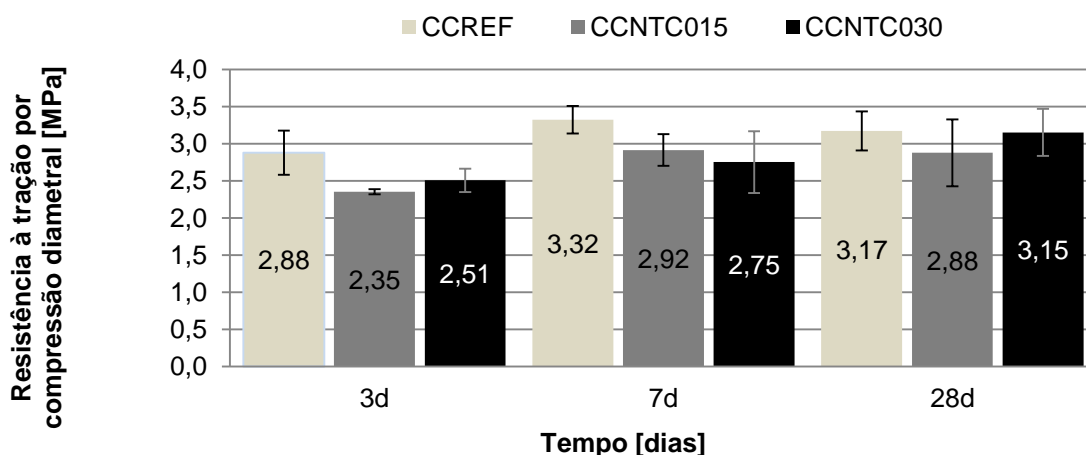
Ao se romper os corpos de prova para cada um dos concretos produzidos, e em cada uma das idades analisadas (3, 7 e 28 dias), foram realizados, em paralelo, os cálculos de resistência à tração por compressão diametral. Das cinco amostras

ensaiadas em cada idade de cada um dos concretos, uma foi descartada como *outlier* e quatro compuseram os resultados.

Para o concreto convencional, o resumo dos resultados de resistência mecânica à tração por compressão diametral está representado na Tabela 5.5 e no gráfico da Figura 5.7. Os resultados obtidos estão apresentados no Apêndice A. Já as análises estatísticas com o teste *t-Student* estão apresentadas resumidamente na Tabela 5.6 e mais detalhadamente no Apêndice D.

*Tabela 5.5 – Resumo de resistência à tração por compressão diametral do concreto convencional por idade.*

Idade (dias)	Parâmetros	CCREF	CCNTC015	CCNTC030
3	Resistência média (MPa)	2,88	2,35	2,51
	Desvio padrão (MPa)	0,30	0,03	0,16
	Coeficiente de variação (%)	10,36	1,40	6,29
	Diferença relação CCREF (%)	-	-22,6	-14,7
7	Resistência média (MPa)	3,32	2,92	2,75
	Desvio padrão (MPa)	0,19	0,21	0,42
	Coeficiente de variação (%)	5,60	7,31	15,14
	Diferença relação CCREF (%)	-	-13,7	-20,7
28	Resistência média (MPa)	3,17	2,88	3,15
	Desvio padrão (MPa)	0,26	0,45	0,32
	Coeficiente de variação (%)	8,31	15,66	10,03
	Diferença relação CCREF (%)	-	-10,1	-0,6



*Figura 5.7 – Resultados de resistência à tração por compressão diametral do concreto convencional por idade.*

Tabela 5.6 – Resumo de teste *t-Student* para resistência à tração por compressão diametral do concreto convencional por idade.

Idade (dias)	CCREF x CCNTC015	CCREF x CCNTC030	CCNTC015 x CCNTC030
3	CCREF > CCNTC015	CCREF > CCNTC030	CCNTC015 < CCNTC030
7	CCREF > CCNTC015	CCREF > CCNTC030	CCNTC015 = CCNTC030
28	CCREF = CCNTC015	CCREF = CCNTC030	CCNTC015 = CCNTC030

A avaliação dos resultados dos concretos convencional, aos 3 e 7 dias, realizada pelo teste *t-Student* com um nível de confiança de 95 %, revela que houve diminuição de valores de resistência à tração por compressão diametral dos traços com NTC (CCNTC015 e CCNTC030) em relação à referência (CCREF). Já na idade de 28 dias, todos os concretos apresentaram valores equivalentes de resistência à tração por compressão diametral.

Nota-se, entretanto, que o traço CCNTC030 foi o único que apresentou uma resistência sempre maior que o da idade anterior, não perdendo resistência entre os 7 e 28 dias, o que não ocorreu com o traço de referência (CCREF) e o outro traço com NTC (CCNTC015). Este fato sugere a realização de ensaios de resistência à tração em idades mais avançadas, com o objetivo de verificar a influência dos NTC nesta propriedade para o concreto convencional. Ademais, pode-se afirmar que, para uma relação água/cimento de 0,60, os NTC não produziram o efeito esperado no concreto convencional.

Estes resultados divergem da afirmação de Marcondes (2012), que obteve ganhos relevantes de resistências à tração por compressão diametral dos concretos analisados de até 19 % para um teor de água/cimento de 0,55 e para mistura física de 0,30 % de NTC ao concreto.

Para o concreto autoadensável, o resumo dos resultados de resistência à tração por compressão diametral está representado na Tabela 5.7 e no gráfico da Figura 5.8. Os resultados obtidos estão apresentados no Apêndice B. Já as análises estatísticas com o teste *t-Student* estão apresentadas resumidamente na Tabela 5.8 e com maior detalhamento no Apêndice D.

A avaliação comparativa dos resultados dos concretos autoadensáveis, realizada pelo teste *t-Student* com um nível de confiança de 95 %, mostra, aos 3 dias, um aumento significativo (Tabela 5.8) dos valores de resistência à tração por compressão diametral dos concretos com NTC em relação à referência (CAAREF): 28,1 % do CAANTC015 e 36,5 % do CAANTC030 como pode ser observado na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Resumo de resistência à tração por compressão diametral do concreto autoadensável por idade.

Idade (dias)	Parâmetros	CAAREF	CAANTC015	CAANTC030
3	Resistência média (MPa)	2,74	3,51	3,74
	Desvio padrão (MPa)	0,32	0,47	0,40
	Coefficiente de variação (%)	11,55	13,39	10,62
	Diferença relação CAAREF (%)	-	28,1	36,5
7	Resistência média (MPa)	3,32	3,76	4,17
	Desvio padrão (MPa)	0,53	0,27	0,43
	Coefficiente de variação (%)	16,11	7,11	10,20
	Diferença relação CAAREF (%)	-	13,3	25,6
28	Resistência média (MPa)	3,93	4,50	5,16
	Desvio padrão (MPa)	0,62	0,28	0,91
	Coefficiente de variação (%)	15,77	6,22	17,74
	Diferença relação CAAREF (%)	-	14,5	31,3

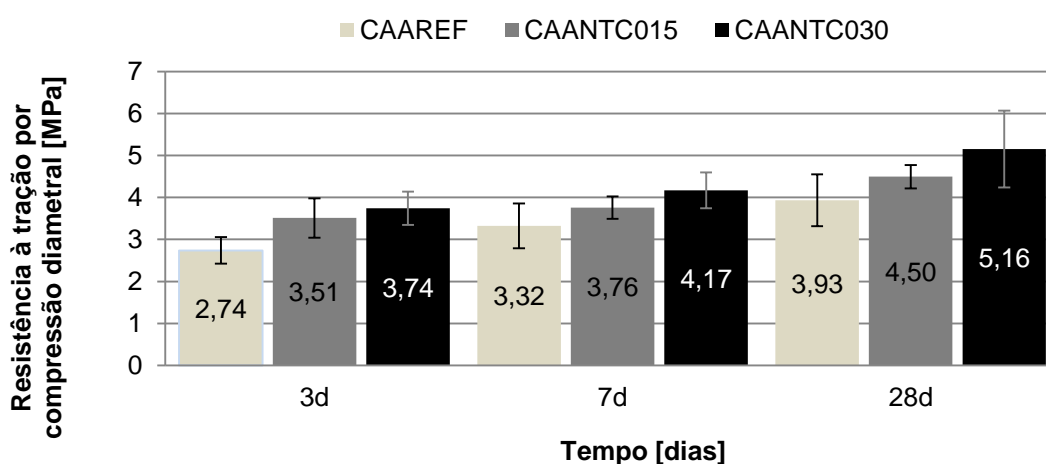


Figura 5.8 – Resultados de resistência à tração por compressão diametral do concreto autoadensável por idade.



*Tabela 5.8 – Resumo de teste t-Student para resistência à tração por compressão diametral do concreto autoadensável por idade.*

<b>Idade (dias)</b>	<b>CAAREF x CAANTC015</b>	<b>CAAREF x CAANTC030</b>	<b>CAANTC015 x CAANTC030</b>
<b>3</b>	CAAREF < CAANTC015	CAAREF < CAANTC030	CAANTC015 = CAANTC030
<b>7</b>	CAAREF = CAANTC015	CAAREF < CAANTC030	CAANTC015 = CAANTC030
<b>28</b>	CAAREF = CAANTC015	CAAREF < CAANTC030	CAANTC015 = CAANTC030

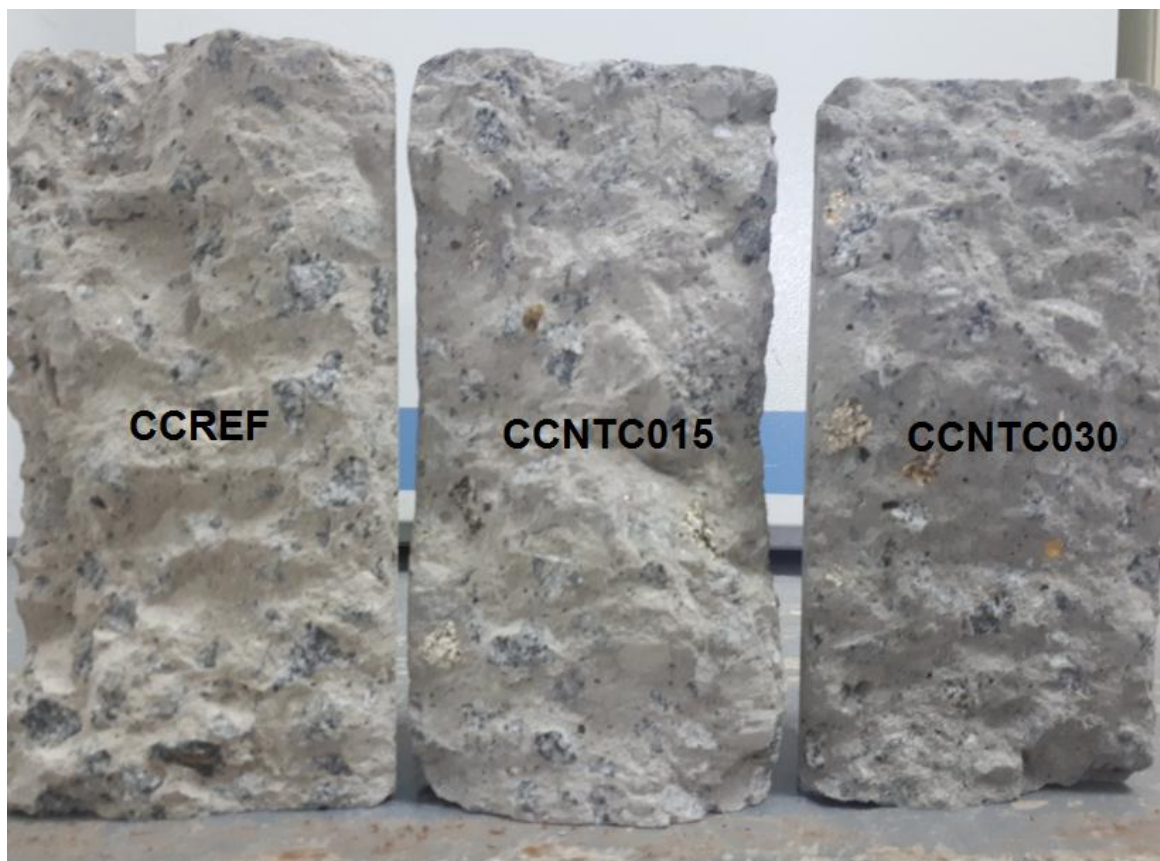
Os resultados aos 7 dias também evidenciaram um aumento de 13,3 % do concreto CAANTC015 em relação ao de referência (CAAREF) e de 25,6 % entre o CAANTC030 para a referência como pode ser observado na Tabela 5.7. Porém, verifica-se que essas diferenças são significativas entre o traço CAANTC030 e a referência (CAAREF), mas não entre o concreto CAANTC015 e a referência (CAAREF) nem como entre os concretos com NTC (CAANTC015 e CAANTC030).

Aos 28 dias, observou-se o mesmo comportamento encontrado na idade de 7 dias. Nota-se, ainda, um aumento progressivo de resistências entre os 3 e os 28 dias para todos os traços, fato não verificado com o concreto convencional. Esses resultados sugerem também a avaliação da resistência à tração em idades mais avançadas, de modo a verificar melhor o efeito da presença dos NTC.

Estes aumentos nas resistências à tração por compressão diametral nos traços com NTC se deram pelo fato dos concretos autoadensáveis terem sido produzidos com uma relação água/cimento (0,45), bem menor que o do traço convencional (0,60) e terem contado ainda com um aditivo superplastificante com função de espalhamento. Esse concreto possui um maior teor de argamassa e, conseqüentemente, um melhor empacotamento de partículas, promovendo maior interação com os NTC.

Os corpos de prova do concreto convencional rompidos no ensaio de resistência à tração por compressão diametral aos 3 dias estão apresentados na Figura 5.9. É possível notar a diferença de coloração, sendo o espécime de referência o mais claro, o NTC015 o de coloração um pouco mais escura e o NTC030 o mais escuro da figura. Além disso, é possível notar ruptura irregular, falta de aderência

e descolamento do agregado em alguns pontos dos CP's independentemente da presença ou não dos NTC.



*Figura 5.9 – Corpos de prova de concreto convencional rompidos em ensaio de resistência à tração por compressão diametral na idade de 3 dias.*

Estas diferenças de resultados encontrados chegam a ser até superiores aos de Marcondes (2012), que obteve ganhos relevantes de resistências à tração por compressão diametral dos concretos analisados de até 19 % para um teor de água/cimento de 0,55 e para mistura física de 0,30 % de NTC ao concreto.

### 5.2.3 Módulo de elasticidade

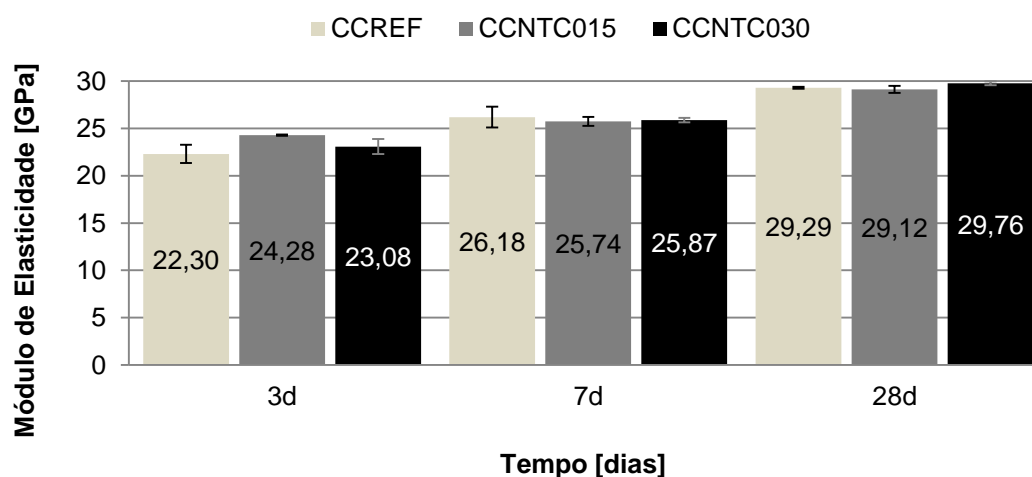
Paralelamente ao rompimento dos corpos de prova de cada um dos concretos confeccionados à compressão e à tração por compressão diametral, e em cada uma das idades analisadas (3, 7 e 28 dias), foram realizados os ensaios de módulo de elasticidade. Todas as 3 amostras ensaiadas foram escolhidas para compor os resultados deste ensaio. Depois de serem ensaiados quanto ao

módulo de elasticidade, os espécimes foram rompidos à compressão e compuseram os resultados daquele ensaio.

Para o concreto convencional, o resumo dos resultados de módulo de elasticidade está representado na Tabela 5.9 e no gráfico da Figura 5.10. Os resultados obtidos estão apresentados no Apêndice A. Já as análises estatísticas com o teste *t-Student* estão apresentadas resumidamente na Tabela 5.10 e com maior detalhamento no Apêndice E.

*Tabela 5.9 – Resumo de módulo de elasticidade do concreto convencional por idade.*

Idade (dias)	Parâmetros	CCREF	CCNTC015	CCNTC030
3	Módulo de elasticidade médio (GPa)	22,30	24,28	23,08
	Desvio padrão (GPa)	0,97	0,06	0,79
	Coefficiente de variação (%)	4,34	0,24	3,42
	Diferença relação CCREF (%)	-	8,87	3,5
7	Módulo de elasticidade médio (GPa)	26,18	25,74	25,87
	Desvio padrão (GPa)	1,09	0,47	0,25
	Coefficiente de variação (%)	4,18	1,83	0,95
	Diferença relação CCREF (%)	-	-1,71	-1,2
28	Módulo de elasticidade médio (GPa)	29,29	29,12	29,76
	Desvio padrão (GPa)	0,11	0,37	0,22
	Coefficiente de variação (%)	0,36	1,28	0,73
	Diferença relação CCREF (%)	-	-0,6	1,6



*Figura 5.10 – Resultados de módulo de elasticidade do concreto convencional por idade.*

A avaliação dos resultados do concreto convencional, aos 3 dias, realizada pelo teste *t-Student* com um nível de confiança de 95 %, mostra que houve ganhos significativos de 8,87 % do concreto CCNTC015 em relação à referência (CCREF), como pode ser observado na Tabela 5.10. Também foi observada uma melhoria de 3,5 % do concreto CCNTC030 em comparação ao concreto CCREF. Entretanto, este ganho não foi representativo.

Aos 7 dias, o concreto de referência apresentou melhores resultados que os espécimes contendo NTC. Já aos 28 dias, o concreto CCNTC030 se comportou ligeiramente melhor que a referência (CCREF), apontando uma pequena melhoria de 1,6 %. Estes resultados sugerem também a avaliação do módulo de elasticidade em idades mais avançadas, principalmente para maiores concentrações de NTC, visto que a melhoria de resultados é evidenciada e consolidada com o avanço do tempo.

Esta igualdade de resultados de módulo de elasticidade é importante, dentre outros fatores, pois mostra que os NTC não influenciaram no módulo de elasticidade do concreto. Tal fato é preponderante, por exemplo, por estar diretamente relacionado à idade de retirada do cimbramento em obra.

*Tabela 5.10 – Resumo de teste t-Student para módulo de elasticidade do concreto convencional por idade.*

<b>Idade (dias)</b>	<b>CCREF x CCNTC015</b>	<b>CCREF x CCNTC030</b>	<b>CCNTC015 x CCNTC030</b>
<b>3</b>	CCREF < CCNTC015	CCREF = CCNTC030	CCNTC015 > CCNTC030
<b>7</b>	CCREF = CCNTC015	CCREF = CCNTC030	CCNTC015 = CCNTC030
<b>28</b>	CCREF = CCNTC015	CCREF < CCNTC030	CCNTC015 < CCNTC030

Para o concreto autoadensável, o resumo dos resultados de módulo de elasticidade está representado na Tabela 5.11 e no gráfico da Figura 5.11. Os resultados obtidos estão apresentados no Apêndice B. Já as análises estatísticas com o teste *t-Student* estão apresentadas resumidamente na Tabela 5.12 e com maior detalhamento no Apêndice E.

Tabela 5.11 – Resumo de módulo de elasticidade do concreto autoadensável por idade.

Idade (dias)	Parâmetros	CAAREF	CAANTC015	CAANTC030
3	Módulo de elasticidade médio (GPa)	25,55	27,06	25,11
	Desvio padrão (GPa)	0,36	0,64	0,14
	Coefficiente de variação (%)	1,42	2,35	0,55
	Diferença relação CAAREF (%)	-	5,91	-1,75
7	Módulo de elasticidade médio (GPa)	28,64	30,92	27,59
	Desvio padrão (GPa)	0,61	1,13	1,15
	Coefficiente de variação (%)	2,12	3,65	4,18
	Diferença relação CAAREF (%)	-	7,96	-3,8
28	Módulo de elasticidade médio (GPa)	34,35	34,66	30,93
	Desvio padrão (GPa)	1,12	0,32	0,8
	Coefficiente de variação (%)	3,26	0,93	2,59
	Diferença relação CAAREF (%)	-	0,9	-11,05

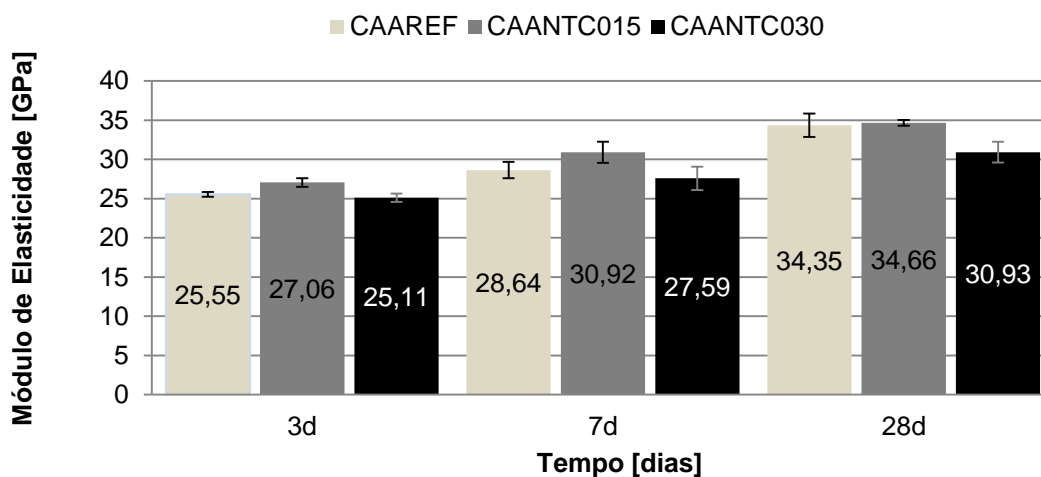


Figura 5.11 – Resultados de módulo de elasticidade do concreto autoadensável por idade.

Tabela 5.12 – Resumo de teste *t-Student* para módulo de elasticidade do concreto autoadensável por idade.

Idade (dias)	CAAREF x CAANTC015	CAAREF x CAANTC030	CAANTC015 x CAANTC030
3	CAAREF < CAANTC015	CAAREF = CAANTC030	CAANTC015 > CAANTC030
7	CAAREF < CAANTC015	CAAREF = CAANTC030	CAANTC015 > CAANTC030
28	CAAREF = CAANTC015	CAAREF > CAANTC030	CAANTC015 > CAANTC030

A avaliação dos resultados do concreto autoadensável, aos 3 dias, realizada pelo teste *t-Student* com um nível de confiança de 95 %, mostra que houve um

aumento de 5,91 % do traço CAANTC015 para o traço CAAREF. Já para o traço CAANTC030 em relação ao traço CAAREF, houve diminuição de valores, como pode ser observado na Figura 5.11. Observando a Tabela 5.12, verifica-se que as diferenças são significativas para as comparações entre o traço CAANTC015 em relação à referência (CAAREF).

Os resultados aos 7 dias também evidenciaram um aumento de 7,96 % do traço CAANTC015 com relação ao traço de referência (CAAREF), o que também pode ser observado na Figura 5.11. Observando a Tabela 5.12, verifica-se que as diferenças são significativas entre o traço CAANTC015 e a referência (CAAREF). Quando comparados os traços de CAANTC030 e a referência (CAAREF), observa-se que há uma diminuição de valores.

Aos 28 dias, não houve um aumento significativo de valores do traço CAANTC015 para o traço CAAREF, além de ter ocorrido uma diminuição entre o traço CAANTC030 e o CAAREF, como pode ser observado no gráfico da Figura 5.11 e na Tabela 5.12.

Pela observação dos três traços, pode-se inferir que há uma melhora de resultados nas primeiras idades para o traço CAANTC015 em relação à referência (CAAREF), fato que pode ser extremamente útil em obras que determinam desforma rápida de suas peças para continuidade da produção de uma estrutura de concreto armado, por exemplo.

Finalizando as análises de módulo de elasticidade para o concreto autoadensável, pode-se notar que, para todas as idades, houve um aumento de valores do traço CAANTC015 e o traço CAAREF e uma diminuição entre este último traço e o traço CAANTC030. Este fato demonstra que pode haver limitação para a utilização de teores maiores de NTC para esta propriedade, visto que o traço CAANTC030 apresentou-se como o resultado mais baixo entre todos os três, e nas três idades estudadas (3, e 7 e 28 dias).

#### 5.2.4 Determinação da absorção de água por capilaridade

Para cada tipo de concreto analisado (convencional e autoadensável) foi utilizado 1 CP de cada teor: um de referência (CCREF e CAAREF), um com 0,15 % de NTC (CCNTC015 e CAANTC015) e um com 0,30 % de NTC (CCNTC030 e CAANTC030). Cada CP foi serrado em três partes iguais, sendo classificadas em: parte superior, parte do meio e parte inferior. Feito isso, houve uma totalização de 3 CP's menores de 60 x 100 mm por teor e por concreto, que foram ensaiados. Em seguida, procedeu-se o teste como já descrito anteriormente.

Para o concreto convencional, pela Tabela 5.13 e pelo gráfico da Figura 5.12, pode-se notar a evolução da média de água absorvida por capilaridade versus o tempo de realização do ensaio. Nota-se que ao final das 72 horas, tempo de realização completa do ensaio, os três concretos apresentaram absorções muito próximas, ficando entre 0,62 e 0,65 g/cm<sup>2</sup>, não havendo, portanto, variações significativas nas absorções de água por capilaridade. Observa-se também que a taxa de absorção foi muito maior nas primeiras três primeiras horas de ensaio (absorção média de aproximadamente 35 % do valor final) e decresceu com o passar do tempo. Adicionalmente, é importante perceber que houve uma estabilização de valores de absorção de água já iniciada nas 48 horas do ensaio.

Tabela 5.13 – Valor médio da absorção de água por capilaridade por intervalo de tempo do concreto convencional.

Tempo (h)	CCREF	CCNTC015 (g/cm <sup>2</sup> )	CCNTC030
0	0,00	0,00	0,00
1	0,12	0,12	0,13
2	0,17	0,18	0,20
3	0,21	0,22	0,24
4	0,24	0,25	0,27
5	0,27	0,28	0,30
6	0,29	0,30	0,33
24	0,55	0,56	0,61
48	0,62	0,62	0,65
72	0,63	0,62	0,65

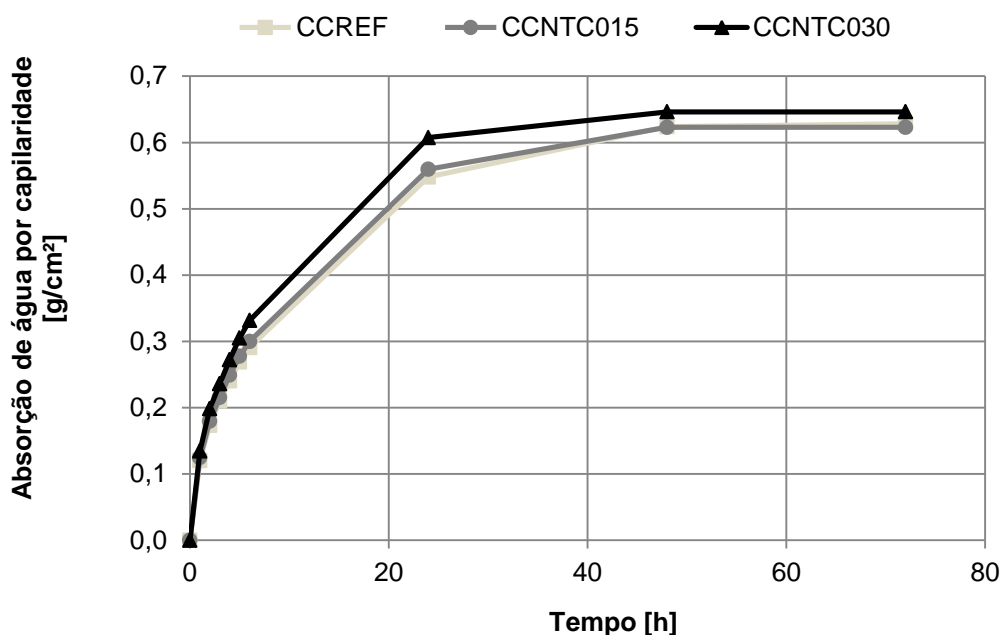


Figura 5.12 – Valor médio de absorção de água por capilaridade por intervalo de tempo do concreto convencional.

Para o concreto autoadensável, pela Tabela 5.14 e pelo gráfico da Figura 5.13, pode-se notar a evolução da média de água absorvida por capilaridade versus o tempo do ensaio. Nota-se que ao final das 72 horas do ensaio, os traços com NTC (CAANTC015 e CAANTC030) apresentaram uma diminuição da absorção de água por capilaridade em 9,52 % com relação à referência (CAAREF). Por se tratar de ascensão capilar, sugere-se que tal fato possa estar relacionado à redução do tamanho dos poros interconectados do concreto devido à presença dos NTC.

Tabela 5.14 – Valor médio da absorção de água por capilaridade por intervalo de tempo do concreto autoadensável.

Tempo (h)	CAAREF (g/cm <sup>2</sup> )	CAANTC015 (g/cm <sup>2</sup> )	CAANTC030 (g/cm <sup>2</sup> )
0	0,00	0,00	0,00
1	0,06	0,06	0,06
2	0,09	0,08	0,09
3	0,11	0,10	0,10
4	0,13	0,12	0,12
5	0,14	0,13	0,13
6	0,15	0,15	0,15
24	0,29	0,26	0,27
48	0,39	0,35	0,36
72	0,46	0,42	0,42



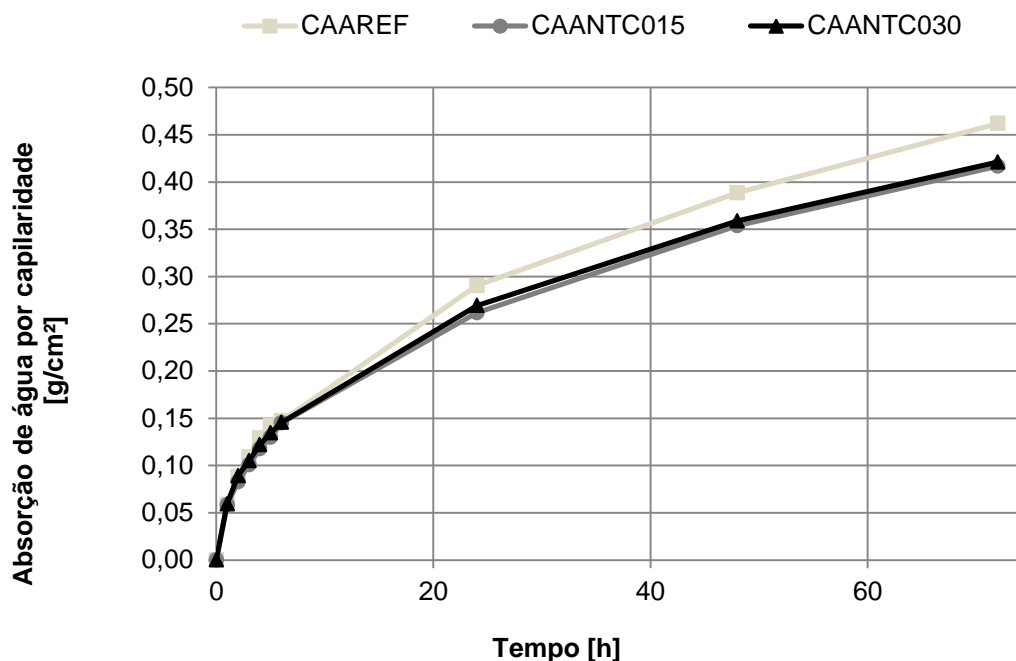


Figura 5.13 – Valor médio de absorção de água por capilaridade por intervalo de tempo do concreto autoadensável.

Os resultados de absorção de água por capilaridade para o concreto autoadensável divergem dos resultados de Marcondes (2012), que obteve menor absorção de água por capilaridade para a referência, quando comparado aos traços com NTC.

Comparando-se diretamente a absorção de água por capilaridade dos dois concretos estudados, pode-se perceber que houve uma melhoria de resultados de concretos com NTC em relação à referência para o concreto autoadensável (diminuição de absorção de água em 9,52 % com relação à referência). O mesmo não aconteceu para o concreto convencional, que não apresentou melhorias. Tal fato é decorrente da menor relação água/cimento do concreto autoadensável, de 0,45, contra 0,60 do concreto convencional, que tende a promover um menor número de vazios no concreto. Além disso, esse concreto possui um maior teor de argamassa e, conseqüentemente, um melhor empacotamento de partículas, promovendo maior interação com os NTC.

Comparando-se também a média dos três valores encontrados no concreto convencional, chega-se a 0,63 g/cm<sup>2</sup>, enquanto que para o concreto

autoadensável a média destes valores fica em 0,43 g/cm<sup>2</sup>. Portanto, pode-se perceber como o concreto autoadensável trabalhou melhor com os NTC, em comparação ao concreto convencional. Além disso, observa-se a importância da diminuição da relação água/cimento para o concreto e da utilização de um aditivo de espalhamento para que este concreto cumpra sua função.

#### *5.2.5 Determinação da absorção de água por imersão*

Para o ensaio de absorção de água por imersão, o número de CP'S foi o mesmo e estes foram preparados tal como no ensaio de determinação de absorção de água por capilaridade para cada tipo de concreto analisado (convencional e autoadensável).

Para o concreto convencional, pela Tabela 5.15 e pelo gráfico da Figura 5.14, pode-se notar a evolução da média de água absorvida por imersão versus o tempo de realização do ensaio. Nota-se que ao final das 102 horas, tempo de realização completa do ensaio, incluindo a pesagem pós-resfriamento, os três traços não apresentaram variações nas absorções por imersão, ficando com 1,05 g/cm<sup>2</sup>, desde as 24 horas de ensaio. Mesmo com a fervera dos CP's, não houve aumento de absorção, o que indica que todos os poros acessíveis foram preenchidos nas primeiras 6 horas do teste. Adicionalmente, é importante perceber que houve uma estabilização de valores de absorção de água já iniciada nas cinco primeiras horas do ensaio.

Tabela 5.15 – Valor médio da absorção de água por imersão por intervalo de tempo do concreto convencional.

Tempo (h)	CCREF	CCNTC015 (g/cm <sup>2</sup> )	CCNTC030
0	0,00	0,00	0,00
1	1,03	1,03	1,03
2	1,03	1,03	1,04
3	1,04	1,04	1,04
4	1,04	1,04	1,05
5	1,05	1,04	1,05
6	1,05	1,04	1,05
24	1,05	1,05	1,05
48	1,05	1,05	1,05
72	1,05	1,05	1,05
102	1,05	1,05	1,05

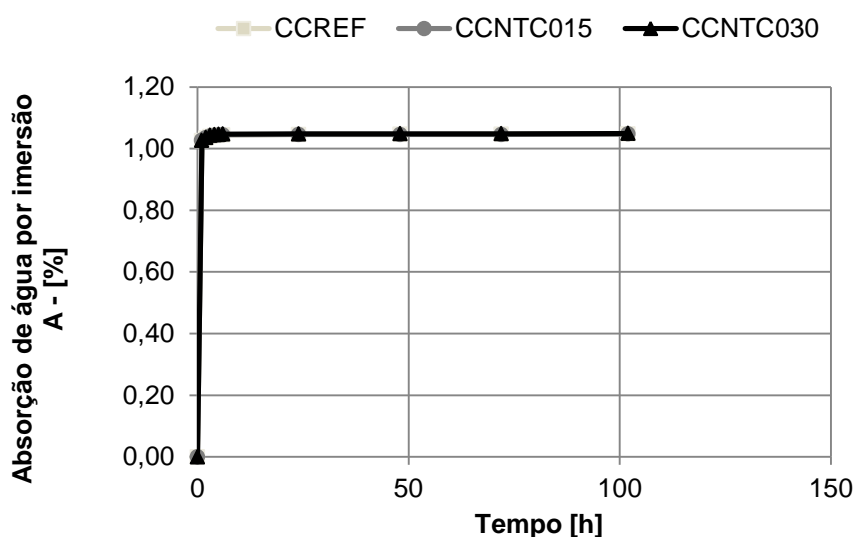


Figura 5.14 – Valor médio de absorção de água por imersão por intervalo de tempo do concreto convencional.

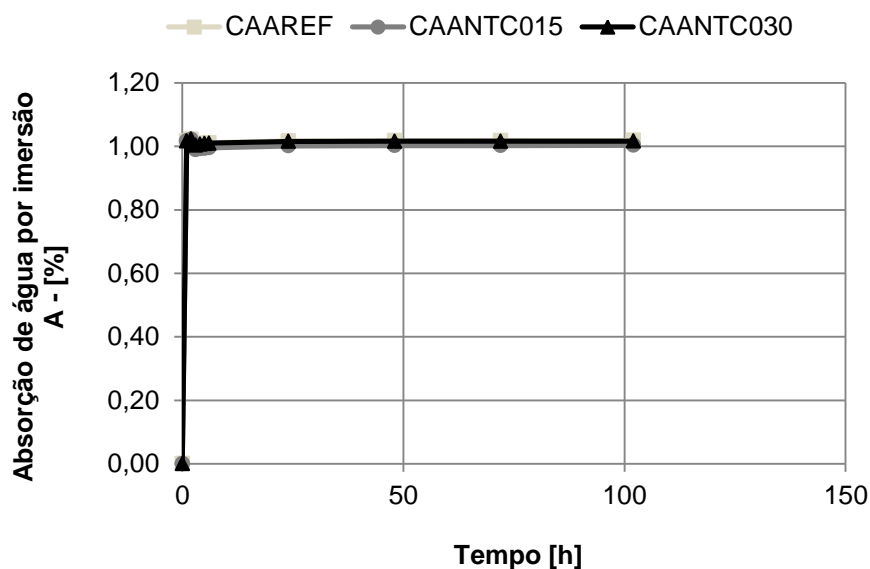
Para o concreto autoadensável, pela Tabela 5.16 e pelo gráfico da Figura 5.15, pode-se observar a evolução da média de água absorvida por imersão versus o tempo de realização do ensaio. Nota-se que ao final das 102 horas do ensaio, incluído o tempo de fervura e resfriamento dos CP's para posterior pesagem, os traços variaram de 1,00 a 1,02 g/cm<sup>2</sup>.

Não houve, portanto, uma diminuição significativa da absorção por imersão dos concretos com NTC, comparativamente ao concreto de referência. Da mesma

forma que o concreto convencional, os CP's do concreto autoadensável estabilizaram suas absorções por imersão desde as 24 horas do ensaio, indicando que todos os poros acessíveis foram preenchidos nas primeiras 6 horas do teste.

*Tabela 5.16 – Valor médio da absorção de água por imersão por intervalo de tempo do concreto autoadensável.*

Tempo (h)	CCREF	CCNTC015 (g/cm <sup>2</sup> )	CCNTC030
0	0,00	0,00	0,00
1	1,02	1,02	1,02
2	1,02	1,02	1,02
3	1,00	0,99	1,00
4	1,01	0,99	1,01
5	1,01	0,99	1,01
6	1,01	1,00	1,01
24	1,02	1,00	1,02
48	1,02	1,00	1,02
72	1,02	1,00	1,02
102	1,02	1,00	1,02



*Figura 5.15 – Valor médio da absorção de água por imersão por intervalo de tempo do concreto autoadensável.*

Comparando-se diretamente a absorção de água por imersão dos dois concretos estudados, pode-se perceber que não houve uma melhoria de resultados de concretos com NTC em relação às referências, apesar do concreto autoadensável

apresentar menor relação água/cimento (0,45 versus 0,60) e um maior teor de argamassa do que o concreto convencional.

Comparando-se também a média dos três valores encontrados no concreto convencional, chega-se a 1,05 g/cm<sup>2</sup>, enquanto que para o concreto autoadensável a média fica em 1,01 g/cm<sup>2</sup>. Apesar de o concreto autoadensável apresentar melhores resultados que o concreto convencional, a diferença não se mostrou significativa como no ensaio de absorção de água por capilaridade. Este é um indicativo de que o ensaio pode ter sido inadequado, já que não acusou variação entre os concretos, mesmo com relação água/cimento tão distintas e apesar do aditivo de espalhamento utilizado no concreto autoadensável.

#### *5.2.6 Avaliação da microestrutura dos concretos*

Para avaliar a microestrutura dos concretos deste estudo foi realizada uma análise de fragmentos de corpos de prova rompidos à compressão. A seguir são apresentadas algumas imagens feitas pelo microscópio eletrônico de varredura (MEV) dos concretos convencional e autoadensável aos 28 dias de idade.

##### *Concreto convencional*

A Figura 5.16 mostra imagem do traço de referência do concreto convencional (CCREF). Na Figura 5.16-a, notam-se os produtos de hidratação do concreto semelhantes à portlandita e ao C-S-H, ampliados e apontados pelas setas da Figura 5.16-b.

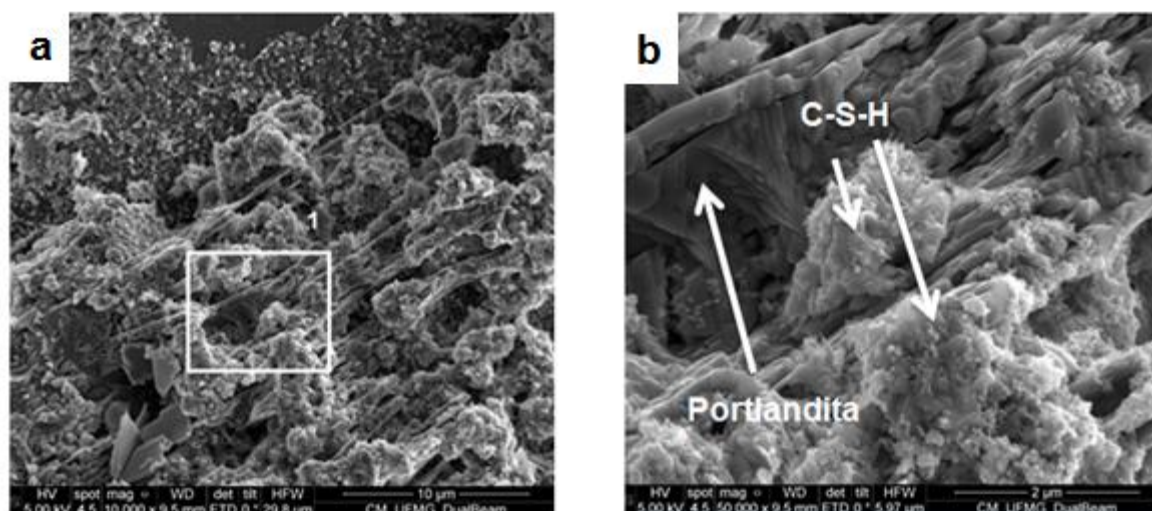


Figura 5.16 – Imagens de MEV do traço de referência do concreto convencional (CCREF): a) amostra rompida à compressão e, b) ampliação da área 1.

A Figura 5.17 apresenta imagem do traço com 0,15 % de NTC do concreto convencional (CCNTC015). Na Figura 5.17-a, notam-se as presenças da etringita e dos NTC, ampliadas e apontadas pelas setas da Figura 5.17-b.

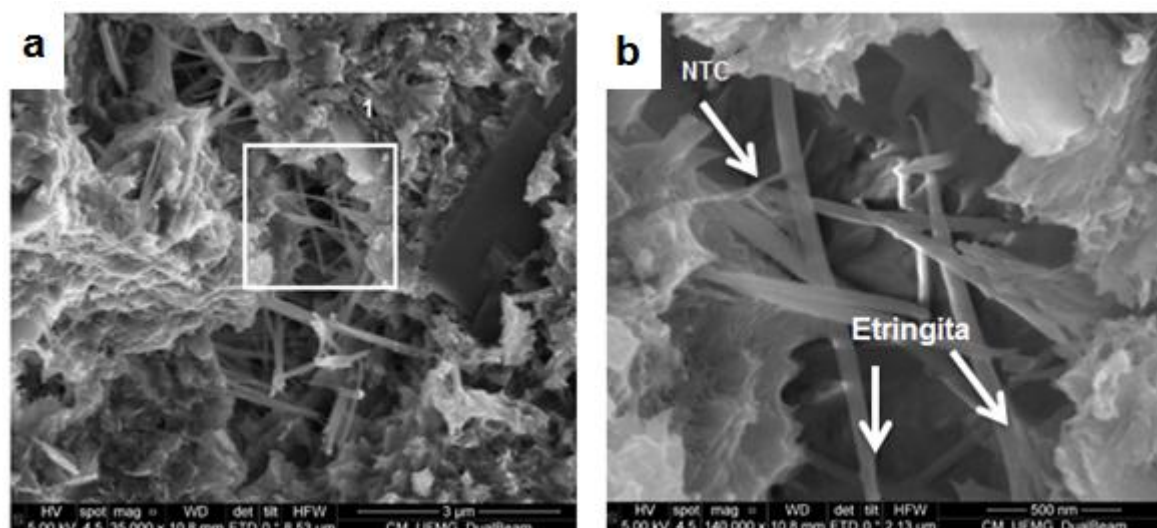


Figura 5.17 – Imagens de MEV do traço com 0,15 % de NTC do concreto convencional (CCNTC015): a) amostra rompida à compressão; b) ampliação da área 1.

A Figura 5.18 apresenta imagem do traço com 0,30 % de NTC do concreto convencional (CCNTC030). Na Figura 5.18-a, nota-se a presença dos NTC, de etringita e de produtos do C-S-H. Os NTC podem ser vistos na Figura 5.18-b, servindo de reforço (seta para baixo) e expostos (setas para cima).

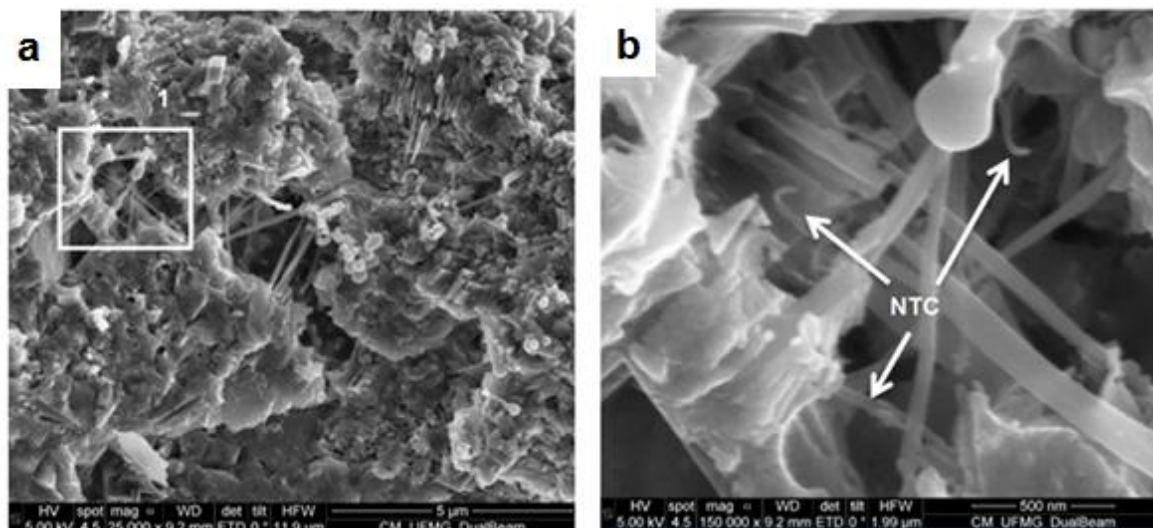


Figura 5.18 – Imagens de MEV do traço com 0,30 % de NTC do concreto convencional (CCNTC030): a) amostra rompida à compressão; b) ampliação da área 1.

#### Concreto autoadensável

A Figura 5.19 mostra imagem do traço de referência do concreto autoadensável (CAAREF). Na Figura 5.19-a, notam-se os produtos de hidratação do concreto como a etringita e o C-S-H, ampliados e apontados pelas setas da Figura 5.19-b, além da ZTI e de agregados miúdos.

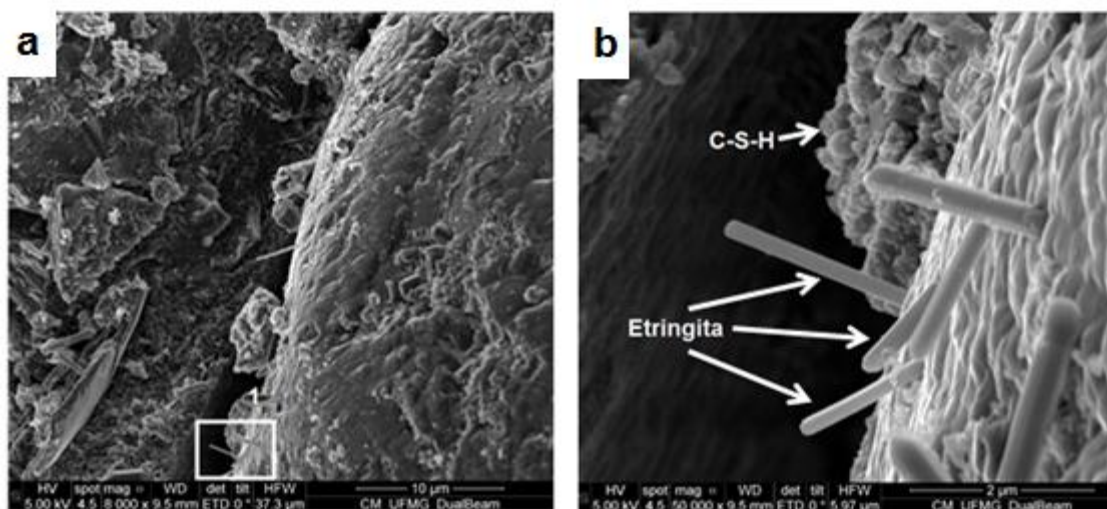


Figura 5.19 – Imagens de MEV do traço de referência do concreto autoadensável (CAAREF): a) amostra rompida à compressão; b) ampliação da área 1.

A Figura 5.20 apresenta imagem do traço com 0,15 % de NTC do concreto autoadensável (CAANTC015). Na Figura 5.20-a, nota-se a ancoragem promovida pelo NTC, e as setas da Figura 5.20-b indicam o “efeito de costura” em uma fissura.

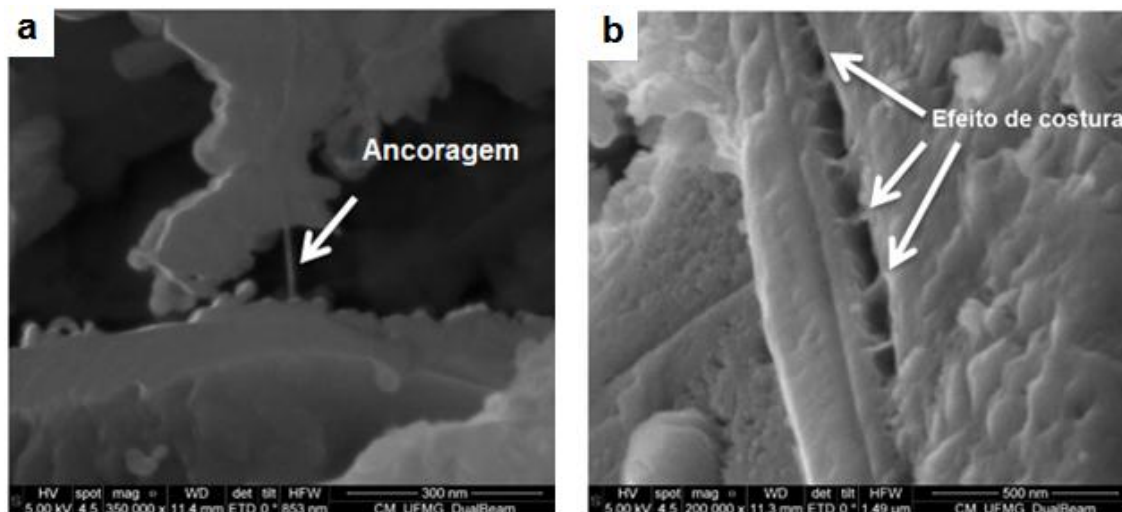


Figura 5.20 – Imagens de MEV do traço com 0,15 % de NTC do concreto autoadensável (CAANTC015): a) ancoragem por NTC; b) efeito de costura promovido por NTC.

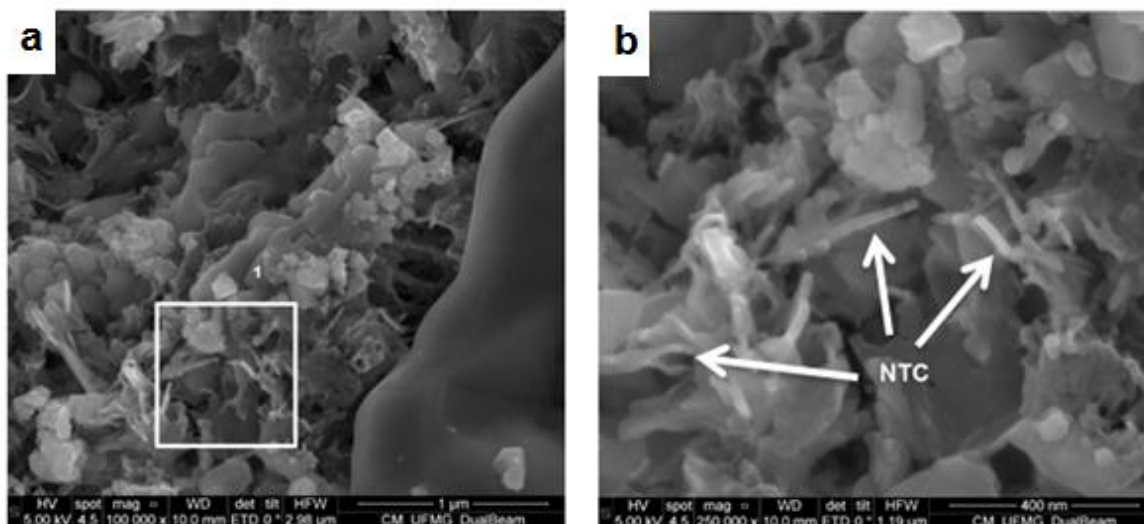


Figura 54 – Imagens de MEV do traço com 0,30 % de NTC do concreto autoadensável (CAANTC030): a) amostra rompida à compressão; b) ampliação da área 1.

A Figura 5.21 mostra imagem do traço com 0,30 % de NTC do concreto autoadensável (CAANTC030). Na Figura 5.21-a, nota-se a presença dos NTC em meio aos demais produtos de hidratação do cimento. Já a Figura 5.21-b, que é uma ampliação da Figura 5.21-a, apresenta os NTC mais nitidamente.



## 6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Iniciando pela análise da trabalhabilidade dos concretos realizados deste estudo, observou-se que os NTC não influenciaram, tanto o concreto convencional, quanto o autoadensável. Isso mostrou que, independentemente da adição realizada, o manuseio da massa não sofreu alterações. Isso é plenamente satisfatório, porque mostra que é possível trabalhar com o cimento com clínquer nanoestruturado, garantindo as mesmas condições de trabalhabilidade dos concretos produzidos com cimento Portland convencional, não comprometendo os processos na obra. As diferenças dos resultados obtidos no *slump test*, no *slump flow test* e no teste de teor de ar incorporado pelo método pressométrico não alteraram estatisticamente a trabalhabilidade dos concretos estudados: convencional e autoadensável.

Sobre a resistência à compressão, que ainda serve de parâmetro para muitos engenheiros e calculistas no tocante à qualidade de uma obra estrutural, para o concreto convencional não houve melhoria significativa de resultados para concretos com NTC em comparação ao preparado como referência.

Para o concreto autoadensável, a resistência à compressão também não apresentou ganhos em relação ao concreto de referência (CAAREF). Entretanto, os valores ficaram bem mais similares entre concretos com e sem NTC no concreto autoadensável do que no concreto convencional. Tal fato indica que houve uma melhor dispersão dos NTC a um concreto com menor relação água/cimento (0,45), a um aditivo com função espalhadora e um maior empacotamento de partículas em detrimento ao concreto com maior relação água/cimento (0,60).

Quanto à resistência à tração por compressão diametral, a adição de NTC não provocou melhorias no desempenho no concreto convencional, tanto no traço CCNTC015, quanto no traço CCNTC030. Todavia, como pode ser observado no traço CCNTC015 na comparação com o traço CCREF, a diferença de valores entre eles tende a diminuir com o passar do tempo. Aos 3 dias a diferença foi de 22,7 %, enquanto que aos 7 dias foi de 13,7 % e aos 3 dias foi de 10,1 %.

Já na comparação entre o traço CCNTC030 com o traço CCREF, houve uma diminuição de valores com o avanço da idade dos concretos, ainda que este fato não tenha acontecido linearmente. Aos 3 dias a diferença era de 14,7 %, passando a 20,7 % aos 7 dias e praticamente se igualando à referência aos 28 dias, com apenas 0,6 % de diferença. Este resultado sugere uma necessidade de verificação em concretos convencionais nas idades mais avançadas para estudos futuros.

Foi na resistência à tração por compressão diametral do concreto autoadensável que esta pesquisa demonstrou os melhores resultados ao adicionar os NTC a concretos. As melhorias de resistências à tração, tanto nas primeiras idades, quanto nas mais avançadas que foram analisadas, demonstraram claro desenvolvimento provocado pelos NTC, tanto no traço CAANTC015, com ganhos de até 28,1 % aos 3 dias, quanto no traço CAANTC030 com até 36,5 % nos mesmos 3 dias e 31,3 % aos 28 dias. Estes resultados demonstram a real possibilidade de caminhamento das pesquisas na direção da evolução desta importante característica mecânica, que impulsionaria o concreto a ser cada vez menos dependente do aço, provocando consideráveis economias na utilização deste insumo metálico.

A respeito do módulo de elasticidade, os ganhos mais representativos para o concreto convencional ficaram por conta da diferença de 8,87 % na idade de 3 dias do concreto CCNTC015 em relação ao traço de referência. Já aos 28 dias, o concreto CCNTC030 teve resultados 1,6 % superiores à referência, o que mostra a necessidade de se estudar esta característica em maiores concentrações de NTC e em idades mais avançadas, uma vez que a melhoria de resultados foi demonstrada com o passar do tempo, depois de ter sofrido diminuição de valores aos 7 dias.

Para o concreto autoadensável, o módulo de elasticidade foi melhorado para o concreto CAANTC015 em 5,91 % em relação ao traço de referência (CAAREF) aos 3 dias. Aos 7 dias, a melhoria do traço CAANTC015 em relação à referência foi de 7,96 %. Tais resultados mostram a necessidade do estudo em maiores

prazos desde a moldagem para consolidação de resultados de módulo de elasticidade no concreto autoadensável. Entretanto, sugere-se que, para esta propriedade, os NTC sejam utilizados em doses menores.

Importante destacar que os resultados equivalentes de módulo de elasticidade são fundamentais para comprovar que os NTC não influenciaram esta propriedade do concreto. Isto merece destaque, principalmente nas baixas idades, porque está relacionado diretamente à idade de retirada de escoramento.

É preciso observar o caminho que os estudos vão, passo a passo, indicando. Com relação às resistências mecânicas, o concreto autoadensável se mostrou plenamente um candidato à utilização dos NTC. O concreto convencional, por sua vez, não demonstrou o mesmo desempenho. Da mesma forma, a quantidade de NTC utilizada precisa ser reavaliada. Para os melhores resultados desta pesquisa, que foram os da resistência à tração por compressão diametral do concreto autoadensável, as maiores diferenças com relação ao concreto de referência ficaram por conta do traço CAANTC030. Este indicativo, mostra que é prudente uma continuidade dos estudos com maiores teores de NTC. Já para este mesmo concreto, o mesmo não ocorreu para o módulo de elasticidade: o traço CAANTC015 apresentou maiores ganhos.

A respeito dos testes de absorção de água, o ensaio de capilaridade para o concreto convencional foi pouco efetivo e o ganho foi de apenas 1,61 % do traço CCNTC015 para o traço CCREF. Já para o concreto autoadensável, o resultado foi melhor e os espécimes que continham NTC, sendo estes o CAANTC015 e o CAANTC030, absorveram 9,52 % menos água do que o traço de referência (CAAREF). Sugere-se que tal resultado seja devido à menor permeabilidade do concreto com a presença dos NTC.

Já para o ensaio de imersão, para o concreto convencional não houve variações nas medições realizadas. Isso demonstrou que os concretos, tanto com NTC quanto as referências (sem NTC), não absorveram água de forma desigual. Da mesma forma se comportaram os espécimes testados com e sem NTC no concreto autoadensável. Apenas um ganho de 2 % favorável aos concretos com

NTC, mas que não foram significativos. Este fato, somado ao fato de os espécimes terem se saturado ainda em poucas horas de ensaio, mostram que o ensaio pode ter sido ineficaz para esta avaliação.

Os testes de absorção de água por capilaridade (exceto pelo concreto autoadensável) e por imersão não foram totalmente efetivos para a mensuração de absorção de água. Foi percebido que houve estabilização de valores de absorção de água, algumas vezes iniciadas bem antes do prazo final do ensaio, demonstrando certa insuficiência e inadequação de tamanho dos CP's para os testes. Para uma avaliação mais adequada, novos ensaios deverão ser realizados com CP's inteiros e destinados exclusivamente para estes testes, e não serrados, como fora realizado nesta pesquisa.

Pelas imagens feitas no MEV e mostradas neste estudo, pode-se observar claramente o papel preponderante dos NTC nas ZTI dos concretos realizados neste trabalho. Nestas imagens, especialmente nas Figuras 5.20-a e 5.20-b, é possível notar o “efeito de costura” e a ancoragem dos NTC, contribuindo para a diminuição da formação e propagação de macroporos e aumento de sua conectividade.

Outro fato notado neste trabalho foi que, em termos gerais, os NTC sintetizados diretamente sobre o clínquer tenderam a ser mais efetivos em misturas com relação água/cimento menor.

Os estudos, como este, sobre o efeito de nanotubos de carbono (NTC) em concreto ainda são incipientes. Resultados de outras pesquisas feitas em diversas partes do mundo relatam que há muito ainda para ser pesquisado e desenvolvido nesta área. Nesse sentido, Rashad (2017) enfatiza que as pesquisas relacionadas às resistências do concreto estão ainda no início, se comparadas às pesquisas feitas com argamassa ou pasta de cimento. De todas as pesquisas levantadas nesse estudo, apenas 15,52 % se referem ao concreto, enquanto as de argamassa representam 36,21 % dos estudos e as de pasta 48,3 %. Isto demonstra que são necessários mais estudos para que se possa investigar com

segurança os efeitos dos NTC na trabalhabilidade, na resistência, na durabilidade e na absorção de água de concretos.

Não restam dúvidas que a nanotecnologia chegou para ajudar sobremaneira o desempenho dos materiais de construção civil. Aos poucos, uma revolução tem sido observada, com o emprego cada vez maior de materiais de tamanho cada vez menor que promovem melhorias no desempenho mecânico e na durabilidade, bem como redução no consumo, além de terem seus custos adequados a um dos mercados que mais consome insumos, que é o mercado da construção.

Neste mercado, está o material de construção mais amplamente consumido, que é o concreto. Com o advento do emprego da nanotecnologia, este compósito tende a aumentar sua utilização, já que a progressão dos estudos irá levá-lo a usos que ainda hoje são improváveis para o concreto comum, como, por exemplo, uma maior exploração de suas propriedades de tração. Como pode ser observado nesta pesquisa, melhoria sensível de resultados foi obtida nesta propriedade do concreto autoadensável com NTC, indicando ser totalmente factível seu aperfeiçoamento, bem como a redução de absorção de água.

Fator adicional que chama a atenção, é que os NTC vem se tornando mais baratos ano após ano. E o melhor é que o clínquer nanoestruturado produzido pelo CTNano, promete baixar ainda mais estes custos, tornando a produção de cimento nanoestruturado plenamente possível em pouco tempo e abrindo espaço para uma utilização sólida deste produto no mercado.

Tendo como base os resultados apresentados neste estudo, é possível dispor algumas sugestões para trabalhos futuros em concretos com NTC:

- Priorizar novos estudos de emprego de NTC sintetizados diretamente sobre o clínquer no concreto autoadensável, em detrimento ao concreto convencional;
- Avaliar concretos com menores relações água/cimento do que os estudados nesta pesquisa;

- Verificar o comportamento de concretos produzidos com NTC sintetizados diretamente sobre o clínquer em teores superiores aos utilizados nesta pesquisa;
- Analisar o comportamento de concretos com NTC sintetizados diretamente sobre o clínquer em idades mais avançadas (60 e 90 dias) às verificadas neste estudo;
- Realizar ensaios de reometria de fluxo não confinado em concretos com NTC sintetizados diretamente sobre o clínquer;
- Avaliar a Zona de Transição Intersticial (ZTI) de concretos com NTC sintetizados diretamente sobre o clínquer;
- Estudar o comportamento de concretos com NTC sintetizados diretamente sobre o clínquer no tocante à carbonatação e à penetração de cloretos;
- Realizar estudos de porosidade, de permeabilidade em concretos com NTC sintetizados diretamente sobre o clínquer;
- Nos testes de ar incorporado, de slump e de slump-flow, realizar mais ensaios a fim de fornecer maior confiabilidade aos resultados;
- Utilizar corpos de prova inteiros para os ensaios de absorção de água por capilaridade e imersão, além de confeccionar maior número de CP's para este fim.

## 7. REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI Concrete Terminology. **ACI CT-18**. 38800 - Country Club Drive - Farmington Hills, MI, USA 48331. 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Terminology Relating to concrete and concrete aggregates. **ASTM C125-00a**. West Conshohoken, PA, USA, 2015.

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **Infrastructure Report Card 2017**. Disponível em: <[www.infrastructurereportcard.org](http://www.infrastructurereportcard.org)>. Acesso em: 19/02/2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5733**: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. **NBR 5738**: Concreto – Procedimentos para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 7222**: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 8522**: Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 9779:** Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_. **NBR 10908:** Aditivos para argamassa e concreto – Ensaio de caracterização. Rio de Janeiro, 2008.

\_\_\_\_\_. **NBR 11768:** Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 15823-1:** Concreto autoadensável – Parte 1: Classificação, controle e aceitação no estado fresco. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 15823-2:** Concreto autoadensável – Parte 2: Determinação de espalhamento e do tempo de escoamento – Método do cone de Abrams. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 16697:** Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 30:** Agregado miúdo – Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 33:** Concreto – Amostragem de concreto fresco. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 46:** Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 47:** Concreto – Determinação do teor de ar em concreto fresco – Método pressométrico. Rio de Janeiro, 2002.



\_\_\_\_\_. **NBR NM 52:** Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 53:** Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 67:** Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 248:** Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ALVES, M. S. **Estudo das Características e da Viabilidade do uso de Resíduos Gerados no Polimento de Rochas Graníticas como Adição em Concretos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte/MG. 2008.

AVOURIS, P. **Supertubes.** IEEE Spectrum, vol. 41, n<sup>o</sup>. 8, pp. 40-45, Agosto 2004.

BENEDETTI, A. Z. **Avaliação da temperatura gerada pelo calor de hidratação de pastas de cimentos Portland fabricados com nanotubos de carbono** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte/MG. 2008. 177 p.

BERNHOLC, J.; BRENNER D.W.; BUONGIORNO N. M.; MEUNIER, V.; ROLAND, C. Mechanical and electrical properties of nanotubes. **Annual Review of Materials Research.** Vol. 32. p. 347-375. Agosto, 2002.

BHUSHAN, B. **Handbook of Nanotechnology.** 2<sup>o</sup>. ed. New York: Springer, v. I, 2007. 1875 p.

BRUNAUER, S.; COPELAND, L. E. **The Chemistry of Concrete**. Scientific American. 1964.

CARRIÇO, A.; BOGAS, J.A.; HAWREEN, A.; GUEDES, M. Durability of multi-walled carbon nanotube reinforced concrete. **Construction and Building Materials**. Nº 164. p. 121–133. 2018. Lisboa, Portugal.

CHAE, H.G.; LIU, J.; KUMAR, S. Carbon nanotube-enabled materials. In: O'CONNELL, Michael J. (Ed.). **Carbon nanotubes – Properties and applications**. United States of America: CRC Taylor & Francis Group, 2006. cap. 8, p. 213-274.

CHAUHAN, S.K.; SHUKLA, A.; DUTTA, S.; GANDOPADHYAY, M; BHARADWAJ, L. Carbon nanotubes for environmental protection. **Springer Science + Business Media B.V.** 2012, 83–98, doi: 10.1007/978-94-007-2442-6\_3.

CHOWDHURY, S.C.; HAQUE, B.Z.; OKABE, T; GILLESPIE, J.W. Modeling the effect of statistical variations in length and diameter of randomly oriented CNTs on the properties of CNT reinforced nanocomposites. **Composites Part B**. 2012. Vol. 43 (4). P. 1756–62.

COUTO, G. G. **Nanopartículas de níquel: síntese, caracterização, propriedades e estudo de sua utilização como catalisadores na obtenção de nanotubos de carbono**. Dissertação (Mestrado em Química) – Departamento de Química. Universidade Federal do Paraná. Curitiba/PR. 2016.

DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. **Microscopia Eletrônica de Varredura - Aplicações e preparo de amostras**. 1ª. ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, v.I,2007. 60 p.

DU, L.; FOLLIARD, K.J. Sustainable Development using controlled low-strength Material. **Proceedings of the International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology**. Department of Civil, Construction and Environmental Engineering. Iowa State University, Ames/Iowa, USA. 2004. 359p.

ELRAHMAN, M.A.; HILLEMEIER, B. Combined effect of fine fly ash and packing density on the properties of high performance concrete: An experimental approach. **Construction and Building Materials**. Vol. 58. 2014. pp. 225–233.

FÁVERO, R. B. **Caracterização Mecânica de Material Compósito Cimentício Avançado à Base de Pós Reativos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre/RS. 2016.

FERRO, G.A., TULLIANI, J.M., LOPEZ, A., JAGDALE, P. New cementitious composite building material with enhanced toughness. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**. Nº 76 (2015). p. 67–74. DOI:10.1016/j.tafmec.2015.01.005.

GLEIZE, P. J. P. Nanotecnologia e materiais de construção. In: ISAIA, Geraldo C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007. Vol. 2. Cap. 50. p. 1659-1685.

GOPALAKRISHNAN, K.; BIRGISSON, B.; TAYLOR, P.; ATTOH-OKINE, N. **Nano-Technology in Civil Infrastructure**. Springer-Verlag, Berlin - Heidelberg, 2011, pp. 1–1272.

HAMZAOU, R.; BENNABI, A.; GUESSASMA, S.; KHELIFA, M.R.; LEKLOU, N. Optimal carbon nanotubes concentration incorporated in mortar and concrete. **Advanced Materials Research**. Vol. 587. 2012. pp. 107–110.

HU, Y.; SHENDEROVA, O.A.; HU, Z.; PADGETT, C.D W.; BRENNER, D.W. Carbon nanostructures for advanced composites. **Reports on Progress in Physics**. Nº 69. p. 1847-1895. 2006.

IBARRA, Y.D.; GAITERO, J.J.S.; ERKIZIA, E.; CAMPILLO, I. **Atomic force microscopy and nanoindentation of cement pastes with nanotube dispersions**. *Physica Status Solidi*. Vol. 203. Issue 6. 2006. pp. 1076–1081.

ISAIA, G. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1º. ed. Ed. Ibracon. São Paulo/SP: 2011. 1926 p.

KHALID, A.R.; RIZWAN, S.A.; HANIF, U.; HAMEED, M.H. Effect of mixing time on flowability and slump retention of self-compacting paste system incorporating various secondary raw materials. **Arabian Journal for Science and Engineering**. Vol. 41 (2016). pp. 1283–1290.

KHITAB, A.; AHMAD, S.; KHUSHNOOD, R.A.; RIZWAN, S.A.; FERRO, G.A.; RESTUCCIA, L.; ALI, M.; MEHMOOD, I. Fracture toughness and failure mechanism of high performance concrete incorporating carbon nanotubes. **Frattura ed Integrità Strutturale**. Vol. 42. 2017. pp.238-248.

KHITAB, A.; ANWAR, W.; MANSOURI, I.; TARIQ, M.K.; MEHMOOD, I. Future of civil engineering materials: A review from recent developments. **Reviews on Advanced Material Science**. Vol. 42. 2015. pp. 20–27.

KONSTA-GDOUTOS M.S.; ZOI, S. M.; SUREBDRA, P. S. Highly dispersed carbon nanotube reinforced cement based materials. **Cement and Concrete Research**. Vol. 40. 2010. pp. 1052–1059.

LADEIRA, L. **Resistência à tração e à carbonatação de argamassas fabricadas com nanotubos de carbono sintetizados diretamente sobre o clínquer**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte/MG. 2017. 123 p.

LADEIRA, L. O.; SILVA, E. E.; OLIVEIRA, S.; LACERDA, R. G.; FERLAUTO, A. S.; LORENÇON, E.; ÁVILA, E. S. **Process for the continuous, large-scale synthesis of carbon nanotubes on cement clinker, and nanostructured products**. Pedido de patente em 2009. WO2009132407 A2 PCT/BR2009/000119.

LADEIRA, L. O.; SILVA, E. E.; OLIVEIRA, S.; LACERDA, R. G.; FERLAUTO, A. S.; ÁVILA, E. S.; LORENÇON, E. **Large scale production of carbon nanotubes in Portland cement.** Concessão da patente em 2015. US Patent, 9085487 B2.

LIEW, K.M.; KAI, M.F.; ZHANG, L.W. Carbon nanotube reinforced cementitious composites: An overview. **Composites: Part A.** Vol. 91. 2016. pp. 301–323.

LOPEZ, A., FERRO, G.A., JAGADALE, P., TULLIANI, J.-M., **Influence of carbon nanotubes addition onto the mechanical properties of restoration mortars.** in: Convegno Naz. IGF XXII. Rome, Italy, (2013) pp. 278–286.

LU, L.; OUYANG, D.; XU, W. Mechanical Properties and Durability of Ultra High Strength Concrete Incorporating Multi-Walled Carbon Nanotubes. **Materials.** 2016. Nº. 419. 9p.

LUDVIG, P. **Synthesis and characterization of Portland cement manufactured with carbon nanotubes.** Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte/MG. 2012. 215p.

MAHAR, B.; LASLAN, C.; YIP, R.; SUN, Y. **Development of carbon nanotube-based sensors - a review.** IEEE Sensors Journal, Vol. 7. 2007. pp. 266–284.

MALISKA, A.M. **Microscopia Eletrônica de Varredura e Microanálise.** Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis/SC: 2013. 97p.

MANZUR, T.; YAZDANI, N.; EMON, M.A.B. **Potential of Carbon Nanotube Reinforced Cement Composites as Concrete Repair Material.** Journal of Nanomaterials. Volume 2016. 2016. 10 p.

MARCONDES, C. G. N. **Adição de nanotubos de carbono em concretos de cimento Portland – absorção, permeabilidade, penetração de cloretos e propriedades mecânicas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção

Civil) – Curso de Pós-Graduação da Construção Civil. Universidade Federal do Paraná. Curitiba/PR. 2012. 130 p.

MARCONDES, C. G. N.; MEDEIROS, M. H. F.; FILHO, J.M.; HELENE, P. **Nanotubos de carbono em concreto de cimento Portland: Influência da dispersão nas propriedades mecânicas e na absorção de água.** Revista Alconpat, Volume 5, Número 2, Maio - Agosto 2015, pp. 96 – 113

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais.** 2ª ed. (português). Ed. Ibracon, v. I, São Paulo: 2014. 782 p. 4ª Edição em Inglês.

MELO, V. S. **Nanotecnologia aplicada ao concreto: efeito da mistura física de nanotubos de carbono em matrizes de cimento Portland.** Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte/MG. 2009. 146 p.

MUDIMELA, P.R.; NASIBULIN, A.G.; NASIBULINA, L.I.; CWIRZEN, A.; VALKEAPÄÄ, M.; HABERMEHL-CWIRZEN, K.; MALM, J.E.M.; KARPPINEN, M.J.; PENTTALA, V.; KOLTSOVA, T.S.; TOLOCHKO, O.V.; KAUPPINEN, E.I. Synthesis of Carbon Nanotubes and Nanofibers on Silica and Cement Matrix Materials. **Journal of Nanomaterials.** 2009. Artigo ID 526128, 4 p.

NASIBULIN, A.G.; KOLTSOVA, T.; NASIBULINA, L.I.; ANOSJKIN, I.V.; SEMENCHA, A.; TOLOCHKO, O.V.; KAUPPINEN, E.I. A novel approach to composite preparation by direct synthesis of carbon nanomaterial on matrix or filler particles. **Acta Materialia.** vol. 61. 2013. 1862–1871.

NETO, F. A. S. **Parâmetros de fratura de pastas de cimento fabricado com nanotubos de carbono.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. CEFET-MG. Belo Horizonte/MG. 2018. 134 p.

OLLIVIER, J.P.; VICHOT, A. **Durabilidade do Concreto: Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente**. 1ª ed. brasileira. Ibracon. São Paulo. 2014. 606p.

PARVEEN, S.; RANA, S.; FANGUEIRO, R. A Review on Nanomaterial Dispersion, Microstructure, and Mechanical Properties of Carbon Nanotube and Nanofiber Reinforced Cementitious Composites. **Journal of Nanomaterials**. 2013. 28 de maio de 2013. 19 p.

PARVEEN, S.; RANA, S.; FANGUEIRO, R.; PAIVA, M. C. Microstructure and mechanical properties of carbon nanotube reinforced cementitious composites developed using novel dispersion technique. **Cement and Concrete Research**. Vol. 71. 2015. pp. 215–227.

PAULA, J. N. **Comportamento reológico e mecânico de pastas de cimento fabricado com nanotubos de carbono crescidos em clínquer para poços de petróleo**. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte/MG. 2014. 130 p.

RAKI, L., BEAUDOIN, J., ALIZADEH, R., MAKAR, J., SATO, T., Cement and concrete nanoscience and nanotechnology. **Materials (Basel)**. Nº 3 (2010) pp. 918–942. DOI:10.3390/ma3020918

RASHAD, A.M. Effect of carbon nanotubes (CNTs) on the properties of traditional cementitious materials – A review. **Construction and Building Materials**. Vol.153 – pp: 81-101. 2017. Cairo, Egito.

ROCO, M.C.; WILLIAMS, R.S.; ALIVISATOS, P. E. Nanotechnology research directions. IWGN workshop report: vision for nanotechnology in the next decade. **National Science and Technology Council, Committee on Technology**. 1999.

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

SIDDIQUE, R.; METHA, A. Effect of carbon nanotubes on properties of cement mortars. **Construction and Building Materials**. Patiala, India. Nº 50, 12 Oct. 2013. pp. 116-129.

SOARES, P.A. **Caracterização da reologia no estado fresco de pastas de cimento Portland fabricadas com nanotubos de carbono sintetizados diretamente sobre o clínquer**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte/MG. 2019. 176 p.

SOBOLEV, K.; FLORES, I.; HERMOSILLO, R.; TORRES-MARTÍNEZ, L. M. Nanomaterials and nanotechnology for high-performance cement composites. **Nanotechnology of concrete: recent developments and future perspectives**. Denver, United States of America: Proceedings of American Concrete Institute Session. 2006. pp. 91-118.

SOUZA, T.C.C. **Síntese contínua e caracterização de cimento Portland fabricado com nanotubos de carbono**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte/MG. 2015. 184 p.

TONDER, P. V.; MAFOKOANE, T.T. Effects of multi-walled carbon nanotubes on strength and interfacial transition zone of concrete. **Construction Material and Structures**. Johannesburg, South Africa. 2014. p. 718–727.

TYSON, B. M. **Carbon nanotube and nanofiber reinforcement for improving the flexural strength and fracture toughness of Portland cement paste**. Doctorate Thesis in Master of Science: Civil Engineering. Texas: Texas A&M University, 2010. 159 p.

ULM, F.J. Nano-Engineering of Concrete. **Arabian Journal of Science and Engineering**. Vol. 37. 2012. pp. 481–488.



XIE, X-L; MAI, Y-W; ZHOU, X-P. Dispersion and alignment of carbon nanotubes in polymer matrix: a review. **Master Science Engineering: R: Reports**. 2005. Vol. 49. Issue 4. pp. 89–112.

WANG, N.; TANG, Z.K.; LI, G.D.; CHEN, J.S. Single-walled 4 Å carbon nanotube arrays. **Nature**. Vol. 408. pp. 50–51. 2000.

ZARBIN, A. J. G. **Química de nanomateriais**. Ed. Química Nova. São Paulo. Vol. 30. nº. 6. p. 1469-1479. 2007.

## 8. APÊNDICES

### A. Resistências Mecânicas do Concreto Convencional – a/c = 0,60

#### Resistência à compressão

TRAÇO CCREF - COMPRESSÃO					
3 dias		7 dias		28 dias	
# Amostra	Tensão de Ruptura (MPa)	# Amostra	Tensão de Ruptura (MPa)	# Amostra	Tensão de Ruptura (MPa)
CCREF-1	29,59	CCREF-1	34,64	CCREF-1	40,78
CCREF-2	30,16	CCREF-2	35,02	CCREF-2	39,28
CCREF-3	27,32	CCREF-3	32,23	CCREF-3	40,1
CCREF-4	28,41	CCREF-4	33,53	CCREF-4	40,81
CCREF-5	26,6	CCREF-5	32,45	CCREF-5	39,4
CCREF-6	28,65	CCREF-6	32,82	CCREF-6	41,52
<b>Resumo</b>	<b>6 CP's</b>	<b>Resumo</b>	<b>6 CP's</b>	<b>Resumo</b>	<b>6 CP's</b>
<b>Média</b>	<b>28,45</b>	<b>Média</b>	<b>33,45</b>	<b>Média</b>	<b>40,32</b>
<b>Desv. Padrão</b>	<b>1,34</b>	<b>Desv. Padrão</b>	<b>1,16</b>	<b>Desv. Padrão</b>	<b>0,88</b>
<b>Coef. Variação</b>	<b>4,7</b>	<b>Coef. Variação</b>	<b>3,48</b>	<b>Coef. Variação</b>	<b>2,18</b>

TRAÇO CCNTC015 - COMPRESSÃO					
3 dias		7 dias		28 dias	
# Amostra	Tensão de Ruptura (MPa)	# Amostra	Tensão de Ruptura (MPa)	# Amostra	Tensão de Ruptura (MPa)
CCNTC015-1	28,05	CCNTC015-1	35,9	CCNTC015-1	37,22
CCNTC015-2	28,73	CCNTC015-2	31,85	CCNTC015-2	40,96
CCNTC015-3	27,38	CCNTC015-3	30,91	CCNTC015-3	40,64
CCNTC015-4	27,79	CCNTC015-4	31,4	CCNTC015-4	37,29
CCNTC015-5	30,27	CCNTC015-5	31,51	CCNTC015-5	38,03
CCNTC015-6	30,82	CCNTC015-6	29,97	CCNTC015-6	37,56
<b>Resumo</b>	<b>6 CP's</b>	<b>Resumo</b>	<b>6 CP's</b>	<b>Resumo</b>	<b>6 CP's</b>
<b>Média</b>	<b>28,84</b>	<b>Média</b>	<b>31,93</b>	<b>Média</b>	<b>38,62</b>
<b>Desv. Padrão</b>	<b>1,4</b>	<b>Desv. Padrão</b>	<b>2,06</b>	<b>Desv. Padrão</b>	<b>1,72</b>
<b>Coef. Variação</b>	<b>4,87</b>	<b>Coef. Variação</b>	<b>6,44</b>	<b>Coef. Variação</b>	<b>4,45</b>

TRAÇO CCNTC030 - COMPRESSÃO					
3 dias		7 dias		28 dias	
# Amostra	Tensão de Ruptura (MPa)	# Amostra	Tensão de Ruptura (MPa)	# Amostra	Tensão de Ruptura (MPa)
CCNTC030-1	20,99	CCNTC030-1	29,54	CCNTC030-1	34,52
CCNTC030-2	24,58	CCNTC030-2	32,52	CCNTC030-2	30,65
CCNTC030-3	24,52	CCNTC030-3	29,17	CCNTC030-3	36,35
CCNTC030-4	22,21	CCNTC030-4	29,81	CCNTC030-4	37,25
CCNTC030-5	24,57	CCNTC030-5	31,01	CCNTC030-5	35,25
CCNTC030-6	25,15	CCNTC030-6	30,52	CCNTC030-6	38,18
<b>Resumo</b>	<b>6 CP's</b>	<b>Resumo</b>	<b>6 CP's</b>	<b>Resumo</b>	<b>6 CP's</b>
<b>Média</b>	<b>23,67</b>	<b>Média</b>	<b>30,43</b>	<b>Média</b>	<b>35,37</b>
<b>Desv. Padrão</b>	<b>1,66</b>	<b>Desv. Padrão</b>	<b>1,22</b>	<b>Desv. Padrão</b>	<b>2,66</b>
<b>Coef. Variação</b>	<b>7,03</b>	<b>Coef. Variação</b>	<b>4,02</b>	<b>Coef. Variação</b>	<b>7,52</b>

### Resistência à tração por compressão diametral

TRAÇO CCREF – TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL					
3 dias		7 dias		28 dias	
# Amostra	Tensão de Ruptura (MPa)	# Amostra	Tensão de Ruptura (MPa)	# Amostra	Tensão de Ruptura (MPa)
CCREF-1	2,44	CCREF-2	3,09	CCREF-1	3,35
CCREF-2	3,02	CCREF-3	3,26	CCREF-2	2,95
CCREF-3	2,95	CCREF-4	3,48	CCREF-3	3,44
CCREF-4	3,11	CCREF-5	3,47	CCREF-5	2,94
<b>Resumo</b>	<b>4 CP's</b>	<b>Resumo</b>	<b>4 CP's</b>	<b>Resumo</b>	<b>4 CP's</b>
<b>Média</b>	<b>2,88</b>	<b>Média</b>	<b>3,32</b>	<b>Média</b>	<b>3,17</b>
<b>Desv. Padrão</b>	<b>0,3</b>	<b>Desv. Padrão</b>	<b>0,19</b>	<b>Desv. Padrão</b>	<b>0,26</b>
<b>Coef. Variação</b>	<b>10,36</b>	<b>Coef. Variação</b>	<b>5,6</b>	<b>Coef. Variação</b>	<b>8,31</b>

TRAÇO CCNTC015 - TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL					
3 dias		7 dias		28 dias	
# Amostra	Tensão de Ruptura (MPa)	# Amostra	Tensão de Ruptura (MPa)	# Amostra	Tensão de Ruptura (MPa)
CCNTC015-1	2,39	CCNTC015-1	3,19	CCNTC015-1	2,77
CCNTC015-2	2,36	CCNTC015-3	2,93	CCNTC015-3	2,92
CCNTC015-4	2,31	CCNTC015-4	2,86	CCNTC015-4	3,46
CCNTC015-5	2,36	CCNTC015-5	2,68	CCNTC015-5	2,36
<b>Resumo</b>	<b>4 CP's</b>	<b>Resumo</b>	<b>4 CP's</b>	<b>Resumo</b>	<b>4 CP's</b>
<b>Média</b>	<b>2,35</b>	<b>Média</b>	<b>2,92</b>	<b>Média</b>	<b>2,88</b>
<b>Desv. Padrão</b>	<b>0,03</b>	<b>Desv. Padrão</b>	<b>0,21</b>	<b>Desv. Padrão</b>	<b>0,45</b>
<b>Coef. Variação</b>	<b>1,4</b>	<b>Coef. Variação</b>	<b>7,31</b>	<b>Coef. Variação</b>	<b>15,66</b>

TRAÇO CCNTC030 - TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL					
3 dias		7 dias		28 dias	
# Amostra	Tensão de Ruptura (MPa)	# Amostra	Tensão de Ruptura (MPa)	# Amostra	Tensão de Ruptura (MPa)
CCNTC030-1	2,58	CCNTC030-1	3,23	CCNTC030-1	3,35
CCNTC030-3	2,57	CCNTC030-2	2,49	CCNTC030-2	3,48
CCNTC030-4	2,62	CCNTC030-3	2,96	CCNTC030-4	2,82
CCNTC030-5	2,27	CCNTC030-5	2,33	CCNTC030-5	2,96
<b>Resumo</b>	<b>4 CP's</b>	<b>Resumo</b>	<b>4 CP's</b>	<b>Resumo</b>	<b>4 CP's</b>
<b>Média</b>	<b>2,51</b>	<b>Média</b>	<b>2,75</b>	<b>Média</b>	<b>3,15</b>
<b>Desv. Padrão</b>	<b>0,16</b>	<b>Desv. Padrão</b>	<b>0,42</b>	<b>Desv. Padrão</b>	<b>0,32</b>
<b>Coef. Variação</b>	<b>6,29</b>	<b>Coef. Variação</b>	<b>15,14</b>	<b>Coef. Variação</b>	<b>10,03</b>

**Módulo de elasticidade**

<b>TRAÇO CCREF – MÓDULO DE ELASTICIDADE</b>					
<b>3 dias</b>		<b>7 dias</b>		<b>28 dias</b>	
<b># Amostra</b>	<b>Tensão de Ruptura (GPa)</b>	<b># Amostra</b>	<b>Tensão de Ruptura (GPa)</b>	<b># Amostra</b>	<b>Tensão de Ruptura (GPa)</b>
CCREF-1	23,5	CCREF-1	26,23	CCREF-1	29,23
CCREF-2	21,13	CCREF-2	24,82	CCREF-2	29,2
CCREF-3	22,26	CCREF-3	27,5	CCREF-3	29,44
<b>Resumo</b>	<b>3 CP's</b>	<b>Resumo</b>	<b>3 CP's</b>	<b>Resumo</b>	<b>3 CP's</b>
<b>Média</b>	<b>22,29</b>	<b>Média</b>	<b>26,18</b>	<b>Média</b>	<b>29,29</b>
<b>Desv. Padrão</b>	<b>1,19</b>	<b>Desv. Padrão</b>	<b>1,34</b>	<b>Desv. Padrão</b>	<b>0,13</b>
<b>Coef. Variação</b>	<b>5,32</b>	<b>Coef. Variação</b>	<b>5,12</b>	<b>Coef. Variação</b>	<b>0,45</b>

<b>TRAÇO CCNTC015 – MÓDULO DE ELASTICIDADE</b>					
<b>3 dias</b>		<b>7 dias</b>		<b>28 dias</b>	
<b># Amostra</b>	<b>Tensão de Ruptura (GPa)</b>	<b># Amostra</b>	<b>Tensão de Ruptura (GPa)</b>	<b># Amostra</b>	<b>Tensão de Ruptura (GPa)</b>
CCNTC015-1	24,22	CCNTC015-1	25,96	CCNTC015-1	29,61
CCNTC015-2	24,36	CCNTC015-2	26,17	CCNTC015-2	29,03
CCNTC015-3	24,26	CCNTC015-3	25,08	CCNTC015-3	28,71
<b>Resumo</b>	<b>3 CP's</b>	<b>Resumo</b>	<b>3 CP's</b>	<b>Resumo</b>	<b>3 CP's</b>
<b>Média</b>	<b>24,28</b>	<b>Média</b>	<b>25,74</b>	<b>Média</b>	<b>29,12</b>
<b>Desv. Padrão</b>	<b>0,07</b>	<b>Desv. Padrão</b>	<b>0,58</b>	<b>Desv. Padrão</b>	<b>0,46</b>
<b>Coef. Variação</b>	<b>0,31</b>	<b>Coef. Variação</b>	<b>2,24</b>	<b>Coef. Variação</b>	<b>1,57</b>

<b>TRAÇO CCNTC030 – MÓDULO DE ELASTICIDADE</b>					
<b>3 dias</b>		<b>7 dias</b>		<b>28 dias</b>	
<b># Amostra</b>	<b>Tensão de Ruptura (GPa)</b>	<b># Amostra</b>	<b>Tensão de Ruptura (GPa)</b>	<b># Amostra</b>	<b>Tensão de Ruptura (GPa)</b>
CCNTC030-1	23,67	CCNTC030-1	26,04	CCNTC030-1	29,67
CCNTC030-2	21,96	CCNTC030-2	26,04	CCNTC030-2	29,55
CCNTC030-3	23,6	CCNTC030-3	25,52	CCNTC030-3	30,06
<b>Resumo</b>	<b>3 CP's</b>	<b>Resumo</b>	<b>3 CP's</b>	<b>Resumo</b>	<b>3 CP's</b>
<b>Média</b>	<b>23,08</b>	<b>Média</b>	<b>25,86</b>	<b>Média</b>	<b>29,76</b>
<b>Desv. Padrão</b>	<b>0,96</b>	<b>Desv. Padrão</b>	<b>0,3</b>	<b>Desv. Padrão</b>	<b>0,26</b>
<b>Coef. Variação</b>	<b>4,18</b>	<b>Coef. Variação</b>	<b>1,17</b>	<b>Coef. Variação</b>	<b>0,89</b>

## B. Resistências Mecânicas do Concreto Autoadensável – a/c = 0,45

### Resistência à compressão

TRAÇO CAAREF - COMPRESSÃO					
3 dias		7 dias		28 dias	
# Amostra	Tensão de Ruptura (MPa)	# Amostra	Tensão de Ruptura (MPa)	# Amostra	Tensão de Ruptura (MPa)
CAAREF-1	34,47	CAAREF-1	49,92	CAAREF-1	62,73
CAAREF-2	38,11	CAAREF-2	48,72	CAAREF-2	60,32
CAAREF-3	38,8	CAAREF-3	48,66	CAAREF-3	61,51
CAAREF-4	35,67	CAAREF-4	50,25	CAAREF-4	59,89
CAAREF-5	38,27	CAAREF-5	52,54	CAAREF-5	56,12
CAAREF-6	39,33	CAAREF-6	52,85	CAAREF-6	58,62
<b>Resumo</b>	<b>6 CP's</b>	<b>Resumo</b>	<b>6 CP's</b>	<b>Resumo</b>	<b>6 CP's</b>
<b>Média</b>	<b>37,44</b>	<b>Média</b>	<b>50,49</b>	<b>Média</b>	<b>59,87</b>
<b>Desv. Padrão</b>	<b>1,93</b>	<b>Desv. Padrão</b>	<b>1,82</b>	<b>Desv. Padrão</b>	<b>2,31</b>
<b>Coef. Variação</b>	<b>5,15</b>	<b>Coef. Variação</b>	<b>3,61</b>	<b>Coef. Variação</b>	<b>3,86</b>

TRAÇO CAANTC015 - COMPRESSÃO					
3 dias		7 dias		28 dias	
# Amostra	Tensão de Ruptura (MPa)	# Amostra	Tensão de Ruptura (MPa)	# Amostra	Tensão de Ruptura (MPa)
CAANTC015-1	35,24	CAANTC015-1	51,43	CAANTC015-1	62,76
CAANTC015-2	36,25	CAANTC015-2	49,8	CAANTC015-2	51,68
CAANTC015-3	35,18	CAANTC015-3	50,47	CAANTC015-3	62,89
CAANTC015-4	35,22	CAANTC015-4	49,35	CAANTC015-4	63,17
CAANTC015-5	35,65	CAANTC015-5	50,63	CAANTC015-5	59,43
CAANTC015-6	37,35	CAANTC015-6	43,02	CAANTC015-6	62,75
<b>Resumo</b>	<b>6 CP's</b>	<b>Resumo</b>	<b>6 CP's</b>	<b>Resumo</b>	<b>6 CP's</b>
<b>Média</b>	<b>35,82</b>	<b>Média</b>	<b>49,12</b>	<b>Média</b>	<b>60,45</b>
<b>Desv. Padrão</b>	<b>0,86</b>	<b>Desv. Padrão</b>	<b>3,07</b>	<b>Desv. Padrão</b>	<b>4,51</b>
<b>Coef. Variação</b>	<b>2,39</b>	<b>Coef. Variação</b>	<b>6,26</b>	<b>Coef. Variação</b>	<b>7,47</b>

TRAÇO CAANTC030 - COMPRESSÃO					
3 dias		7 dias		28 dias	
# Amostra	Tensão de Ruptura (MPa)	# Amostra	Tensão de Ruptura (MPa)	# Amostra	Tensão de Ruptura (MPa)
CAANTC030-1	40,54	CAANTC030-1	51,83	CAANTC030-1	63,13
CAANTC030-2	34,89	CAANTC030-2	53,72	CAANTC030-2	61,38
CAANTC030-3	35,26	CAANTC030-3	45,19	CAANTC030-3	59,81
CAANTC030-4	38,91	CAANTC030-4	53,76	CAANTC030-4	62,63
CAANTC030-5	37,22	CAANTC030-5	53,8	CAANTC030-5	60,34
CAANTC030-6	36,27	CAANTC030-7*	51,66	CAANTC030-6	61,74
<b>Resumo</b>	<b>6 CP's</b>	<b>Resumo</b>	<b>6 CP's</b>	<b>Resumo</b>	<b>6 CP's</b>
<b>Média</b>	<b>37,18</b>	<b>Média</b>	<b>51,66</b>	<b>Média</b>	<b>61,51</b>
<b>Desv. Padrão</b>	<b>2,19</b>	<b>Desv. Padrão</b>	<b>3,32</b>	<b>Desv. Padrão</b>	<b>1,28</b>
<b>Coef. Variação</b>	<b>5,9</b>	<b>Coef. Variação</b>	<b>6,42</b>	<b>Coef. Variação</b>	<b>2,08</b>

\* A amostra NTC030-6 foi eliminada por valor discrepante (34,23 MPa) - assumida média dos demais (51,66 MPa) e chamada de NTC030-7

### Resistência à Tração por Compressão Diametral

TRAÇO CAAREF - TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL					
3 dias		7 dias		28 dias	
# Amostra	Tensão de Ruptura (MPa)	# Amostra	Tensão de Ruptura (MPa)	# Amostra	Tensão de Ruptura (MPa)
CAAREF-1	2,73	CAAREF-1	3	CAAREF-2	3,81
CAAREF-2	2,4	CAAREF-2	4,12	CAAREF-3	3,59
CAAREF-4	3,16	CAAREF-4	3,02	CAAREF-4	3,49
CAAREF-5	2,67	CAAREF-5	3,14	CAAREF-5	4,84
<b>Resumo</b>	<b>4 CP's</b>	<b>Resumo</b>	<b>4 CP's</b>	<b>Resumo</b>	<b>4 CP's</b>
<b>Média</b>	<b>2,74</b>	<b>Média</b>	<b>3,32</b>	<b>Média</b>	<b>3,93</b>
<b>Desv. Padrão</b>	<b>0,32</b>	<b>Desv. Padrão</b>	<b>0,53</b>	<b>Desv. Padrão</b>	<b>0,62</b>
<b>Coef. Variação</b>	<b>11,55</b>	<b>Coef. Variação</b>	<b>16,11</b>	<b>Coef. Variação</b>	<b>15,77</b>

TRAÇO CAANTC015 - TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL					
3 dias		7 dias		28 dias	
# Amostra	Tensão de Ruptura (MPa)	# Amostra	Tensão de Ruptura (MPa)	# Amostra	Tensão de Ruptura (MPa)
CAANTC015-2	3,7	CAANTC015-2	3,61	CAANTC015-2	4,12
CAANTC015-3	3,38	CAANTC015-3	3,52	CAANTC015-3	4,69
CAANTC015-4	4,03	CAANTC015-4	3,78	CAANTC015-4	4,73
CAANTC015-5	2,93	CAANTC015-5	4,13	CAANTC015-5	4,44
<b>Resumo</b>	<b>4 CP's</b>	<b>Resumo</b>	<b>4 CP's</b>	<b>Resumo</b>	<b>4 CP's</b>
<b>Média</b>	<b>3,51</b>	<b>Média</b>	<b>3,76</b>	<b>Média</b>	<b>4,5</b>
<b>Desv. Padrão</b>	<b>0,47</b>	<b>Desv. Padrão</b>	<b>0,27</b>	<b>Desv. Padrão</b>	<b>0,28</b>
<b>Coef. Variação</b>	<b>13,39</b>	<b>Coef. Variação</b>	<b>7,11</b>	<b>Coef. Variação</b>	<b>6,22</b>

TRAÇO CAANTC030 - TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL					
3 dias		7 dias		28 dias	
# Amostra	Tensão de Ruptura (MPa)	# Amostra	Tensão de Ruptura (MPa)	# Amostra	Tensão de Ruptura (MPa)
CAANTC030-2	3,84	CAANTC030-1	3,93	CAANTC030-1	4,02
CAANTC030-3	4,23	CAANTC030-2	4,12	CAANTC030-3	5,86
CAANTC030-4	3,28	CAANTC030-3	4,78	CAANTC030-4	5,93
CAANTC030-5	3,61	CAANTC030-5	3,84	CAANTC030-5	4,81
<b>Resumo</b>	<b>4 CP's</b>	<b>Resumo</b>	<b>4 CP's</b>	<b>Resumo</b>	<b>4 CP's</b>
<b>Média</b>	<b>3,74</b>	<b>Média</b>	<b>4,17</b>	<b>Média</b>	<b>5,16</b>
<b>Desv. Padrão</b>	<b>0,4</b>	<b>Desv. Padrão</b>	<b>0,43</b>	<b>Desv. Padrão</b>	<b>0,91</b>
<b>Coef. Variação</b>	<b>10,62</b>	<b>Coef. Variação</b>	<b>10,2</b>	<b>Coef. Variação</b>	<b>17,74</b>



**Módulo de elasticidade**

<b>TRAÇO CAAREF – MÓDULO DE ELASTICIDADE</b>					
<b>3 dias</b>		<b>7 dias</b>		<b>28 dias</b>	
<b># Amostra</b>	<b>Tensão de Ruptura (GPa)</b>	<b># Amostra</b>	<b>Tensão de Ruptura (GPa)</b>	<b># Amostra</b>	<b>Tensão de Ruptura (GPa)</b>
CAAREF-1	25,99	CAAREF-1	27,94	CAAREF-1	33,81
CAAREF-2	25,1	CAAREF-2	28,55	CAAREF-2	33,33
CAAREF-3	25,57	CAAREF-3	29,42	CAAREF-3	35,91
<b>Resumo</b>	<b>3 CP's</b>	<b>Resumo</b>	<b>3 CP's</b>	<b>Resumo</b>	<b>3 CP's</b>
<b>Média</b>	<b>25,55</b>	<b>Média</b>	<b>28,64</b>	<b>Média</b>	<b>34,35</b>
<b>Desv. Padrão</b>	<b>0,45</b>	<b>Desv. Padrão</b>	<b>0,74</b>	<b>Desv. Padrão</b>	<b>1,37</b>
<b>Coef. Variação</b>	<b>1,75</b>	<b>Coef. Variação</b>	<b>2,6</b>	<b>Coef. Variação</b>	<b>3,99</b>

<b>TRAÇO CAANTC015 – MÓDULO DE ELASTICIDADE</b>					
<b>3 dias</b>		<b>7 dias</b>		<b>28 dias</b>	
<b># Amostra</b>	<b>Tensão de Ruptura (GPa)</b>	<b># Amostra</b>	<b>Tensão de Ruptura (GPa)</b>	<b># Amostra</b>	<b>Tensão de Ruptura (GPa)</b>
CAANTC015-1	26,28	CAANTC015-1	30,96	CAANTC015-1	34,21
CAANTC015-2	27,05	CAANTC015-2	29,52	CAANTC015-2	34,83
CAANTC015-3	27,84	CAANTC015-3	32,28	CAANTC015-3	34,94
<b>Resumo</b>	<b>3 CP's</b>	<b>Resumo</b>	<b>3 CP's</b>	<b>Resumo</b>	<b>3 CP's</b>
<b>Média</b>	<b>27,06</b>	<b>Média</b>	<b>30,92</b>	<b>Média</b>	<b>34,66</b>
<b>Desv. Padrão</b>	<b>0,78</b>	<b>Desv. Padrão</b>	<b>1,38</b>	<b>Desv. Padrão</b>	<b>0,39</b>
<b>Coef. Variação</b>	<b>2,88</b>	<b>Coef. Variação</b>	<b>4,45</b>	<b>Coef. Variação</b>	<b>1,13</b>

<b>TRAÇO CAANTC030 – MÓDULO DE ELASTICIDADE</b>					
<b>3 dias</b>		<b>7 dias</b>		<b>28 dias</b>	
<b># Amostra</b>	<b>Tensão de Ruptura (GPa)</b>	<b># Amostra</b>	<b>Tensão de Ruptura (GPa)</b>	<b># Amostra</b>	<b>Tensão de Ruptura (GPa)</b>
CAANTC030-1	24,92	CAANTC030-1	28,66	CAANTC030-1	30,75
CAANTC030-2	25,24	CAANTC030-2	28,12	CAANTC030-2	31,98
CAANTC030-3	25,17	CAANTC030-3	25,99	CAANTC030-3	30,04
<b>Resumo</b>	<b>3 CP's</b>	<b>Resumo</b>	<b>3 CP's</b>	<b>Resumo</b>	<b>3 CP's</b>
<b>Média</b>	<b>25,11</b>	<b>Média</b>	<b>27,59</b>	<b>Média</b>	<b>30,93</b>
<b>Desv. Padrão</b>	<b>0,17</b>	<b>Desv. Padrão</b>	<b>1,41</b>	<b>Desv. Padrão</b>	<b>0,98</b>
<b>Coef. Variação</b>	<b>0,68</b>	<b>Coef. Variação</b>	<b>5,11</b>	<b>Coef. Variação</b>	<b>3,17</b>

### C. Análise estatística dos resultados de resistência à compressão

Os testes de *t-Student* foram realizados através do *software OriginPro 8*. Para os dois traços realizados (Convencional e Autoadensável) a resistência média à compressão correspondeu a seis corpos de prova de concreto de referência e seis corpos de prova de concreto que contém NTC (NTC015 e NTC030). Eles foram comparados da maneira descrita a seguir e utilizando-se dos seguintes parâmetros:

- Referência x NTC015;
- Referência x NTC030; e,
- NTC015 x NTC030.

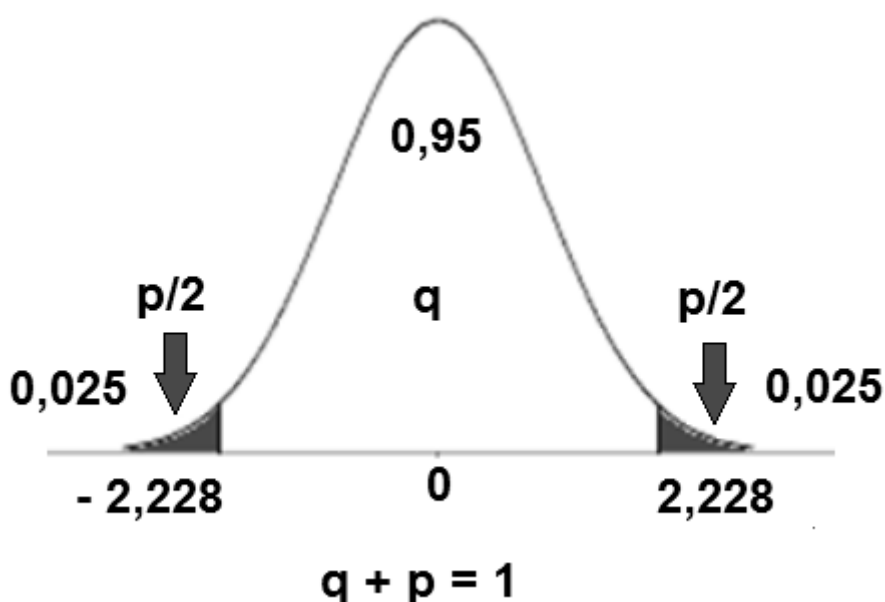
Graus de liberdade =  $2n - 2 = 2 \times 6 - 2 = 10$  (graus de liberdade).

Nível de confiança = 95 % ou  $\alpha = 5$  %.

$t = \pm 2,228$  (extraído da tabela *t-Student* para 10 graus de liberdade e  $\alpha = 5$  %).

Hipótese nula ( $H_0$ ): as médias amostrais são iguais ou  $\mu_1 - \mu_2 \geq 0$

Hipótese alternativa ( $H_a$ ): as médias amostrais são iguais ou  $\mu_1 - \mu_2 < 0$



<b>Concreto convencional</b>				
<b>Compressão</b>				
Tempo	Traço	Média (MPa)	D.P.	C.V.
3 dias	CCREF	28,45	1,338	4,70%
	CCNTC015	28,84	1,404	4,87%
	CCNTC030	23,67	1,663	7,03%
7 dias	CCREF	33,45	1,164	3,48%
	CCNTC015	31,93	2,055	6,44%
	CCNTC030	30,43	1,223	4,02%
28 dias	CCREF	40,32	0,879	2,18%
	CCNTC015	38,62	1,719	4,45%
	CCNTC030	35,37	2,661	7,52%

<b>Concreto convencional</b>						
<b>Compressão</b>						
Comparação	Valores extremos		Valor de $t$	Hipótese Nula	Significat. diferente?	Conclusão
CCREF x CCNTC015	-2,228	2,228	-0,48783	Aceita	Não	CCREF = CCNTC015
CCREF x CCNTC030	-2,228	2,228	5,4913	Rejeitada	Sim	CCREF > CCNTC030
CCNTC015 x CCNTC030	-2,228	2,228	5,82055	Rejeitada	Sim	CCNTC015 > CCNTC030
CCREF x CCNTC015	-2,228	2,228	1,5804	Aceita	Não	CCREF = CCNTC015
CCREF x CCNTC030	-2,228	2,228	4,38253	Rejeitada	Sim	CCREF > CCNTC030
CCNTC015 x CCNTC030	-2,228	2,228	1,53271	Aceita	Não	CCNTC015 = CCNTC030
CCREF x CCNTC015	-2,228	2,228	2,15375	Aceita	Não	CCREF = CCNTC015
CCREF x CCNTC030	-2,228	2,228	4,32698	Rejeitada	Sim	CCREF > CCNTC030
CCNTC015 x CCNTC030	-2,228	2,228	2,51542	Rejeitada	Sim	CCNTC015 > CCNTC030

<b>Concreto auto-adensável</b>				
<b>Compressão</b>				
Tempo	Traço	Média (MPa)	D.P.	C.V.
3 dias	CAAREF	37,44	1,928	5,15%
	CAANTC015	35,82	0,856	2,39%
	CAANTC030	37,18	2,192	5,90%
7 dias	CAAREF	50,49	1,824	3,61%
	CAANTC015	49,12	3,072	6,26%
	CAANTC030	51,66	3,319	6,42%
28 dias	CAAREF	59,87	2,311	3,86%
	CAANTC015	60,45	2,311	3,82%
	CAANTC030	61,51	1,281	2,08%

<b>Concreto auto-adensável</b>						
<b>Compressão</b>						
Comparação	Valores extremos		Valor de <i>t</i>	Hipótese Nula	Significat. diferente?	Conclusão
CAAREF x CAANTC015	-2,228	2,228	1,88853	Aceita	Não	CCREF = CCNTC015
CAAREF x CAANTC030	-2,228	2,228	0,21767	Aceita	Não	CCREF = CCNTC030
CAANTC015 x CAANTC030	-2,228	2,228	-1,42284	Aceita	Não	CCNTC015 = CCNTC030
CAAREF x CAANTC015	-2,228	2,228	0,94183	Aceita	Não	CCREF = CCNTC015
CAAREF x CAANTC030	-2,228	2,228	-0,75786	Aceita	Não	CCREF = CCNTC030
CAANTC015 x CAANTC030	-2,228	2,228	-1,3787	Aceita	Não	CCNTC015 = CCNTC030
CAAREF x CAANTC015	-2,228	2,228	-0,28	Aceita	Não	CCREF = CCNTC015
CAAREF x CAANTC030	-2,228	2,228	-1,51975	Aceita	Não	CCREF = CCNTC030
CAANTC015 x CAANTC030	-2,228	2,228	-0,55317	Aceita	Não	CCNTC015 = CCNTC030

#### D. Análise estatística dos resultados de resistência à tração por compressão diametral

Para os dois traços realizados (Convencional e Autoadensável) a resistência média à tração por compressão diametral correspondeu a quatro corpos de prova do concreto de referência e a quatro corpos de prova do concreto contendo NTC (NTC015 e NTC030). Desta forma, o resultado de um corpo de prova de cada teor foi eliminado como *outlier*. Eles foram comparados da maneira descrita a seguir e utilizando-se dos seguintes parâmetros:

- Referência x NTC015;
- Referência x NTC030; e,
- NTC015 x NTC030.

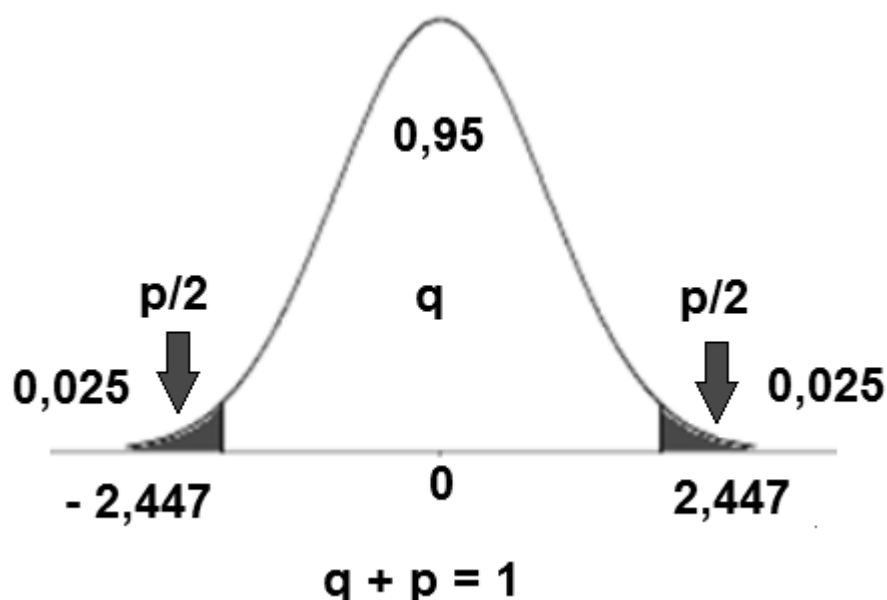
Graus de liberdade =  $2n - 2 = 2 \times 4 - 2 = 6$  (graus de liberdade).

Nível de confiança = 95 % ou  $\alpha = 5$  %.

$t = \pm 2,447$  (extraído da tabela *t-Student* para 6 graus de liberdade e  $\alpha = 5$  %).

Hipótese nula ( $H_0$ ): as médias amostrais são iguais ou  $\mu_1 - \mu_2 \geq 0$

Hipótese alternativa ( $H_a$ ): as médias amostrais são iguais ou  $\mu_1 - \mu_2 < 0$



<b>Concreto convencional</b>				
<b>Tração por Compressão Diametral</b>				
Tempo	Traço	Média (MPa)	D.P.	C.V.
3 dias	CCREF	2,88	0,258	8,97%
	CCNTC015	2,35	0,029	1,22%
	CCNTC030	2,51	0,137	5,44%
7 dias	CCREF	3,32	0,161	4,85%
	CCNTC015	2,92	0,185	6,33%
	CCNTC030	2,75	0,361	13,11%
28 dias	CCREF	3,17	0,228	7,19%
	CCNTC015	2,88	0,392	13,62%
	CCNTC030	3,15	0,274	8,69%

<b>Concreto convencional</b>						
<b>Tração por Compressão Diametral</b>						
Comparação	Valores extremos		Valor de <i>t</i>	Hipótese Nula	Significat. diferente?	Conclusão
CCREF x CCNTC015	-2,447	2,447	4,53138	Rejeitada	Sim	CCREF > CCNTC015
CCREF x CCNTC030	-2,447	2,447	2,83929	Rejeitada	Sim	CCREF > CCNTC030
CCNTC015 x CCNTC030	-2,447	2,447	-2,49492	Rejeitada	Sim	CCNTC015 < CCNTC030
CCREF x CCNTC015	-2,447	2,447	3,71066	Rejeitada	Sim	CCREF > CCNTC015
CCREF x CCNTC030	-2,447	2,447	3,22429	Rejeitada	Sim	CCREF > CCNTC030
CCNTC015 x CCNTC030	-2,447	2,447	0,90123	Aceita	Não	CCNTC015 = CCNTC030
CCREF x CCNTC015	-2,447	2,447	1,44622	Aceita	Não	CCREF = CCNTC015
CCREF x CCNTC030	-2,447	2,447	0,11925	Aceita	Não	CCREF = CCNTC030
CCNTC015 x CCNTC030	-2,447	2,447	-1,28224	Aceita	Não	CCNTC015 = CCNTC030

<b>Concreto auto-adensável</b>				
<b>Tração por Compressão Diametral</b>				
Tempo	Traço	Média (MPa)	D.P.	C.V.
3 dias	CAAREF	2,74	0,274	10,00%
	CAANTC015	3,51	0,407	11,59%
	CAANTC030	3,74	0,344	9,20%
7 dias	CAAREF	3,32	0,463	13,95%
	CAANTC015	3,76	0,231	6,16%
	CAANTC030	4,17	0,368	8,83%
28 dias	CAAREF	3,93	0,537	13,66%
	CAANTC015	4,50	0,242	5,39%
	CAANTC030	5,16	0,792	15,36%

<b>Concreto auto-adensável</b>						
<b>Tração por Compressão Diametral</b>						
Comparação	Valores extremos		Valor de <i>t</i>	Hipótese Nula	Significat. diferente?	Conclusão
CAAREF x CAANTC015	-2,447	2,447	-3,51318	Rejeitada	Sim	CCREF < CCNTC015
CAAREF x CAANTC030	-2,447	2,447	-5,08876	Rejeitada	Sim	CCREF < CCNTC030
CAANTC015 x CAANTC030	-2,447	2,447	-0,96513	Aceita	Não	CCNTC015 = CCNTC030
CAAREF x CAANTC015	-2,447	2,447	-1,89428	Aceita	Não	CCREF = CCNTC015
CAAREF x CAANTC030	-2,447	2,447	-3,20501	Rejeitada	Sim	CCREF < CCNTC030
CAANTC015 x CAANTC030	-2,447	2,447	-2,10553	Aceita	Não	CCNTC015 = CCNTC030
CAAREF x CAANTC015	-2,447	2,447	-2,1422	Aceita	Não	CCREF = CCNTC015
CAAREF x CAANTC030	-2,447	2,447	-2,86067	Rejeitada	Sim	CCREF < CCNTC030
CAANTC015 x CAANTC030	-2,447	2,447	-1,78139	Aceita	Não	CCNTC015 = CCNTC030

### E. Análise estatística dos resultados de módulo de elasticidade

Para os dois traços realizados (Convencional e Autoadensável), o módulo de elasticidade médio correspondeu a três corpos de prova de concreto de referência e três corpos de prova de concreto que contém NTC (NTC015 e NTC030). Eles foram comparados da maneira descrita a seguir e utilizando-se dos seguintes parâmetros:

- Referência versus NTC015;
- Referência versus NTC030; e,
- NTC015 versus NTC030.

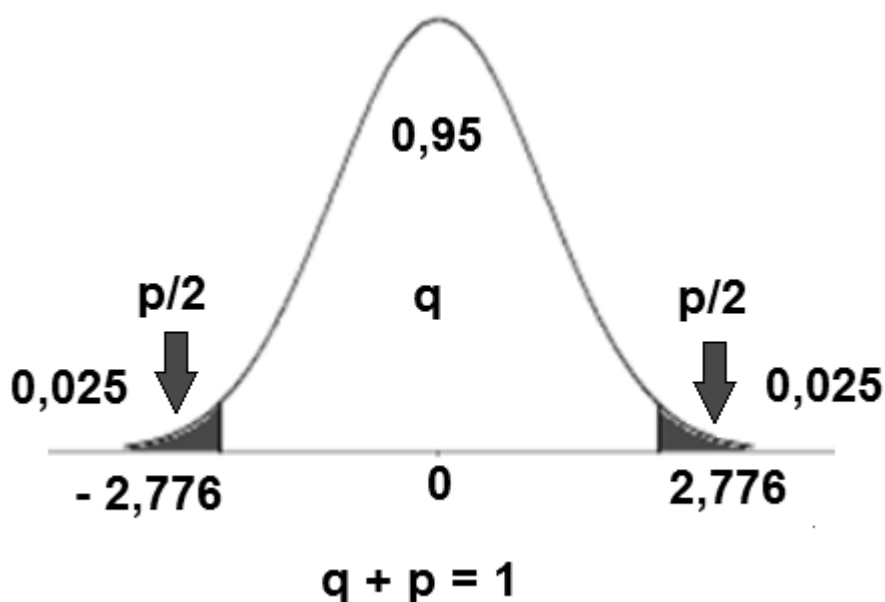
Graus de liberdade =  $2n - 2 = 2 \times 3 - 2 = 4$  (graus de liberdade).

Nível de confiança = 95 % ou  $\alpha = 5$  %.

$t = \pm 2,776$  (extraído da tabela *t-Student* para 4 graus de liberdade e  $\alpha = 5$  %).

Hipótese nula ( $H_0$ ): as médias amostrais são iguais ou  $\mu_1 - \mu_2 \geq 0$

Hipótese alternativa ( $H_a$ ): as médias amostrais são iguais ou  $\mu_1 - \mu_2 < 0$





<b>Concreto convencional</b>				
<b>Módulo de Elasticidade</b>				
Tempo	Traço	Média (MPa)	D.P.	C.V.
3 dias	CCREF	22,30	0,968	4,34%
	CCNTC015	24,28	0,059	0,24%
	CCNTC030	23,08	0,790	3,42%
7 dias	CCREF	26,18	1,095	4,18%
	CCNTC015	25,74	0,472	1,83%
	CCNTC030	25,87	0,245	0,95%
28 dias	CCREF	29,29	0,107	0,36%
	CCNTC015	29,12	0,373	1,28%
	CCNTC030	29,76	0,218	0,73%

<b>Concreto convencional</b>						
<b>Módulo de Elasticidade</b>						
Comparação	Valores extremos		Valor de $t$	Hipótese Nula	Significat. diferente?	Conclusão
CCREF x CCNTC015	-2,776	2,776	-4,09409	Rejeitada	Sim	CCREF < CCNTC015
CCREF x CCNTC030	-2,776	2,776	-1,25255	Aceita	Não	CCREF = CCNTC030
CCNTC015 x CCNTC030	-2,776	2,776	3,03542	Rejeitada	Sim	CCNTC015 > CCNTC030
CCREF x CCNTC015	-2,776	2,776	0,74658	Aceita	Não	CCREF = CCNTC015
CCREF x CCNTC030	-2,776	2,776	0,56609	Aceita	Não	CCREF = CCNTC030
CCNTC015 x CCNTC030	-2,776	2,776	-0,47929	Aceita	Não	CCNTC015 = CCNTC030
CCREF x CCNTC015	-2,776	2,776	0,89032	Aceita	Não	CCREF = CCNTC015
CCREF x CCNTC030	-2,776	2,776	-3,87649	Rejeitada	Sim	CCREF < CCNTC030
CCNTC015 x CCNTC030	-2,776	2,776	-2,97826	Rejeitada	Sim	CCNTC015 < CCNTC030

<b>Concreto auto-adensável</b>				
<b>Módulo de Elasticidade</b>				
Tempo	Traço	Média (MPa)	D.P.	C.V.
3 dias	CAAREF	25,55	0,364	1,42%
	CAANTC015	27,06	0,637	2,35%
	CAANTC030	25,11	0,137	0,55%
7 dias	CAAREF	28,64	0,607	2,12%
	CAANTC015	30,92	1,127	3,65%
	CAANTC030	27,59	1,153	4,18%
28 dias	CAAREF	34,35	1,120	3,26%
	CAANTC015	34,66	0,321	0,93%
	CAANTC030	30,93	0,801	2,59%

<b>Concreto auto-adensável</b>						
<b>Módulo de Elasticidade</b>						
Comparação	Valores extremos		Valor de $t$	Hipótese Nula	Significat. diferente?	Conclusão
CAAREF x CAANTC015	-2,776	2,776	-4,10452	Rejeitada	Sim	CCREF < CCNTC015
CAAREF x CAANTC030	-2,776	2,776	2,27729	Aceita	Não	CCREF = CCNTC030
CAANTC015 x CAANTC030	-2,776	2,776	5,97823	Rejeitada	Sim	CCNTC015 > CCNTC030
CAAREF x CAANTC015	-2,776	2,776	-3,56551	Rejeitada	Sim	CCREF < CCNTC015
CAAREF x CAANTC030	-2,776	2,776	1,60801	Aceita	Não	CCREF = CCNTC030
CAANTC015 x CAANTC030	-2,776	2,776	4,13115	Rejeitada	Sim	CCNTC015 > CCNTC030
CAAREF x CAANTC015	-2,776	2,776	-0,53195	Aceita	Não	CCREF = CCNTC015
CAAREF x CAANTC030	-2,776	2,776	4,97278	Rejeitada	Sim	CCREF > CCNTC030
CAANTC015 x CAANTC030	-2,776	2,776	8,65122	Rejeitada	Sim	CCNTC015 > CCNTC030