

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**Faculdade de Engenharia**  
**Programa de Pós-Graduação em Construção Civil**

Laís Malta Coelho Silveira

**PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CONCRETOS AUTOADENSÁVEL**  
**PRODUZIDOS COM NANOTUBOS DE CARBONO SINTETIZADOS**  
**DIRETAMENTE SOBRE O CLÍNQUER**

Belo Horizonte  
2020

Laís Malta Coelho Silveira

**PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CONCRETOS AUTOADENSÁVEL  
PRODUZIDOS COM NANOTUBOS DE CARBONO SINTETIZADOS  
DIRETAMENTE SOBRE O CLÍNQUER**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Construção Civil da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial à obtenção do título de Mestra em Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. José Marcio  
Fonseca Calixto

Coorientador: Prof. Dr. Luiz Orlando  
Ladeira

Belo Horizonte  
2020

S587p

Silveira, Laís Malta Coelho.

Propriedades mecânicas de concretos autoadensável produzidos com nanotubos de carbono sintetizados diretamente sobre o clínquer [recurso eletrônico] / Laís Malta Coelho Silveira. - 2020.

1 recurso online (138 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: José Márcio Fonseca Calixto.

Coorientador: Luiz Orlando Ladeira.

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

Apêndices: f. 119-138.

Bibliografia: f. 110 -118.

1. Construção civil - Teses. 2. Nanotubos de carbono - Teses.  
3. Concreto Autodensável – Teses. I. Calixto, José Márcio Fonseca.  
II. Ladeira, Luiz Orlando. III. Universidade Federal de Minas Gerais.  
Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 691 (043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
CURSO DE MESTRADO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

## ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Às quatorze horas do dia vinte e oito de setembro de dois mil e vinte, por meio de sistema de interação de áudio e vídeo em tempo real, realizou-se a sessão pública para a defesa da Dissertação de **Laís Malta Coelho Silveira**. A presidência da sessão coube ao Prof. **José Márcio Fonseca Calixto** (orientador). Inicialmente, o presidente fez a apresentação da Comissão Examinadora assim constituída: Profa. Júnia Nunes de Paula [CEFET-MG], Prof. Luiz Orlando Ladeira [DEQ-UFMG], Profa. Adriana Guerra Gumieri [DEMC-UFMG] e Prof. Orientador José Márcio Fonseca Calixto [DEMC-UFMG]. Em seguida, a candidata fez a apresentação do trabalho que constitui sua Dissertação de Mestrado, intitulada: "*PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CONCRETOS AUTOADENSÁVEL PRODUZIDOS COM NANOTUBOS DE CARBONO SINTETIZADOS DIRETAMENTE SOBRE O CLÍNQUER*". Seguiu-se a arguição pelos examinadores elogiando, após, a Comissão reuniu-se, sem a presença da candidata e do público e decidiu considerar **aprovada** a Dissertação de Mestrado. O resultado final foi comunicado publicamente à candidata pelo presidente da Comissão. Nada mais havendo a tratar, o presidente encerrou a sessão e lavrou a presente ata que, depois de lida, se aprovada, será assinada pela Comissão Examinadora.

Assinatura dos membros da banca examinadora:



Documento assinado eletronicamente por **José Márcio Fonseca Calixto, Usuário Externo**, em 03/05/2022, às 16:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luiz Orlando Ladeira, Professor do Magistério Superior**, em 17/05/2022, às 18:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Adriana Guerra Gumieri, Professora do Magistério Superior**, em 18/05/2022, às 19:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Júnia Nunes de Paula, Usuário Externo**, em 23/05/2022, às 14:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo Chahud, Coordenador(a) de curso de pós-graduação**, em 25/05/2022, às 13:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1426621** e o código CRC **2D05E4E3**.

*“There’s no lemon so sour that you can’t make something resembling lemonade”*

*This is us.*

## **AGRADECIMENTOS**

Mais um ciclo se encerra. E quanto aprendizado! Nesse tempo de Mestrado tenho a sensação de ter vivido 10 anos em 2 anos e alguns meses. As dificuldades que eu encontrava durante minha trajetória acadêmica se misturavam com as dificuldades que eu enfrentava na minha vida pessoal. Não foi nada fácil! Pelo contrário que fase desafiadora! E eu não poderia estar em um lugar melhor do que eu estive rodeada de pessoas tão incríveis. O sentimento é de gratidão!

Em primeiro lugar, agradeço, de maneira muito especial, ao meu orientador Calixto, por confiar na minha capacidade, pela oportunidade de trabalharmos juntos e por me receber tão bem! Obrigada pela paciência, pelos ensinamentos, disponibilidade e presteza! Levarei comigo para sempre!

Ao professor Luiz Orlando, agradeço por todo apoio e conhecimento compartilhado!

Aos amigos do CTNANO, por dividirem momentos incríveis comigo e tornarem minha caminhada mais leve e feliz. Fica tão difícil falar de todo mundo pois cada um contribuiu de alguma forma para que esse trabalho pudesse acontecer, além de terem dividido dias maravilhosos comigo. Em especial, agradeço a equipe da Frente de Cimento e Cerâmicos, pelo apoio durante minha caminhada! Ao Tarcizo e Raquel, agradeço imensamente pela disponibilidade, boa vontade e paciência! Vocês são demais! Sr. Afonso, agradeço a ajuda e boa vontade que sempre teve! Leo, obrigada por todo apoio, paciência e parceria durante esse tempo que convivemos! Foi uma honra dar continuidade ao trabalho que você começou! Lucas e Paloma, sou muito grata por ter convivido com vocês. Aos meus IC's queridos, Guilherme, Carlos, Vinícius e Ana Cristina, agradeço por me ajudarem tanto! Minhas amigas Anna e Luísa, obrigada pela amizade! Entre nanotubos e conversas eternas, levarei vocês sempre comigo. Ao CTNANO serei eternamente grata pelas oportunidades de aprendizado e crescimento que tive e por estar rodeada

dos melhores profissionais. Agradeço o suporte impecável. Tenho um orgulho imenso por ter feito parte!

A Intercement, em especial a equipe da central de concreto em Praia Grande/SP, pela oportunidade de realizar a parte experimental dessa pesquisa. Jorge, Paulo e Valdenir, agradeço por me receberam tão bem, pela ajuda, boa vontade e dedicação em fazer com que tudo saísse exatamente como planejado. Agradeço também ao Sandro, Guilherme e Suzuki por toda troca de conhecimento e boa vontade em ajudar. Por fim, não posso deixar de mencionar e agradecer novamente minha amiga Luísa que esteve comigo em Praia Grande. Seu apoio e companhia foram indispensáveis.

A FUNDEP, agradeço o apoio financeiro.

Ao Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da UFMG (DEMC), incluindo colegas, professores e funcionários, por todo apoio e troca de conhecimento.

Aos queridos amigos da UFMG, Pri e Gilberto! A companhia de vocês foi essencial e nossa amizade é para sempre! Sempre brincamos que somos “presentes da UFMG” e é bem isso! Vocês são dois presentinhos incríveis que Deus permitiu que entrasse na minha vida.

Ao meu namorado, amigos e familiares, agradeço de todo o coração pela paciência que sempre tiveram, por escutarem com tanta atenção (mesmo que em 90% das vezes sem entender nada do que eu estava falando), as diversas vezes que mencionei os “nanotubos de carbono” (risos). Obrigada por me olharem com orgulho, por fazerem questão, pelo apoio incondicional.

Por fim, agradeço à Deus pelo lugar certo e hora certa. Por guiar meus caminhos. Por não me deixar desistir e me dar forças em todos os momentos.

## RESUMO

Pesquisas e estudos importantes vêm sendo desenvolvidos utilizando a nanotecnologia em materiais de construção. Desde a sua descoberta, os nanotubos de carbono (NTC) têm se mostrado capazes de potencializar compósitos em várias de suas propriedades e isto tem chamado a atenção para o uso dos NTC em matrizes cimentícias. Avanços na tecnologia do concreto têm permitido a melhoria de suas propriedades nos estados fresco e endurecido, pelo emprego de novos materiais e uso de novas técnicas. Nesse trabalho, concretos autoadensável (CAA) foram produzidos com nanotubos de carbono sintetizados diretamente sobre o clínquer. Parte do cimento utilizada na produção dos concretos foi substituída por clínquer nanoestruturado contendo diferentes teores de nanotubos de carbono (0,5%, 0,75% e 1% em relação à massa total de cimento anidro). Foram avaliadas a trabalhabilidade dos concretos no estado fresco e no estado endurecido as resistências à compressão e à tração por compressão diametral bem como o módulo de elasticidade. O desempenho desses concretos foi comparado com um CAA de referência, sem nanotubos. Os resultados dos CAA estudados por Borges (2019), em sua pesquisa, também foram incluídos nessa análise. A avaliação dos resultados revela que CAA contendo teores de NTC acima de 0,5 % não apresentaram ganhos significativos de desempenho. Além disso, conclui-se que um possível teor ótimo de NTC a ser adicionado ao concreto autoadensável, para que o mesmo alcance seu melhor desempenho, esteja entre os teores de 0,30 e 0,50 % de NTC.

**Palavras-Chave:** concreto autoadensável, clínquer nanoestruturado, nanotubos de carbono, trabalhabilidade, propriedades mecânicas

## **ABSTRACT**

Important research investigations have been developed using nanotechnology in building materials. Since their discovery, carbon nanotubes (CNTs) have been able to improve composite material properties and this has drawn attention to the use of CNTs in cementitious matrices. Advances in concrete technology have allowed improved behavior in the fresh and hardened states employing new materials and techniques. In this work, self-compacting concretes (SCC) were produced with carbon nanotubes synthesized directly on the clinker. Part of the cement used in the concrete production was replaced by nanostructured clinker containing different rates of carbon nanotubes (0.5%, 0.75%, and 1% of the cement mass). The workability of the SCC in the fresh state was evaluated and, in the hardened state, the compressive and splitting tensile strength as well as the modulus of elasticity. The behavior of these concretes was compared to a reference SCC, without carbon nanotubes. The results of the SCC investigated by Borges (2019) are also included in the analysis. The evaluation of the test results reveals that the SCC with NTC contents above 0.5% did not show any improvement in mechanical behavior. Besides, the results also show that the best performance of the investigated SCC was achieved for NTC content between 0.3 and 0.5 %.

**Keywords:** self-compacting concrete, carbon nanotubes, workability, mechanical strength

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.1 - Representação esquemática de estruturas de diferentes formas de carbono elementar: (a) diamante; (b) carbono desordenado (amorfo); (c) grafeno; (d) grafite; (e) fulereno C60; (f) nanotubo de carbono de parede simples..... | 38 |
| Figura 2.2 - Representação esquemática de: (A) nanotubo de paredes múltiplas; (B) nanotubo de parede simples .....                                                                                                                         | 39 |
| Figura 2.3 - Valores de slump test (mm) para diferentes teores de NTC .....                                                                                                                                                                | 46 |
| Figura 3.1 - Curvas da composição granulométrica do agregado graúdo .....                                                                                                                                                                  | 53 |
| Figura 3.2 - Curvas da composição granulométrica do agregado miúdo .....                                                                                                                                                                   | 56 |
| Figura 3.3 - Fluxograma de obtenção do clínquer nanoestruturado .....                                                                                                                                                                      | 58 |
| Figura 3.4 - Clínquer nanoestruturado lote CNT00319 .....                                                                                                                                                                                  | 59 |
| Figura 3.5 - Análise termogravimétrica do clínquer nanoestruturado de lote CNT00319.....                                                                                                                                                   | 60 |
| Figura 3.6 - Imagens de MEV do clínquer nanoestruturado de lote CNT00319 .....                                                                                                                                                             | 61 |
| Figura 3.7 - Imagens de MET do clínquer nanoestruturado de lote CNT00319 .....                                                                                                                                                             | 62 |
| Figura 3.8 - Histograma dos diâmetros de NTC e NFC produzidos sobre o clínquer de lote CNT00319 .....                                                                                                                                      | 63 |
| Figura 3.9 - a) lubrificação das fôrmas com óleo desmoldante; b) materiais pesados e separados; c) CAA nas fôrmas .....                                                                                                                    | 66 |

|                                                                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 3.10 - a) CAA sendo colocado no cone; b) retirada do cone c) concreto exposto na chapa metálica d) medida do espalhamento .....                              | 68 |
| Figura 3.11 - Ensaio do anel J.....                                                                                                                                 | 71 |
| Figura 3.12 - a) Fôrmas já identificadas e com o óleo desmoldante; b) CAA sendo colocado nas fôrmas c) CAA nas fôrmas.....                                          | 74 |
| Figura 3.13 - a) Posicionamento do CP para ensaio de compressão; b) Posicionamento do CP para ensaio de módulo de elasticidade .....                                | 79 |
| Figura 3.14 - a) Posicionamento do CP para ensaio de tração por compressão diametral; b) Detalhes do aparato para posicionamento de CP's na máquina de ensaio ..... | 81 |
| Figura 3.15 - Corpos de prova depois de rompidos, seguindo a sequência: CAAREF, CAANTC050, CAANTC075 e CAANTC1.....                                                 | 81 |
| Figura 4.1 - Resultados do slump flow test do concreto.....                                                                                                         | 83 |
| Figura 4.2 - Tempo até o concreto atingir o espalhamento de 500 mm .....                                                                                            | 84 |
| Figura 4.3 - Resultados do slump flow test (inicial e após 15 minutos de espera).....                                                                               | 85 |
| Figura 4.4 - Resultados do tempo até os CAA atingirem o espalhamento de 500 mm (inicial e após 15 minutos de espera).....                                           | 86 |
| Figura 4.5 - Comparação entre os diâmetros médios dos espalhamentos utilizando o anel J e sem ele .....                                                             | 87 |
| Figura 4.6 - Resultados do teor de ar incorporado nos concretos autoadensável.....                                                                                  | 88 |

|                                                                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 4.7 - Resultados de resistência à compressão por idade .....                                           | 90  |
| Figura 4.8 - Resultados de resistência à compressão por idade, incluindo os resultados de Borges (2019) ..... | 92  |
| Figura 4.9 - Resultados de resistência à tração por idade .....                                               | 94  |
| Figura 4.10 - Resultados de resistência à tração por idade, incluindo os resultados de Borges (2019) .....    | 96  |
| Figura 4.11 - Diagrama tensão versus deformação dos CAA aos 3 dias .....                                      | 98  |
| Figura 4.12 - Diagrama tensão versus deformação dos CAA aos 7 dias .....                                      | 99  |
| Figura 4.13 - Diagrama tensão versus deformação dos CAA aos 28 dias .....                                     | 100 |
| Figura 4.14 - Diagrama tensão versus deformação dos CAA aos 56 dias .....                                     | 101 |
| Figura 4.15 - Resultados de módulo de elasticidade por idade .....                                            | 103 |
| Figura 4.16 - Resultados de módulo de elasticidade por idade, incluindo os resultados de Borges (2019) .....  | 104 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 2.1 - Comparação de propriedades mecânicas dos NTC .....                                                                  | 40 |
| Tabela 3.1 - Características físicas do cimento CP-V ARI .....                                                                   | 51 |
| Tabela 3.2 - Características químicas do cimento CP-V ARI.....                                                                   | 51 |
| Tabela 3.3 - Características do agregado graúdo.....                                                                             | 52 |
| Tabela 3.4 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo.....                                                                 | 52 |
| Tabela 3.5 - Características da areia natural .....                                                                              | 54 |
| Tabela 3.6 - Distribuição granulométrica da areia natural .....                                                                  | 54 |
| Tabela 3.7 - Características da areia industrial .....                                                                           | 54 |
| Tabela 3.8 - Distribuição granulométrica da areia industrial.....                                                                | 55 |
| Tabela 3.9 - Composição do agregado miúdo para o concreto<br>autoadensável.....                                                  | 55 |
| Tabela 3.10 - Aditivos utilizados na produção dos CAA .....                                                                      | 57 |
| Tabela 3.11 - Classes de espalhamento do CAA em função de sua<br>aplicação .....                                                 | 67 |
| Tabela 3.12 - Classes de viscosidade plástica aparente do CAA em função de<br>sua aplicação .....                                | 69 |
| Tabela 3.13 - Classes de habilidade passante do CAA em função de sua<br>aplicação .....                                          | 71 |
| Tabela 3.14 - Quantidade de CP's moldados, para cada traço de CAA.....                                                           | 74 |
| Tabela 4.1 - Diferença entre os diâmetros de espalhamento com e sem anel<br>J .....                                              | 87 |
| Tabela 4.2 - Resumo de resistência à compressão por idade .....                                                                  | 89 |
| Tabela 4.3 - Resumo do teste t-Student para resistência à compressão por<br>idade .....                                          | 90 |
| Tabela 4.4 - Resumo dos resultados de Borges (2019), para resistência à<br>compressão .....                                      | 91 |
| Tabela 4.5 - Resumo do teste t-Student para resistência à compressão por<br>idade incluindo os resultados de Borges (2019) ..... | 92 |
| Tabela 4.6 - Resumo de resistência à tração por idade .....                                                                      | 94 |
| Tabela 4.7 - Resumo do teste t-Student para resistência à tração por idade                                                       | 95 |
| Tabela 4.8 - Resumo dos resultados de Borges (2019), para resistência à<br>tração .....                                          | 96 |

|                                                                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 4.9 - Resumo do teste t-Student para resistência à tração por idade incluindo os resultados de Borges (2019)..... | 97  |
| Tabela 4.10 - Resumo de módulo de elasticidade do concreto por idade .....                                               | 102 |
| Tabela 4.11 - Resumo do teste t-Student para módulo de elasticidade por idade .....                                      | 103 |
| Tabela 4.12 - Resumo dos resultados de Borges (2019), para módulo de elasticidade .....                                  | 104 |
| Tabela 4.13 - Resumo do teste t-Student para módulo de elasticidade por idade .....                                      | 105 |

## LISTA DE QUADROS

|                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Quadro 2.1 - Composição do clínquer .....                                               | 29 |
| Quadro 2.2 - Limites de composição do cimento Portland tipo CP-V.....                   | 30 |
| Quadro 3.1 - Características do clínquer nanoestruturado .....                          | 59 |
| Quadro 3.2 - Proporções dos materiais constituintes dos concretos<br>autoadensável..... | 64 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|           |                                                         |
|-----------|---------------------------------------------------------|
| ABNT      | Associação Brasileira de Normas Técnicas                |
| a/c       | Relação água/cimento                                    |
| ACI       | <i>American Concrete Institute</i>                      |
| ARI       | Alta resistência inicial                                |
| ASCE      | <i>American Society of Civil Engineers</i>              |
| ASTM      | <i>American Society for Testing and Materials</i>       |
| CAA       | Concreto autoadensável                                  |
| CAD       | Concreto de alto desempenho                             |
| CAAREF    | Concreto autoadensável de referência                    |
| CAANTC050 | Concreto autoadensável com 0,5% de NTC                  |
| CAANTC075 | Concreto autoadensável com 0,75% de NTC                 |
| CAANTC1   | Concreto autoadensável com 1% de NTC                    |
| CCV       | Concreto convencional                                   |
| 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>                        |
| EA        | Equivalente alcalino                                    |
| GCP       | <i>Grace Construction Products Applied Technologies</i> |
| 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                                       |
| TG        | Técnica de termogravimetria                             |
| UFMG      | Universidade Federal de Minas Gerais                    |
| ZTI       | Zona de transição intersticial                          |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                         |                                                                                         |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| %                       | Porcentagem ou por cento                                                                |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$ | Óxido de alumínio                                                                       |
| -COOH                   | Carboxila (radical)                                                                     |
| $\text{CO}_2$           | Dióxido de carbono (gás carbônico)                                                      |
| $\text{C}_3\text{A}$    | Aluminato tricálcico                                                                    |
| $\text{C}_2\text{S}$    | Silicato dicálcico                                                                      |
| $\text{C}_3\text{S}$    | Silicato tricálcico                                                                     |
| $\text{CaO}$            | Óxido de cálcio                                                                         |
| $\text{CaCO}_3$         | Carbonato de cálcio                                                                     |
| C-S-H                   | Silicato de cálcio hidratado                                                            |
| $\text{C}_4\text{AF}$   | Ferroaluminato tetracálcico                                                             |
| $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | Óxido de ferro                                                                          |
| $\text{K}_2\text{O}$    | Óxido de potássio                                                                       |
| $\text{MgO}$            | Óxido de magnésio                                                                       |
| $\text{Na}_2\text{O}$   | Óxido de sódio                                                                          |
| $\text{SiO}_2$          | Óxido de silício                                                                        |
| $\text{SO}_3$           | Trióxido de enxofre                                                                     |
| $\pi$                   | 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>épsilon</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>1 INTRODUÇÃO.....</b>                                                       | <b>20</b> |
| 1.1 Considerações iniciais .....                                               | 20        |
| 1.2 Justificativa .....                                                        | 22        |
| 1.3 Objetivo .....                                                             | 23        |
| 1.3.1 Objetivo geral.....                                                      | 23        |
| 1.3.2 Objetivos específicos.....                                               | 23        |
| <b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>                                            | <b>24</b> |
| 2.1 Concreto autoadensável.....                                                | 24        |
| 2.1.1 Materiais constituintes .....                                            | 27        |
| 2.1.2 Dosagem de concreto autoadensável .....                                  | 33        |
| 2.1.3 Vantagens.....                                                           | 36        |
| 2.2 Nanotubos de carbono.....                                                  | 36        |
| 2.2.1 Método de síntese por Deposição Química da Fase Vapor (CVD) .            | 39        |
| 2.3 Utilização e comportamento de concretos com nanotubos de carbono           | 41        |
| 2.3.1 Trabalhabilidade do concreto com nanotubos de carbono (NTC) ....         | 43        |
| 2.3.2 Propriedades mecânicas de concretos com nanotubos de carbono (NTC) ..... | 45        |
| <b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>                                             | <b>49</b> |
| 3.1 Materiais utilizados na pesquisa .....                                     | 49        |
| 3.1.1 Cimento.....                                                             | 49        |
| 3.1.2 Agregados graúdos e miúdos .....                                         | 51        |
| 3.1.3 Aditivos .....                                                           | 56        |
| 3.1.4 Clínquer nanoestruturado.....                                            | 57        |
| 3.2 Descrição da composição dos concretos autoadensável .....                  | 62        |
| 3.3 Produção dos concretos .....                                               | 63        |
| 3.4 Ensaio de caracterização dos concretos no estado fresco.....               | 66        |

|          |                                                                                         |            |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.4.1    | Determinação do espalhamento e tempo de escoamento .....                                | 66         |
| 3.4.2    | Determinação da habilidade passante – Ensaio do anel J .....                            | 68         |
| 3.4.3    | Ensaio do teor de ar incorporado pelo método pressométrico .....                        | 71         |
| 3.5      | Moldagem dos corpos de prova .....                                                      | 72         |
| 3.6      | Ensaaios dos concretos no estado endurecido.....                                        | 73         |
| 3.6.1    | Resistência à compressão axial e módulo de elasticidade .....                           | 74         |
| 3.6.2    | Resistência à tração por compressão diametral.....                                      | 77         |
| <b>4</b> | <b>APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E ANÁLISE.....</b>                                       | <b>80</b>  |
| 4.1      | Resultados e análise dos ensaios dos concretos autoadensável no estado fresco .....     | 80         |
| 4.1.1    | Ensaio de espalhamento e tempo de escoamento .....                                      | 80         |
| 4.1.2    | Ensaio da habilidade passante - Anel J .....                                            | 85         |
| 4.1.3    | Ensaio do teor de ar incorporado pelo método pressométrico .....                        | 86         |
| 4.2      | Resultados e análise dos ensaios dos concretos autoadensável no estado endurecido ..... | 87         |
| 4.2.1    | Resistência à compressão .....                                                          | 87         |
| 4.2.2    | Resistência à tração por compressão diametral.....                                      | 92         |
| 4.2.3    | Relação tensão versus deformação na compressão.....                                     | 97         |
| 4.2.4    | Módulo de elasticidade tangente inicial .....                                           | 100        |
| <b>5</b> | <b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>                               | <b>105</b> |
| <b>6</b> | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                                                 | <b>109</b> |
| <b>7</b> | <b>APÊNDICES .....</b>                                                                  | <b>118</b> |

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações iniciais

O desenvolvimento dos materiais, no que diz respeito a sua evolução, caminhou paralelamente a história de desenvolvimento da civilização, visto da necessidade de novas tecnologias para atender suas principais demandas (SOUZA, 2015).

Avanços na tecnologia do concreto têm permitido a melhoria de suas propriedades nos estados fresco e endurecido, pelo emprego de novos materiais e uso de novas técnicas. O concreto evoluiu de uma composição básica, composta por cimento, areia, brita e água, para misturas complexas, contendo, por exemplo, aditivos químicos, adições minerais e fibras, dando origem a concretos especiais como o concreto de alto desempenho (CAD) e o autoadensável (CAA) entre outros. Isso tem resultado em concretos mais resistentes às diversas formas de degradação, mais duráveis e, por consequência, de menor impacto ambiental (GIL, 2018).

Estudos importantes vêm sendo desenvolvidos utilizando a nanotecnologia em materiais de construção, como por exemplo, no cimento Portland. A nanotecnologia explora as propriedades e fenômenos que ocorrem na escala nano ( $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ), onde a matéria apresenta um comportamento especial devido às elevadas áreas superficiais e aos efeitos quânticos. Segundo Souza (2015), muitas pesquisas relacionadas a nanomateriais estão sendo desenvolvidas, procurando a compreensão dos fenômenos e comportamentos físicos e químicos nesta escala, além do desenvolvimento de materiais compostos com propriedades potencializadas, utilizando, como, por exemplo, os nanotubos de carbono (NTC).

Desde a sua descoberta, os nanotubos de carbono têm se mostrado capazes de potencializar propriedades de vários materiais e isto tem chamado a atenção para o uso deles em matrizes cimentícias. A aplicação dos NTC em matrizes

cimentícias pode ser realizada na forma da mistura física desses nanomateriais, adicionados diretamente no cimento Portland ou na água de amassamento. A outra forma de emprego é pelo uso de um cimentonanoestruturado, ou seja, um cimento que possui nanotubos de carbono sintetizados sobre os grãos de seus componentes. O processo descrito por último, que foi utilizado nesta pesquisa, além de ser mais eficiente, apresenta grande vantagem sobre a mistura física, uma vez que diminui a problemática da dispersão dos NTC em água, já que estes materiais são hidrofóbicos (SIDDIQUE e METHA, 2013).

A incorporação de nano partículas, como os nanotubos de carbono, gera um efeito de aumento da superfície de contato e da reatividade, o que traz vantagens em termos de eficiência e reforço (SANTOS, 2016).

Entende-se por concreto autoadensável o concreto capaz de preencher os espaços vazios de fôrmas com fluxo sem segregação e adensar-se apenas pelo efeito da gravidade sem qualquer vibração ou compactação. Esta propriedade é denominada capacidade de preenchimento ou deformabilidade, e é definida pela fluidez e coesão da mistura (MELO, 2005).

Segundo Borges (2019), a adição de NTC não promoveu ganhos de resistência à tração no concreto convencional. Porém, no concreto autoadensável (CAA), melhorias de resistência à tração foram obtidas até a idade de 28 dias. No CAA com 0,3 % de nanotubos de carbono em relação à massa de cimento, ganhos de 36 e 31 % na resistência à tração foram obtidos nas idades de 3 e 28 dias respectivamente.

Neste trabalho, concreto autoadensável (CAA) foi produzido com nanotubos de carbono sintetizados diretamente sobre o clínquer. Parte do cimento utilizado na produção dos concretos foi substituída por clínquer nanoestruturado contendo diferentes teores de nanotubos de carbono. O comportamento desses concretos foi comparado com um CAA de referência sem nanotubos.

## 1.2 Justificativa

Alguns materiais finos, com granulometria reduzida, como a sílica ativa e a cinza volante, já vêm sendo empregados como constituintes do concreto, visando ganhos de durabilidade. Esses produtos em escala micrométrica contribuem para o preenchimento de vazios, o que pode acarretar na melhora do comportamento do concreto no que se refere às propriedades mecânicas e microestrutura do compósito. De acordo com Rodrigues (2017), as melhorias nas propriedades mecânicas do concreto conseguidas nas últimas décadas foram obtidas por meio da redução da porosidade capilar.

O cimento Portland hidratado é composto majoritariamente por um silicato de cálcio hidratado comumente chamado C-S-H. Durante a hidratação, o C-S-H recobre progressivamente os grãos de cimento anidro e preenche, aos poucos, o espaço intergranular. Essa fase hidratada é considerada como o verdadeiro ligante da pasta de cimento endurecida e é a principal responsável por grande parte das propriedades da pasta de cimento endurecida. O C-S-H é um material com baixa resistência à tração (GLEIZE, 2007).

Como os resultados obtidos pela inserção de partículas micrométricas em estruturas de concreto são relevantes, partículas ainda menores, em escala nanométrica, podem promover desempenho ainda melhor. Segundo Santra *et al.* (2012), os nanomateriais podem preencher os espaços entre os grãos do silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e agir como um “nanofiller” reduzindo efetivamente sua porosidade/permeabilidade.

Esse estudo apresenta uma continuação da pesquisa de Borges (2019). Por isso a escolha dos materiais e métodos utilizados por ele foi mantida, sendo a única diferença as porcentagens de nanotubos de carbono utilizados nos concretos. Na pesquisa de Borges (2019), foram obtidas melhorias no desempenho dos concretos autoadensável nanoestruturados, o que justifica a escolha do tema para desenvolvimento do presente estudo.

## 1.3 Objetivo

### 1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta dissertação de mestrado é analisar o comportamento de concretos autoadensável (CAA), já fabricados e utilizados na rotina da central concreteira da InterCement®, localizada em Praia Grande/SP, produzidos com nanotubos de carbono (NTC) sintetizados diretamente sobre o clínquer. Teores de NTC de 0,5%, 0,75% e 1% em relação à massa total de cimento. O desempenho desses concretos foi comparado com um CAA de referência sem nanotubos.

### 1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desse estudo são:

- 1 – Avaliar a trabalhabilidade dos CAA no estado fresco por meio dos ensaios de espalhamento e do tempo de escoamento (“*Slump Flow*” – Método do Cone de Abrams) e de determinação da habilidade passante sob fluxo livre (Método do Anel J).
- 2 – Avaliar nas idades de 3, 7, 28 e 56 dias a resistência à compressão e à tração por compressão diametral dos diferentes CAA bem como seus módulos de elasticidade.
- 3 – Realizar um estudo comparativo de desempenho dos CAA contendo ou não NTC. Os resultados do estudo de Borges (2019) estão inclusos nessa análise comparativa.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Concreto autoadensável

O concreto autoadensável foi desenvolvido no Japão, no final da década de 1980, como alternativa para solucionar problemas relacionados à escassez de mão de obra e à realização de concretagens em locais de difícil acesso. A eliminação da etapa de adensamento mecânico é permitida por sua elevada fluidez e estabilidade reológica no estado fresco e torna este material uma excelente alternativa para aplicação em elementos complexos e com elevada densidade de armaduras. Aos poucos se percebeu o elevado potencial desta tecnologia, sendo empregada em substituição ao concreto convencional em diversas aplicações (DACZKO, 2012).

Entende-se por concreto autoadensável (CAA) o concreto cuja compactação é obtida apenas por meio de seu próprio peso, com a ausência de vibração ou compactação externa. É capaz de fluir pela ação da gravidade, preenchendo os espaços vazios da fôrma e se autoadensar (OLIVEIRA, 2011).

O concreto autoadensável é aquele capaz de fluir, autoadensar pelo seu peso próprio, preencher a fôrma e passar por embutidos (armaduras, dutos e insertos), enquanto mantém sua homogeneidade (ausência de segregação) nas etapas de mistura, transporte, lançamento e acabamento (ADNORMAS, 2018).

Um concreto só é considerado autoadensável se três propriedades forem alcançadas simultaneamente: fluidez, coesão necessária para que a mistura escoe intacta entre as barras de aço (habilidade passante) e resistência à segregação (EFNARC, 2002).

Segundo Tutikian e Dal Molin (2015), fluidez é a propriedade que caracteriza a capacidade do CAA fluir dentro da forma e preencher todos os espaços. Habilidade passante é a propriedade que caracteriza a capacidade da mistura

escoar pela fôrma, passando por entre as armaduras de aço sem obstrução do fluxo ou segregação. E resistência à segregação é a propriedade que define a capacidade do CAA de se manter coeso ao fluir dentro das fôrmas, passando ou não por obstáculos.

De acordo com Guimarães (2005), reologia é a parte da física que pesquisa as propriedades e o comportamento mecânico de corpos deformáveis que não são nem sólidos e nem líquidos.

Segundo Mehta e Monteiro (2014), a principal diferença entre o concreto comum e o autoadensável são as características reológicas superiores deste último. Um concreto autoadensável típico é um concreto fluido com um valor de abatimento acima de 200 mm e um valor de espalhamento acima de 600 mm (diâmetro da amostra de concreto após a remoção do cone de abatimento), de alta coesão, e que pode ser lançado e adensado sem a ajuda de vibradores. Essas propriedades são comumente alcançadas com uma maior relação de pasta de cimento/agregado do que a normalmente utilizada em concretos comuns.

Segundo Oliveira (2011), o comportamento reológico do concreto autoadensável (CAA) pode ser comparado a um modelo de Bingham, pois é um material que apresenta alta fluidez sem segregação e baixa tensão de cisalhamento. Portanto, pode ser caracterizado por dois parâmetros: viscosidade plástica e a tensão de cisalhamento mínima. No estado fresco começa a fluir somente após a tensão de cisalhamento exceder a tensão de escoamento. O fluido se comporta como um sólido ideal (que não flui) até que a tensão tangencial aplicada supere a tensão de escoamento.

O concreto necessita de uma tensão mínima para iniciar seu escoamento, composta pelo atrito e pela coesão entre os materiais que o compõem. Essa tensão mínima pode ser atingida pelo peso próprio do concreto quando este for lançado sobre uma superfície (GUIMARÃES, 2005).

A viscosidade plástica aparente do concreto é a propriedade relacionada à consistência da mistura, ou seja, à coesão, e que influencia na resistência e comportamento do concreto ao escoamento. Quanto maior a viscosidade do concreto, maior a sua resistência ao escoamento (ADNORMAS, 2018).

Segundo Tutikian e Dal Molin (2015), a viscosidade plástica é conferida pelo aditivo superplastificante e pela água. Os parâmetros reológicos que diferem o concreto autoadensável (CAA) do concreto convencional (CCV) são: tensão de escoamento menor e viscosidade plástica maior.

O parâmetro tensão de escoamento está relacionado com o abatimento (ou espalhamento), de forma que quanto maior a tensão de escoamento menor a fluidez e vice-versa. Dessa forma, o CAA deve apresentar um valor muito pequeno ou nulo de tensão de escoamento de modo que ele apresente elevada fluidez.

Segundo Zerbino *et al.* (2006), o CAA possui tensão de escoamento quase nula e uma viscosidade suficiente para garantir o transporte, o preenchimento e o adensamento sem que ocorra a segregação.

As propriedades do CAA devem ser quantificadas ou qualificadas por meio de ensaios que representem seu comportamento. Para quantificar os parâmetros reológicos que governam o CAA no estado fresco devem-se realizar ensaios prévios com reômetro; no entanto, esse equipamento tem um elevado custo e é de difícil aplicação nos canteiros de obra. Dessa forma, foram desenvolvidos ensaios e procedimentos simples que avaliam de forma qualitativa e quantitativa os parâmetros reológicos do CAA, sendo que alguns já são normalizados e utilizados em campo.

Com relação ao CAA no estado endurecido, os ensaios realizados são exatamente os mesmos realizados no concreto convencional. Maior conteúdo de finos, maior presença de misturas redutoras de água e a limitação do tamanho máximo do agregado grão em relação ao concreto convencional

afetam o comportamento do concreto autoadensável no estado endurecido (ASLANI; NEJADI, 2012).

Conforme Bonen e Shah (2004), as propriedades do CAA variam em função das formulações utilizadas, contudo a literatura revela que suas propriedades mecânicas têm se mostrado equivalentes ou até mesmo melhores que as propriedades correspondentes do concreto convencional.

Pesquisas sobre CAA vêm se desenvolvendo utilizando diferentes materiais, com o objetivo de conhecer seu comportamento, melhorar suas propriedades e verificar sua aplicabilidade em diferentes elementos estruturais. Propostas de novos equipamentos de ensaios são desenvolvidas com intuito de melhor caracterizar suas propriedades, principalmente no estado fresco (LISBÔA, 2004).

De acordo com Shehata *et al.* (2012), o comportamento do concreto autoadensável ao longo do tempo depende dos tipos e teores das partículas finas (cimento e adições: cinza volante, sílica ativa, escória, metacaulim, cinza de casca de arroz, pó de calcário, por exemplo) e dos aditivos empregados. Comparado com o concreto vibrado da mesma classe de resistência, a redução do teor de agregados graúdos no concreto autoadensável pode acarretar maior retração e deformação lenta além da redução do módulo de elasticidade.

#### *2.1.1 Materiais constituintes*

Os materiais utilizados para produção de concreto autoadensável são, basicamente, os mesmos utilizados para a produção de concreto convencional, porém com uma proporção diferente entre os componentes. Nos CAA há uma maior adição de finos compostos por adições minerais ou “filers”. De acordo com Figueiredo (2019), a aplicação desses materiais mais finos auxilia nas propriedades do CAA no estado fresco, reduzindo o atrito entre os agregados, aumentando a viscosidade e gerando uma maior resistência à segregação. Além disso, nos CAA são utilizados aditivos plastificantes ou

superplastificantes, além de aditivos modificadores de viscosidade em alguns casos.

O CAA no estado fresco é sensível às variações de qualidade e uniformidade dos constituintes que o compõem. Em virtude dessa maior sensibilidade, uma proporção precisa dos materiais constituintes é essencial para se obter um CAA de qualidade (GOODIER, 2003).

### *Cimento Portland*

O cimento Portland é um pó de granulometria muito fina e com propriedades aglomerantes e aglutinantes sob ação da água. O clínquer de cimento Portland, nódulo de 5 a 25 mm de diâmetro, é um material produzido, em forno rotativo, pela calcinação a aproximadamente 1450 °C de uma mistura finamente moída e homogeneizada de calcário e argila, numa relação de cerca de 80% e 20%, respectivamente, para formar silicatos de cálcio, como também aluminatos e ferroaluminato tetracálcico (CASCUDO e CARASEK, 2014).

O clínquer Portland é o principal insumo do cimento, sendo composto prioritariamente por aluminatos e silicatos de cálcio. Desta forma, o cálcio, o alumínio, o silício e o ferro são os principais elementos envolvidos nas reações de formação do clínquer que inclui também outros elementos minoritários. Os principais compostos ou fases são apresentados no Quadro 2-1, conforme Taylor (1997):

*Quadro 2.1 - Composição do clínquer*

| <b>Composição mineralógica média típica de um clínquer de cimento Portland</b> |                   |                                                                 |                                                          |
|--------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Constituinte                                                                   | Notação           | Fórmula bruta                                                   | Percentual em massa das diferentes fases do clínquer (%) |
| Silicato tricálcico                                                            | C <sub>3</sub> S  | Ca <sub>3</sub> SiO <sub>5</sub>                                | 60-65                                                    |
| Silicato bicálcico                                                             | C <sub>2</sub> S  | Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>                                | 10-20                                                    |
| Aluminato tricálcico                                                           | C <sub>3</sub> A  | Ca <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>6</sub>                  | 8-12                                                     |
| Ferroaluminato tetracálcico                                                    | C <sub>4</sub> AF | Ca <sub>4</sub> Al <sub>2</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>10</sub> | 8-10                                                     |

Fonte: Taylor (1997)

Até a década de 1970 havia no Brasil, praticamente, um único tipo de cimento Portland. Com a evolução dos conhecimentos técnicos, novos tipos foram fabricados. Existem no Brasil cerca de cinco tipos básicos de cimento e três especiais. Embora todos sejam indicados para uso geral na construção civil, há diferenças entre eles. Conhecer bem as características e propriedades, ligadas a cada tipo, ajuda a aproveitá-las da melhor forma possível na aplicação que se tem em vista (ABCP, 2018).

O cimento CPV ARI RS é o mais adequado para aplicações onde o requisito de elevada resistência às primeiras idades é fundamental. Ele é também especialmente indicado para aplicações onde a propriedade de resistência a sulfatos é importante, como obras em contato com ambientes agressivos por sulfatos, tubos e canaletas para condução de líquidos agressivos, como esgotos ou efluentes industriais.

De acordo com a NBR 16697 (2018), a alta resistência inicial é conseguida pela utilização de uma dosagem diferente de calcário e argila na produção do cimento, e pela moagem mais fina do clínquer. O cimento Portland CPV-ARI apresenta a composição detalhada no Quadro 2-2. A NBR 16697 (2018) especifica ainda os valores de resistência à compressão do cimento CPV-ARI ao longo do tempo: na idade de 1 dia, sua resistência deve igual ou maior que 14 MPa; aos 3 dias, igual ou maior que 24 MPa e aos 7 dias, maior ou igual a 34 MPa, quando ensaiado de acordo com a ABNT NBR 7215 (2011).

*Quadro 2.2 - Limites de composição do cimento Portland tipo CP-V*

| <b>Limites de composição do cimento Portland (porcentagem de massa)</b> |       |                       |          |                                   |                                     |                          |                          |
|-------------------------------------------------------------------------|-------|-----------------------|----------|-----------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Designação normalizada                                                  | Sigla | Classe de resistência | Sufixo   | Clínquer + sulfatos de cálcio (%) | Escória granulada de alto-forno (%) | Material pozzolânico (%) | Material carbonático (%) |
| Cimento Portland de alta resistência inicial                            | CP V  | ARI                   | RS ou BC | 90-100                            | 0                                   | 0                        | 0-10                     |

Fonte: ABNT NBR 16697 (2018)

Ainda segundo a NBR 16697 (2018), este cimento é recomendado para preparo de concreto e argamassa para produção de artefatos como blocos para alvenaria, blocos para pavimentação, tubos, lajes, meio-fio, mourões, postes, elementos arquitetônicos pré-moldados e pré-fabricados. Além disso, pode também ser utilizado no preparo de concreto e argamassa em obras de pequeno e grande porte, e em todas as aplicações que necessitem de resistência inicial elevada e desforma rápida.

Em princípio, todos os tipos de cimento Portland empregados na produção do concreto convencional podem ser empregados na produção do CAA. Variações no tipo de cimento, e mesmo de seus fabricantes, afetam diretamente as propriedades do CAA no estado fresco, uma vez que a viscosidade e a tensão de escoamento dependem fortemente das características reológicas da pasta que compõe o concreto (REPETTE, 2011).

### *Agregados*

Farias e Palmeira (2007) definem agregados como fragmentos de rochas, popularmente denominados “pedras” e “areias”. Fragmentos de rochas com tamanhos e propriedades adequadas são utilizados em quase todas as obras de infraestrutura civil, como em edificações, pavimentação e barragens. Esses materiais incluem, por exemplo, blocos, pedras, pedregulhos, cascalhos, seixos, britas, pedriscos, areias etc. A faixa de tamanho desses fragmentos é bastante ampla, desde blocos com dezenas de centímetros, como os “enrocamentos” usados em barragens, até partículas milimétricas, como os “agregados” usados na produção de concreto para a maioria das edificações.

As características de forma, textura e composição granulométrica dos agregados influenciam no tipo de pasta que será utilizado e, por sua vez, no comportamento do concreto no estado fresco. A composição granulométrica do agregado irá determinar o empacotamento obtido, que é um dos parâmetros utilizados na determinação da fração do material na etapa de proporcionamento em concretos do tipo autoadensável (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2015).

Agregados com forma arredondada e textura lisa são preferíveis para obtenção de misturas mais fluidas, pois permitem um melhor empacotamento e apresentam menor área superficial, reduzindo o consumo de pasta e água (NEVILLE, 2015). Além disso, são aspectos relevantes no processo de dosagem, tanto o volume total de agregados quanto a proporção entre os agregados miúdos e graúdos (MELO, 2005). A utilização de uma curva granulométrica contínua, na qual os grãos menores preenchem os espaços deixados por grãos maiores, tende a resultar em misturas mais estáveis e com menor risco de segregação (REPETTE, 2011; MEHTA e MONTEIRO, 2014 e NEVILLE, 2015).

Com relação aos agregados graúdos, o tamanho e a forma influenciam diretamente a fluidez e a habilidade passante do CAA. Quanto mais esféricas as partículas dos agregados, menor a chance de haver “bloqueios” e maior a fluidez da mistura, uma vez que há uma redução no atrito interno. Outra medida para se evitar os “bloqueios” é a limitação da dimensão máxima do agregado, geralmente de 12 a 20 mm (SCC EUROPEAN PROJECT GROUP, 2005).

Marangon (2006) ressalta que CAA pode ser produzido com agregados graúdos com dimensões de até 20 mm, porém, quanto maior for a dimensão do agregado, maior deverá ser a viscosidade da pasta para evitar a segregação. Além disso, quanto maior for a dimensão do agregado, maior será a ocorrência de bloqueamento em passagens estreitas. Ainda segundo o autor, agregados com diâmetro máximo de até 10 mm são os mais utilizados na produção do CAA, por resultar em uma composição mais econômica, e um melhor desempenho das propriedades reológicas.

#### *Aditivos químicos*

O uso de aditivos em concretos se tornou parte essencial de sua produção, sendo adicionados durante o processo de preparação do material, a fim de melhorar as características e propriedades tanto no estado fresco quanto no estado endurecido.

Segundo Bauer (2013), pode-se definir aditivo químico como produto não indispensável à composição e finalidade do concreto, que colocado na betoneira imediatamente antes ou durante a mistura do concreto, em quantidades pequenas e geralmente bem homogeneizado, faz aparecer ou reforça certas características.

A ASTM C125-15a (2015) define aditivo como qualquer material, que não seja água, agregados, cimentos hidráulicos ou fibras, usado como ingrediente do concreto ou argamassa e adicionado à massa imediatamente antes ou durante a mistura.

No Brasil, a NBR 11768 é a norma específica de aditivos químicos destinados a concreto armado ou não, concreto protendido, além de concretos extrusados e vibroprensados. Essa norma se divide em três partes: NBR 11768-1, que especifica os requisitos para os aditivos químicos destinados a concretos de cimento Portland, NBR 11768-2, que estabelece procedimentos de ensaios para avaliação comparativa do desempenho dos aditivos e a NBR 11768 -3 que especifica os métodos de ensaios de referência para determinação de pH, teor de sólidos, massa específica, teor de cloretos e análise por infravermelho.

Os aditivos possuem diversas finalidades tais como: aumentar a plasticidade do concreto sem aumentar o consumo de água, retardar ou acelerar o tempo de pega, reduzir a exsudação e segregação, acelerar as taxas de desenvolvimento da resistência nas primeiras idades, reduzir a taxa de evolução do aquecimento e aumentar a durabilidade do concreto em condições específicas de exposição. Resumindo, os aditivos geralmente são adicionados às pastas, argamassas e concretos com o objetivo de incorporar ou potencializar a essas propriedades mecânicas ou reológicas necessárias, de acordo com a necessidade e finalidade do uso do produto no concreto.

No que se refere ao concreto autoadensável, a utilização dos aditivos é indispensável para garantir as propriedades do mesmo no estado fresco, melhorando seu desempenho. Segundo Tutikian e Dal Molin (2015), os principais tipos de aditivos usados no CAA são: redutores de água

(plastificantes e superplastificantes) e os modificadores de viscosidade. Os aditivos superplastificantes permitem que se alcance alta fluidez nas misturas, enquanto os aditivos modificadores de viscosidade oferecem um aumento da coesão, prevenindo exsudação e segregação do concreto.

Segundo Mehta e Monteiro (2014), os superplastificantes foram desenvolvidos na década de 1970 e têm ampla aceitação na indústria da construção de concreto. São também chamados de aditivos redutores de água de alta eficiência, porque são capazes de reduzir de três a quatro vezes a água de amassamento em uma determinada mistura de concreto comparado aos aditivos redutores de água normais. Ainda segundo os autores, consistem em surfactantes aniônicos de cadeia longa, de alta massa molecular e com um grande número de grupos polares na cadeia de hidrocarbonetos. Quando adsorvido nas partículas de cimento, o surfactante confere forte carga negativa, que ajuda a diminuir consideravelmente a tensão superficial da água circundante e eleva acentuadamente a fluidez do sistema.

Um aspecto relevante é a compatibilidade entre o aditivo químico e o cimento. Essa compatibilidade está relacionada ao ponto de saturação, que representa a dosagem de aditivo a partir do qual o aumento no teor não proporciona mais ganhos consideráveis de fluidez. Isso ocorre devido à saturação das moléculas de aditivo sobre a superfície das partículas de cimento e depende da afinidade do polímero com o cimento (AITCIN e FLATT, 2016).

Além de aumentar o custo do material, o uso de teores excessivos de aditivos pode agravar problemas de incompatibilidade entre os materiais, como alterações no tempo de pega e incorporação de teores excessivos de ar (MONTE, 2008).

### *2.1.2 Dosagem de concreto autoadensável*

Segundo Tutikian e Helene (2011), entende-se por estudo de dosagem dos concretos de cimento Portland os procedimentos necessários à obtenção da melhor proporção entre os materiais constitutivos do concreto, também

conhecido por traço. Essa proporção ideal pode ser expressa em massa ou em volume, sendo preferível e sempre mais rigorosa a proporção expressa em massa seca de materiais. Um estudo de dosagem deve ser realizado visando obter a mistura ideal e mais econômica, numa determinada região e com os materiais ali disponíveis, para atender uma série de requisitos.

De acordo com Gomes e Barros (2009) são encontradas na literatura diferentes metodologias de dosagem do concreto autoadensável. A primeira teoria foi desenvolvida no Japão, quando da publicação do primeiro protótipo de concreto autoadensável e, desde então, diferentes métodos de dosagem para este concreto surgiram em todo o mundo. Assim, dentre os diferentes métodos de dosagem existentes, destacam-se os métodos de Okamura *et al.*, IPT/ EPUSP, Tutikian e Dal Molin, Gomes, Gettu e Agulló e Repette-Melo.

O Método proposto por Okamura (1995) foi o primeiro método para a dosagem de misturas de concreto autoadensável. O método experimental considera que o concreto consiste em duas fases: argamassa e agregado graúdo. Desta forma, os componentes da pasta, relação água/materiais finos e aditivo superplastificante são decisivos para a obtenção da autoadensabilidade do concreto, além da sua resistência mecânica (GOMES, 2002).

A dosagem de concretos de cimento Portland preconizado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT se baseia na determinação de um traço inicial, obtido de informações provenientes de experiências anteriores, a partir do qual se faz um ajuste experimental das propriedades de interesse, em função dos materiais disponíveis para a sua produção (HELENE e TERZIAN, 1992). Segundo Campiteli (2004), o método é simples e eficiente; por isso é bastante conhecido no Brasil. A etapa de ajuste do traço inicial em laboratório é particularmente simples, porém, pode comportar variações de procedimentos, de acordo com a experiência dos laboratoristas

Tutikian e Dal Molin (2008), utilizando os conceitos de empacotamento granular máximo dos agregados, estudaram o teor ideal de argamassa do concreto, o

ajuste dos teores de aditivos químicos, das adições minerais e da relação água/cimento, o diagrama de dosagem do método IPT/EPUSP e incluíram o diagrama de desempenho. O princípio básico do método é a obtenção de um CAA a partir de um concreto convencional cujo teor ideal de argamassa deverá ser previamente determinado.

Segundo Gomes, Gettu e Agulló (2003) a dosagem de um concreto autoadensável começa pela otimização da pasta e do esqueleto granular separadamente. A metodologia consiste de três fases: obtenção da composição da pasta, determinação da proporção da mistura dos agregados e seleção do teor de pasta. Uma das principais vantagens desse método é a habilidade de separar as fases, permitindo o emprego de diferentes parâmetros de mistura ou variáveis.

O método de Repette-Melo baseia-se na racionalização da dosagem do concreto autoadensável a partir do estabelecimento da proporção água/aglomerante segundo exigências de durabilidade ou de resistência à compressão requeridas, a exemplo do que ocorre com o concreto convencional. O método se distingue da maioria dos métodos correntes por não exigir, em nenhuma de suas etapas, o julgamento subjetivo da qualidade da mistura por parte do usuário. Todos os componentes do concreto são ajustados com base em ensaios rápidos e de custo acessível, e em resultados quantitativos e objetivos, eliminando do processo as decisões que dependem da experiência de quem utiliza o método. De maneira geral, o método consiste no estudo reológico da pasta de cimento, da argamassa e do concreto autoadensável.

Neste contexto, julga-se importante o conhecimento da concepção de um concreto autoadensável, de suas características no estado fresco visto serem estas fundamentalmente influenciadas pelo método de dosagem utilizado.

### 2.1.3 Vantagens

Segundo Tutikian e Dal Molin (2008), o CAA é descrito como uma das grandes revoluções ocorridas na tecnologia do concreto para a construção, nas últimas décadas. Por meio de sua utilização é possível obter vários ganhos diretos e indiretos tais como:

- Aceleração da construção, já que seu lançamento é rápido e dispensa o adensamento;
- Redução da mão de obra no canteiro, porque elimina o processo de adensamento e facilita o espalhamento e nivelamento do concreto;
- Melhoria do acabamento da superfície;
- Pode aumentar a durabilidade, pois o fato do concreto ser autoadensável evita possíveis falhas de concretagem e grandes vazios resultantes da má vibração;
- Permite grande liberdade de fôrmas e dimensões;
- Preenche fôrmas curvas, esbeltas, com altas taxas de armadura e de difícil acesso;
- Permite concretagem em peças de seções reduzidas;
- Elimina o barulho de vibração, muito importante em grandes centros urbanos, em concretagens noturnas ou em obras perto de hospitais e escolas;
- Permite obter um ganho ecológico, quando se utiliza em sua composição altos teores de resíduos industriais, como cinza volante, escória de alto forno ou cinza de casca de arroz;
- Pode reduzir o custo final do concreto ou da estrutura, ou ambos, caso sejam computados economicamente todos os ganhos citados acima.

## 2.2 Nanotubos de carbono

O carbono é um dos elementos químicos mais abundantes na natureza e pode ser encontrado em diversas formas alotrópicas estáveis, que variam do

diamante, do carbono amorfo, do grafite, dos nanotubos de carbono, do fulereno e do grafeno (MATOS, 2011). A Figura 2-1 ilustra essas formas.

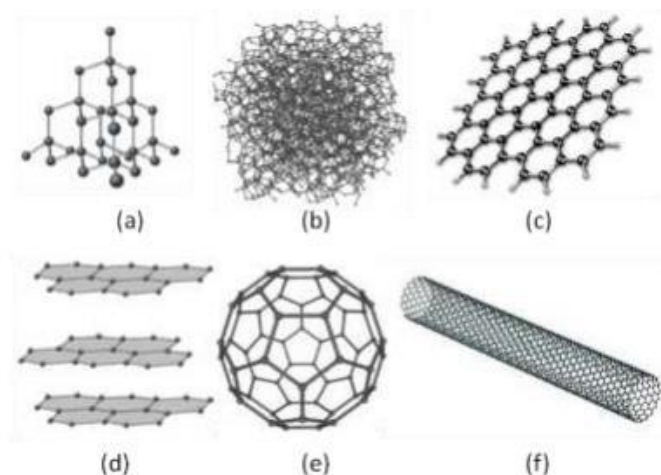


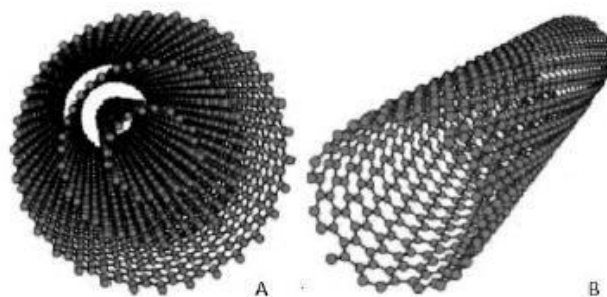
Figura 2.1 - Representação esquemática de estruturas de diferentes formas de carbono elementar: (a) diamante; (b) carbono desordenado (amorfo); (c) grafeno; (d) grafite; (e) fulereno C60; (f) nanotubo de carbono de parede simples.

Fonte: Dresselhaus et. al. (2004)

Em 1991, os nanotubos de carbono foram descobertos pelo pesquisador japonês Sumio Iijima, que descreveu pela primeira vez a existência de moléculas de carbono com propriedades especiais. O trabalho foi publicado no mesmo ano pela revista *Nature*, sob o título “*Helical microtubules of graphite carbon*” e gerou grande repercussão mundial. Em seus estudos, foi observado que a estrutura dos nanotubos de carbono baseia-se na do grafeno que, segundo Bhushan (2007), é uma camada monoatômica e poliaromática de átomos de carbono na forma híbrida  $sp^2$ , arranjados em hexágonos. Enrolada na forma de um cilindro, a folha de grafeno passa a ter a configuração de um nanotubo de carbono.

Os nanotubos de carbono são formados apenas por átomos de carbono num arranjo hexagonal. Possuem diâmetros nanométricos e comprimento de microns. Vale frisar que um nanômetro corresponde a um bilionésimo do metro (COUTO, 2006). Podem se apresentar em duas configurações típicas, os nanotubos de paredes simples (NTCPS), que possuem a configuração de uma folha de grafeno enrolada, e os nanotubos de paredes múltiplas (NTCPM), que

se constituem de várias folhas de grafeno envolvendo umas às outras, de forma concêntrica. A Figura 2-2 ilustra os tipos de nanotubos de carbono.



*Figura 2.2 - Representação esquemática de: (A) nanotubo de paredes múltiplas; (B) nanotubo de parede simples.*

Fonte: CAPAZ e CHANCHAM (2003)

De acordo com Siddique e Metha (2013), o diâmetro mínimo teórico de um NTCPS é de 0,4 nm e o diâmetro médio tende para 1,2 nm. O número de paredes pode ser de até 40-50. De acordo com a quiralidade do NTC (a direção na qual se enrola) pode ser classificado como *armchair*, *zig-zag* ou *quiral*. Essas diferenças estruturais podem resultar em um comportamento mecânico, elétrico ou térmico diferente.

Apesar das dimensões diminutas, os NTC possuem excelente resistência mecânica. Conforme Siddique e Metha (2013), isto se deve às ligações do tipo  $sp^2$  entre os átomos de carbono. As propriedades mecânicas dos nanotubos são singulares, com alto módulo de elasticidade e resistências que superam as dos aços de alta resistência. A Tabela 2-1 apresenta uma análise comparativa entre os valores das propriedades mecânicas dos nanotubos de carbono em relação ao aço.

Tabela 2.1 - Comparação de propriedades mecânicas dos NTC

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

Fonte: adaptada de Shah et al. (2009)

Iijima et al. (1996) examinaram a resposta dos nanotubos sob compressão, utilizando simulações de dinâmica molecular. Os autores simularam as propriedades de deformação de nanotubos individuais e paredes múltiplas dobrados em grandes ângulos. Os resultados experimentais e teóricos mostram que os nanotubos são extremamente flexíveis.

### 2.2.1 Método de síntese por Deposição Química da Fase Vapor (CVD)

Segundo Fernandes (2008), as técnicas utilizadas nos primeiros processos para produção de nanotubos de carbono foram ablação por laser e descarga de arco. Ambas as técnicas são capazes de produzir tanto nanotubos de paredes simples como de paredes múltiplas e continuam sendo utilizadas até hoje. A ablação por laser não é capaz de produzir nanotubos em grande escala. O método da descarga por arco produz nanotubos em larga escala, porém simultaneamente também é produzida uma grande quantidade de carbono e carbono amorfo que exigem uma fase de purificação para a obtenção de nanotubos.

O método de deposição química da fase vapor (Chemical Vapor Deposition - CVD) vem sendo amplamente utilizado na síntese de nanotubos de carbono, pois permite produção e controle das características dos nanotubos a temperaturas menores comparativamente a outros processos. Conforme expõem Siddique e Metha (2013), o método de CVD é o que tem mostrado, em termos econômicos, maior viabilidade.

No processo de deposição química da fase vapor, a fonte precursora de carbono é gasosa, constituída basicamente de hidrocarbonetos leves (metano, acetileno, etileno, etanol, monóxido de carbono etc.) que em altas temperaturas (acima de 600 °C e abaixo de 1000 °C) e em ambiente com atmosfera controlada e redutora sofre uma reação de termo-decomposição. Esta reação de termo-decomposição ou pirolíse é catalisada pela presença de nanopartículas de metais de transição tais como Fe, Ni ou Co, gerando localmente carbono livre e espécies  $C_x - H_y$  responsáveis pelo crescimento dos nanotubos de carbono, que se dá sobre a superfície do catalisador. Suas características e propriedades serão diretamente dependentes do tamanho, forma, dispersão, estruturas e propriedades superficiais do catalisador empregado no processo. O tamanho da partícula do catalisador é o fator chave para o diâmetro do tubo que será formado, ou seja, o diâmetro do tubo obtido terá, aproximadamente, o mesmo diâmetro da partícula catalisadora (MOSHKALYOV *et al.*, 2004).

*Síntese de NTC diretamente sobre o clínquer de cimento Portland, tendo como princípio o método de CVD*

Conforme Souza (2015), apesar de muitas pesquisas estarem relacionadas à produção de NTC de alta pureza, a aplicação destes nanomateriais em matrizes cimentícias (pastas, argamassas e concretos) levou alguns pesquisadores ao desenvolvimento de um método de síntese de NTC diretamente sobre o clínquer de cimento Portland, tendo como princípio o método de CVD.

Pioneiros neste método, Ladeira *et al.* (2009) obtiveram patente onde descreve-se o método para síntese de NTC em clínquer de cimento Portland e outros materiais cimentícios. A descrição da patente relata:

“...descreve-se um método de síntese de nanotubos de carbono por deposição química da fase vapor. Neste método o clínquer de cimento é usado como matriz cerâmica para catalisar o processo ou para ancorar as

nanopartículas dos metais de transição. O uso do clínquer de cimento como um substrato para ancorar as nanopartículas do metal de transição permite a geração de nanotubos de carbono nas partículas e grãos do clínquer de cimento, e também permite a produção de um tipo de cimento nanoestruturado com nanotubos de carbono onde a síntese e integração dos nanotubos de carbono no clínquer são realizadas em uma única etapa contínua em grande escala. A invenção também propõe, como parte do processo de síntese de nanotubos de carbono em clínquer de cimento, várias opções para enriquecer o último com metais de transição, a fim de integrar opcionalmente a produção do referido composto nanoestruturado na indústria convencional do cimento...”

### **2.3 Utilização e comportamento de concretos com nanotubos de carbono**

De acordo com Gleize (2007) tornou-se cada vez mais necessária a redução da quantidade de clínquer usado nos produtos de cimento para contribuir com a redução das emissões de CO<sub>2</sub> e diminuir o consumo de materiais fósseis e de energia. Isso se torna possível por meio da substituição do cimento por subprodutos industriais que têm papel ativo em materiais cimentícios, como por exemplo: cinzas volantes, escórias de alto forno e sílica ativa. Para auxiliar o progresso nessa área é necessária a busca por maneiras de aumentar a velocidade de desenvolvimento das características mecânicas das misturas que contêm esses materiais, sem afetar a durabilidade em longo prazo. O domínio dos processos em termos de nanoestrutura dos hidratos e a localização desses hidratos na matriz compósita tem papel importante para tal progresso. Concretos, argamassas e derivados possuem as nanoestruturas complexas do cimento e seus hidratos, sendo, então, excelentes candidatos para a manipulação e o controle de suas propriedades através da nanotecnologia.

Morsy *et al.* (2011) reforçam esta ideia quando consideram a redução da quantidade de cimento necessária para um concreto em uma ordem de resistência e a redução do custo e impacto ambiental dos materiais utilizados como uma das principais vantagens da utilização de nanomateriais. Outras vantagens apontadas por esses autores são a produção de um concreto de alta resistência para uma aplicação específica e a redução do tempo de construção com os nanomateriais, devido à alta resistência do concreto com um tempo de cura reduzido.

A incorporação de nanotubos de carbono em matrizes cimentícias vem sendo objeto de diversas pesquisas em várias instituições do mundo. Estes nanomateriais atuam na microestrutura da matriz, conferindo aumento das propriedades mecânicas e melhora nas propriedades relacionadas à durabilidade (SOUZA, 2015).

De acordo com Yi *et al.* (2005), a adição de materiais nanométricos na estrutura do silicato de cálcio hidratado (C-S-H) faz com que o material se torne mais dúctil e resistente. Como consequência, fissuras poderão ser evitadas no cimento endurecido. Santra *et al.* (2012) citam que os nanomateriais podem preencher os espaços entre os géis do C-S-H e agir como “nanofiller”, reduzindo, então, a porosidade da matriz cimentícia.

As propriedades do concreto em seu estado inicial, como fluidez e trabalhabilidade, são regidas pela distribuição e tamanho das partículas, enquanto as propriedades do concreto no estado endurecido, como resistência e durabilidade, são afetadas tanto pela granulação das partículas como também pelo seu arranjo ou agrupamento no agregado (MORAIS, 2012).

As investigações sobre a utilização de NTC em concreto são recentes. Algumas pesquisas já realizadas comprovaram o bom desempenho dos nanotubos quando adicionadas a argamassas de cimento e a concretos. Segundo Moraes (2012), devido ao seu tamanho diminuto, tais partículas contribuem para o preenchimento de vazios e, conseqüentemente, para a melhoria de diversas propriedades desses materiais.

### 2.3.1 Trabalhabilidade do concreto com nanotubos de carbono (NTC)

É possível que a trabalhabilidade seja comprometida pela diminuição do particulado presente num composto de matriz cimentícia como o concreto. Segundo Roco *et al.* (1999), podem ocorrer mudanças significativas nas propriedades de um material quando suas dimensões são alteradas, por exemplo, passando de tamanho macro para tamanho nano. Tais mudanças podem afetar as reações químicas e até mesmo as propriedades mecânicas.

Sanchez e Sobolev *et al.* (2010) 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.

Marcondes (2012) adicionou fisicamente a proporção de 0,3% de NTCPM em relação à massa de cimento, dispersos em um surfactante iônico que confere dispersão e estabilidade em meio aquoso. Foram produzidos quatro traços, um de referência (sem NTC) e os outros três contendo NTC, mantendo a proporção de 0,3% de NTCPM e variando o modo de dispersão. O traço referência, em peso do concreto, foi de 1: 2,25: 2,75 (cimento: areia natural: brita 1) com fator água/cimento de 0,55. O consumo de cimento por metro cúbico foi de 352 kg e o teor de aditivo foi de 1 % em relação à massa de cimento. O aditivo utilizado é constituído por polímeros de éteres carboxílicos modificados. Segundo o autor, a trabalhabilidade nos traços com NTC, analisada por meio do ensaio de abatimento por tronco de cone, foi reduzida, o que influenciou no comportamento reológico do concreto. Este autor concluiu desta forma, que os NTC devem ser utilizados na presença de aditivos plastificantes ou superplastificantes para evitar o acréscimo de água ao concreto.

Rhee e Roh (2013), analisaram a resistência e o desempenho de concretos e argamassas utilizando a mistura física de nanotubos de carbono de paredes múltiplas. Foi feito um estudo considerando diferentes porcentagens em massa

de NTC adicionados (0-1,5%). A composição dos concretos, em peso, foi 1: 2,5: 2,62 (cimento: agregado miúdo: agregado graúdo), o teor de cimento de 350 kg/m<sup>3</sup> e relação de água/cimento igual 0,49. Aditivos redutor de água e incorporador de ar, com teores de 0,126 % e 0,04 % respectivamente em relação a massa de cimento, foram também utilizados. Para a adição dos NTC foram utilizados dois procedimentos: (a) mistura física dos NTC sem dispersão prévia (caso I); (b) adição de NTC previamente dispersos numa solução de água com plastificante a base de naftaleno sulfonado seguida de sonicação (caso II). Segundo os autores, a trabalhabilidade do concreto e argamassa foi reduzida na medida que os teores de NTC adicionados foram aumentando. Em ambos os casos houve redução de trabalhabilidade do concreto com o aumento do teor de NTC. Essa redução foi ainda maior no caso I, onde os NTC não haviam sido previamente dispersos na solução de água com plastificante a base de naftaleno sulfonado.

Carriço *et al.* (2018) realizaram um estudo utilizando NTCPM de três tipologias diferentes: NTCPM de alta pureza, NTCPM carboxi-funcionalizados e NTCPM de alta pureza em suspensão aquosa. Os nanotubos foram adicionados fisicamente em quantidades de 0,05 % a 0,1 % em relação à massa de cimento. As relações água/cimento foram de 0,55, 0,45 e 0,35. Foi utilizado ainda um aditivo superplastificante à base de policarboxilato. O teor de cimento por metro cúbico de concreto sofreu variação entre 380 e 450 kg. Os resultados desse estudo mostraram que a adição de baixos teores de NTC (até 0,1 %) não promoveu alterações significativas na trabalhabilidade de concretos.

Hawreen e Bogas (2019) investigaram a influência da incorporação por meio de mistura física de diferentes tipos de nanotubos de carbono na fluência e na retração do concreto, além das propriedades do material nos estados fresco e endurecido. Os concretos foram produzidos com 0,05-0,5% de NTC não funcionalizado e NTC funcionalizados, em proporções distintas, além de variar as proporções de água e cimento de 0,35 a 0,55. Os autores concluíram que a trabalhabilidade e o teor de ar do concreto foram pouco afetados na medida que eram adicionadas pequenas quantidades de NTC, próximas ao limite inferior estudado, independentemente do tipo de relação a/c e do tipo de NTC

adicionados. O gráfico da Figura 2.3 apresenta os resultados de *slump test* para os diferentes teores de NTC adicionados e, para o estudo em questão, o aumento da quantidade de NTC comprometeu a trabalhabilidade do material.

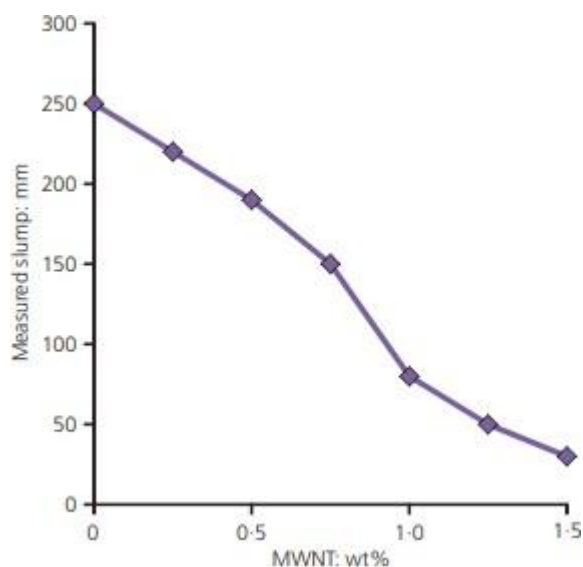


Figura 2.3 – Valores de *slump test* (mm) para diferentes teores de NTC.

Fonte: Hawreen e Bogas (2019)

Borges (2019), em sua pesquisa, analisou dois tipos de concretos: autoadensável e convencional. Para cada tipo foram produzidos três traços com diferentes composições, sendo: um traço de referência sem clínquer nanoestruturado (sem NTC), um traço utilizando o clínquer nanoestruturado, contendo 0,15 % de NTC em relação à massa do cimento Portland e um traço utilizando o clínquer nanoestruturado contendo 0,30 % de NTC. Os resultados com relação à trabalhabilidade revelaram, para os teores de NTC adicionados, nenhuma mudança de comportamento, tanto no concreto convencional, quanto no autoadensável.

### 2.3.2 Propriedades mecânicas de concretos com nanotubos de carbono (NTC)

Segundo Mehta e Monteiro (2014) as resistências mecânicas são definidas como a capacidade dos materiais resistirem a tensões sem, entretanto, entrarem em colapso. No concreto, a resistência está relacionada à tensão necessária para causar a ruptura do material, sendo essa definida como a tensão máxima que o material resiste ao receber uma determinada carga.

O estudo de Marcondes (2012), já descrito anteriormente, incluiu também avaliação das propriedades mecânicas dos concretos produzidos com NTC. Os resultados mostraram ganhos relevantes na resistência à compressão (até 36 %) e na resistência 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.

Kowald (2005) utilizou 0,5% de NTC em um concreto de alta resistência (com uma relação água/cimento de 0,22 e observou um aumento de 12% na resistência à compressão. Contudo, ele observou que a resistência à compressão diminuía à medida que a quantidade de NTC aumentava. Isso sugere que pode haver uma quantidade ideal de NTC para que o concreto alcance seu melhor desempenho.

Como dito anteriormente, Rhee e Roh (2013) avaliaram dois cenários de incorporação de NTC em seus estudos: (a) mistura física dos NTC sem dispersão prévia (caso I); (b) adição de NTC previamente dispersos numa solução de água com plastificante a base de naftaleno sulfonado seguida de sonicação (caso II). Os autores observaram aumentos significativos na resistência à compressão para todos os teores utilizados de NTC desde que esses estivessem previamente dispersos na solução de água com plastificante a base de naftaleno sulfonado. Para o cenário que não fez uso da dispersão prévia de NTC, houve uma tendência de diminuição dos ganhos de resistência à compressão para teores de NTC acima de 1 %. Essa diminuição pode ser atribuída à interferência na ligação da interface entre agregados e argamassa para a maior concentração de NTCPM. Os valores do módulo de elasticidade e da resistência à tração por compressão diametral não foram afetados pela presença dos NTC.

Carriço *et al.* (2018) avaliaram também propriedades mecânicas de concretos produzidos com NTCPM de 3 tipologias diferentes conforme descrito no item 2.3.1. A análise dos resultados revelou que a adição de NTC promoveu aumento na resistência à compressão, independentemente da relação água/cimento e do tipo de NTC. Segundo os autores, esse aumento pode ser

atribuído a efeitos de preenchimento, de nucleação e de ponte fornecidos pelos NTC.

Como dito anteriormente, Hawreen e Bogas (2019) investigaram a influenciada incorporação de diferentes tipos de nanotubos de carbono em concretos, por meio de mistura física. Os autores observaram que a incorporação de NTC foi capaz de melhorar a resistência à compressão do concreto em até 21%. Devido as diferenças das características do material e técnicas de dispersão utilizadas, os concretos contendo NTC apresentaram desempenhos distintos. O melhor desempenho mecânico foi encontrado no concreto que continha 0,1% de NTC, o menor valor estudado. Em geral, a presença dos NTC foi mais eficaz em idades precoces e, aumentando a quantidade de NTC, houve uma tendência de redução do desempenho do concreto, no que diz respeito as propriedades mecânicas do material.

Os resultados de resistências mecânicas dos concretos com NTC do estudo de Borges (2019) revelaram um melhor desempenho do concreto autoadensável em relação ao concreto convencional. As melhorias de resistências à tração, tanto nas primeiras idades quanto aos 28 dias, demonstraram ganhos promovidos pela presença dos NTC: no traço com 0,15 %, ganhos de 28 % foram obtidos aos 3 dias. Já que no traço com 0,30 %, ganhos de 36 % e 31 % foram obtidos na resistência à tração nas idades de 3 e 28 dias respectivamente. Esses resultados demonstram que as maiores diferenças em relação ao concreto de referência foram no concreto com maior teor (0,30%) de NTC sintetizados sobre o clínquer. Esse indicativo mostra que é conveniente uma continuidade dos estudos com maiores teores de NTC.

Existem, ainda, muitas variáveis a serem consideradas e estudadas em pesquisas acerca do comportamento concretos contendo nanotubos de carbono (NTC). Diante disso, tendo como base resultados relevantes já alcançados, como os apresentados na pesquisa de Borges (2019), na qual foi utilizado o clínquer nanoestruturado, optou-se, neste trabalho, por aumentar os teores de NTC que serão adicionados ao concreto autoadensável, mantendo os materiais e métodos utilizados pelo autor, com a finalidade de analisar,

comparativamente, como a quantidade de NTC afeta as propriedades do concreto.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

As características e propriedades dos materiais constituintes do concreto autoadensável (CAA) afetam o comportamento do mesmo. Por isso são apresentadas neste capítulo, de forma detalhada, as características dos materiais utilizados na produção dos CAA. A dosagem e a metodologia empregada nos ensaios de avaliação do comportamento dos CAA no estado fresco e endurecido são também descritas.

As moldagens, os ensaios dos CAA no estado fresco e de propriedades mecânicas foram realizados na central de concreto da InterCement®, parceira do CTNano/UFGM, em Praia Grande/SP.

Todos os materiais necessários para a moldagem dos corpos de prova de concreto, assim como as condições para realização dos ensaios, foram fornecidos pela InterCement®, uma vez que um dos objetivos do estudo foi a análise do comportamento de diferentes teores de nanotubos de carbono (NTC) em CAA já fabricados e utilizados na rotina da central. Apenas o clínquer nanoestruturado foi fornecido pelo Centro de Tecnologia em Nanomateriais e Grafeno (CTNano) da UFGM.

#### 3.1 Materiais utilizados na pesquisa

##### 3.1.1 Cimento

O cimento utilizado foi o CPV-ARI, fornecido pela InterCement®. Este é um cimento de alta resistência inicial (ARI) e foi escolhido por se tratar de um cimento que não possui adições, diminuindo assim a possibilidade de interferências nos resultados.

As características físicas e químicas do cimento utilizado na pesquisa estão apresentadas nas Tabelas 3.1 e 3.2 respectivamente e foram disponibilizadas

pela central de concreto da InterCement®. Todos os valores medidos atendem aos limites especificados pela ABNT NBR 16697 (2018).

*Tabela 3.1 – Características físicas do cimento CP-V ARI*

| <b>Características físicas</b>    | <b>Valor medido*</b> | <b>Limite<br/>NBR 16697 (2018)</b> |
|-----------------------------------|----------------------|------------------------------------|
| Resíduo na peneira # 200          | 0,12%                | ≤ 6,0 %                            |
| Resíduo na peneira # 325          | 1,73%                | -                                  |
| Finura Blaine - área específica   | 4690 cm²/g           | ≥ 3000 cm²/g                       |
| Tempo inicial de pega             | 160 min.             | > 60 min.                          |
| Tempo final de pega               | 280 min.             | ≤ 600                              |
| Expansibilidade a quente          | 0,5 mm               | ≤ 5                                |
| Resistência à compressão - 1 dia  | 21,57 Mpa            | ≥ 14                               |
| Resistência à compressão - 3 dias | 36,43 Mpa            | ≥ 24                               |
| Resistência à compressão - 7 dias | 44,92 MPa            | ≥ 34                               |

\* Fonte: InterCement®

*Tabela 3.1 – Características químicas do cimento CP-V ARI*

| <b>Características químicas</b>                     | <b>Valor medido*</b> | <b>Limite<br/>NBR 16697 (2018)</b> |
|-----------------------------------------------------|----------------------|------------------------------------|
| Perda ao fogo (PF)                                  | 3,83%                | ≤ 6,5                              |
| Resíduo insolúvel (RI)                              | 0,49%                | ≤ 3,5                              |
| 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%                | -                                  |

\*- Fonte: InterCement®

\*\* - Quando o teor de C<sub>3</sub>A do clínquer for menor ou igual a 8 % o limite é de ≤ 3,5 % da massa;  
Quando esse teor de C<sub>3</sub>A do clínquer > 8 % o limite é de ≤ 4,5 % da massa.

### 3.1.2 Agregados graúdos e miúdos

Os agregados graúdos e miúdos foram fornecidos pela InterCement®, sendo eles, materiais que fazem parte da utilização rotineira da central de concreto.

#### Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado no estudo foi a brita 0 ( $4,75 \text{ mm} \leq \text{diâmetro} \leq 12,5 \text{ mm}$ ), de origem granítica e proveniente da cidade de Barueri. Esse agregado foi fornecido à InterCement® pela empresa Polimix Concreto Ltda. As características e a distribuição granulométrica do agregado estão contidas nas Tabela 3.3 e Tabela 3.4 respectivamente. Suas características satisfazem os critérios da norma NBR 7211 (2019).

*Tabela 3.3 – Características do agregado graúdo*

| <b>Características do agregado graúdo</b> |                |                         |
|-------------------------------------------|----------------|-------------------------|
| <b>Parâmetro</b>                          | <b>Brita 0</b> | <b>Limite normativo</b> |
| Módulo de finura                          | 5,88           | -                       |
| Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )     | 2,66           | -                       |
| Material pulverulento                     | 0,9 %          | ≤ 1,0 %                 |

Fonte: InterCement®

*Tabela 3.4 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo*

| <b>Distribuição granulométrica do agregado graúdo - Brita 0</b> |                  |                 |                    |
|-----------------------------------------------------------------|------------------|-----------------|--------------------|
| <b>Peneira</b>                                                  | <b>Massa (g)</b> | <b>% Retida</b> | <b>% Acumulada</b> |
| <b>12,5</b>                                                     | 0                | 0               | 0                  |
| <b>9,5</b>                                                      | 745              | 13              | 13                 |
| <b>6,3</b>                                                      | 2283             | 38              | 51                 |
| <b>4,8</b>                                                      | 1918             | 32              | 83                 |
| <b>2,4</b>                                                      | 968              | 16              | 99                 |
| <b>1,2</b>                                                      | 0                | 0               | 99                 |
| <b>0,6</b>                                                      | 0                | 0               | 99                 |
| <b>0,3</b>                                                      | 0                | 0               | 99                 |
| <b>0,15</b>                                                     | 0                | 0               | 99                 |
| <b>Fundo</b>                                                    | 86               | 1               | 100                |
| <b>Total</b>                                                    | 6000             | 100             | -                  |
| Dimensão máxima característica 12,5 mm                          |                  |                 |                    |

Fonte: InterCement®

Para o agregado graúdo, todos os traços utilizaram somente a brita 0. A Figura 3.1 mostra a curva da composição granulométrica da brita 0 utilizada. A composição granulométrica atende aos limites normativos prescritos no item 6.6.1 da ABNT NBR 7211 (2019).

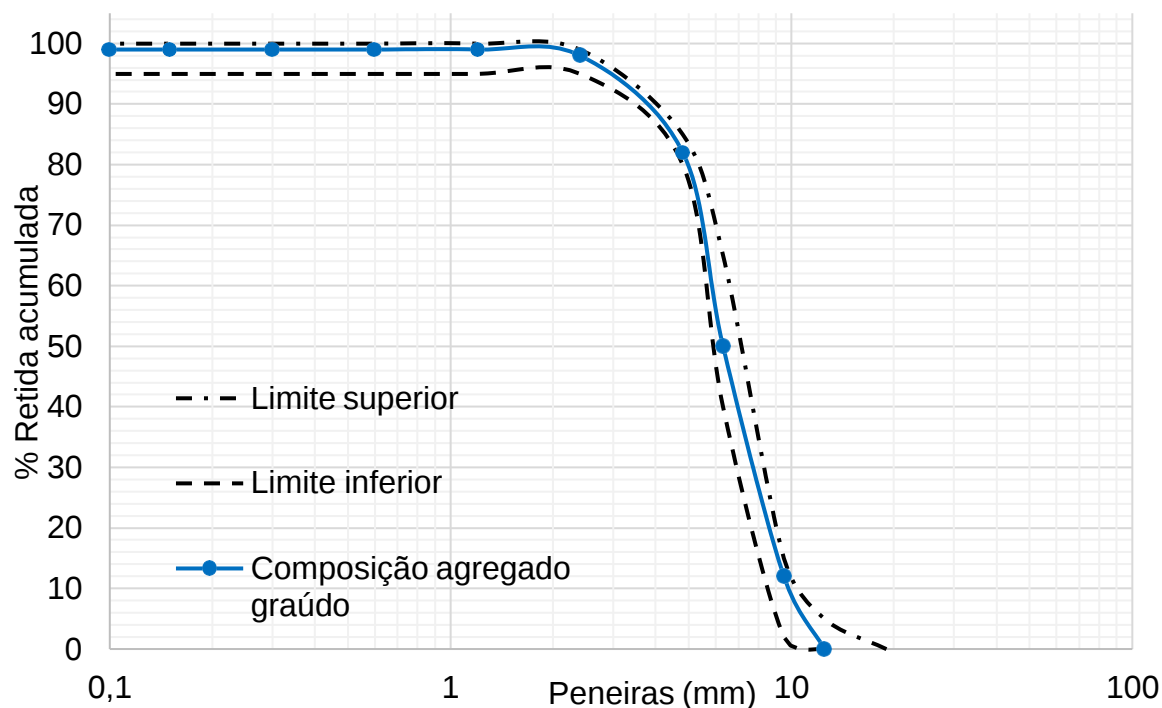


Figura 3.1 – Curvas da composição granulométrica do agregado graúdo.  
Fonte: InterCement®

### *Agregados miúdos*

Dois tipos de agregados miúdos foram utilizados na produção dos CAA: uma areia natural fina e uma areia industrial. Por isso foi necessário a realização de um acerto granulométrico dos dois tipos de areia como será visto a frente.

Os agregados miúdos utilizados no estudo foram a areia natural fina da Minermix Mineração e a areia industrial da Polimix Concreto Ltda., fornecedoras da InterCement®. A areia natural fina é oriunda da cidade de Anhembi/SP. Já a areia industrial oriunda da cidade de Barueri/SP.

As características e a distribuição granulométrica da areia natural estão contidas nas Tabela 3.5 e Tabela 3.6 respectivamente. As características desta areia natural estão de acordo com a norma ABNT NBR 7211 (2019).

*Tabela 3.5 – Características da areia natural*

| Parâmetro                             | Valor medido* | Limite<br>NBR 7211 (2019) |
|---------------------------------------|---------------|---------------------------|
| Módulo de finura                      | 0,95          | -                         |
| Massa específica (g/cm <sup>3</sup> ) | 2,64          | -                         |
| Material pulverulento (%)             | 1,10          | 3-5                       |

Fonte: InterCement®

*Tabela 3.6 – Distribuição granulométrica da areia natural*

| Peneira                               | Massa (g) | % Retida | % Acumulada |
|---------------------------------------|-----------|----------|-------------|
| 4,8                                   | 0         | 0        | 0           |
| 2,4                                   | 1         | 0        | 0           |
| 1,2                                   | 1         | 0        | 0           |
| 0,6                                   | 8         | 1        | 1           |
| 0,3                                   | 101       | 10       | 11          |
| 0,15                                  | 716       | 72       | 83          |
| Fundo                                 | 173       | 17       | 100         |
| Total                                 | 1000      | 100      | -           |
| Dimensão máxima característica 2,4 mm |           |          |             |

Fonte: InterCement®

Já as características e a distribuição granulométrica da areia industrial estão contidas nas Tabela 3.7 e Tabela 3.8 respectivamente.

*Tabela 3.7 – Características da areia industrial*

| Parâmetro                             | Valor medido | Limite<br>NBR 7211 (2019) |
|---------------------------------------|--------------|---------------------------|
| Módulo de finura                      | 2,83         | -                         |
| Massa específica (g/cm <sup>3</sup> ) | 2,66         | -                         |
| Material pulverulento (%)             | 12,0*        | -                         |

Fonte: InterCement®

\* 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.

Tabela 3.8 – Distribuição granulométrica da areia industrial

| Peneira                               | Massa (g) | % Retida | % Acumulada |
|---------------------------------------|-----------|----------|-------------|
| 6,3                                   | 0         | 0        | 0           |
| 4,8                                   | 16        | 2        | 2           |
| 2,4                                   | 194       | 19       | 21          |
| 1,2                                   | 198       | 20       | 41          |
| 0,6                                   | 182       | 18       | 59          |
| 0,3                                   | 164       | 16       | 75          |
| 0,15                                  | 98        | 10       | 85          |
| Fundo                                 | 148       | 15       | 100         |
| Total                                 | 1000      | 100      | -           |
| Dimensão máxima característica 4,8 mm |           |          |             |

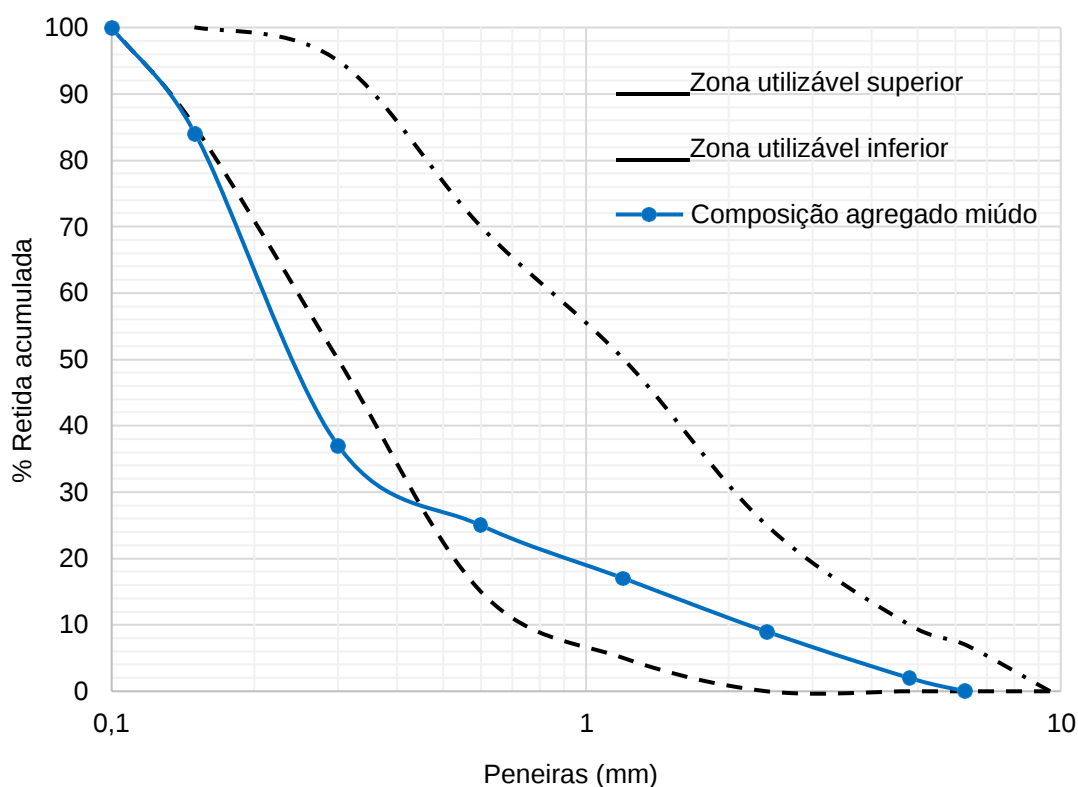
Fonte: InterCement®

Como citado anteriormente, foi necessária a realização de um acerto granulométrico dos dois tipos de agregados miúdos envolvidos (areia natural e areia artificial), havendo a necessidade de se utilizar uma proporção em massa de 60 % de areia natural e de 40 % de areia artificial. A Tabela 3.9 apresenta a composição do agregado miúdo deste traço e o gráfico da Figura 3.2 mostra sua curva granulométrica segundo a ABNT NBR 7211 (2019).

Tabela 3.9 – Composição do agregado miúdo para o concreto autoadensável

| Distribuição granulométrica do agregado miúdo - Areia natural e areia artificial |                      |                    |              |                    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----------------------|--------------------|--------------|--------------------|
| Peneiras                                                                         | % Areia fina natural | % Areia artificial | % Composição | % Retido acumulado |
| 4,8                                                                              | 0                    | 1                  | 1            | 1                  |
| 2,4                                                                              | 0                    | 8                  | 8            | 9                  |
| 1,2                                                                              | 0                    | 8                  | 8            | 17                 |
| 0,6                                                                              | 1                    | 7                  | 8            | 25                 |
| 0,3                                                                              | 6                    | 6                  | 12           | 37                 |
| 0,15                                                                             | 43                   | 4                  | 47           | 84                 |
| Fundo                                                                            | 10                   | 6                  | 16           | 100                |
| Módulo de finura                                                                 | 1,7                  |                    |              |                    |
| Dimensão máxima característica                                                   | 4.8                  |                    |              |                    |

Fonte: InterCement®



*Figura 3.2 – Curvas da composição granulométrica do agregado miúdo.*  
 Fonte: InterCement®

Buscou-se acertar o traço do agregado miúdo utilizado nesse trabalho seguindo as especificações da ABNT NBR 7211, que teve sua versão atualizada e corrigida em 2019. Em razão da finura excessiva da areia natural fina, foram utilizados como parâmetros os limites superiores e inferiores das zonas utilizáveis, como pode ser visto no gráfico da Figura 3.2. Desta forma, calculando-se o módulo de finura deste agregado miúdo, encontra-se o valor de 1,70. Utilizando-se da nota 2 encontrada na Tabela 2 do item 5.5.1 desta norma, que permite variação de módulo de finura nas zonas utilizáveis inferiores entre 1,55 a 2,20, este agregado miúdo é considerado conforme, pois seu módulo de finura se enquadra nessa margem.

Além disso, de acordo com a InterCement®, pode-se dizer que a areia natural fina empregada neste estudo tem sido largamente utilizada na rotina da central concreteira e tem apresentado resultados que atendem às especificações propostas.

### 3.1.3 Aditivos

Dois aditivos diferentes foram utilizados nessa pesquisa, conforme mostra a Tabela 3.10. Os tipos de aditivos utilizados e os teores adotados são comumente utilizados na dosagem de concretos autoadensável na rotina da central concreteira da InterCement®, em Praia Grande/SP. Os aditivos foram utilizados segundo a norma ABNT NBR 11768 (2019) e, de acordo com o fabricante *Grace Construction Products Applied Technologies®*, são compatíveis entre si.

*Tabela 3.10 – Aditivos utilizados na produção dos CAA*

| Aditivos utilizados na pesquisa |                 |                                                                                    |                       |                             |                                                                |
|---------------------------------|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------------|----------------------------------------------------------------|
| Produto                         | Princípio ativo | Descrição do produto                                                               | Aspecto/cor           | Dosagem recomendada (% SPC) | Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )<br>ABNT NBR 11768 (2019) |
| MIRA 481                        | Lignosulfonato  | Efeito dispersante com melhoria nas resistências finais.                           | Líquido marrom escuro | 0,5 a 1,0 %                 | 1.180 - 1.240                                                  |
| ADVA 518                        | Policarboxilato | 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, a linha de aditivos MIRA é composta por aditivos plastificantes polifuncionais redutores de água. Apresentam diversos benefícios ao concreto fresco, como boa redução de água de amassamento para uma mesma consistência, aumento de fluidez com manutenção desta por tempo prolongado, aumento da coesão do concreto além de facilitar o adensamento e o lançamento. Ao concreto endurecido, proporciona altas resistências mecânicas iniciais e finais, melhora a aderência e textura da superfície do concreto, reduz a permeabilidade e aumenta a durabilidade, prolongando a vida útil das estruturas. Seu uso é adequado a concretos dosados em central, concretos normais bombeáveis, convencionais ou

concretos leves, além de ser compatível com todos os demais aditivos GCP destinados ao uso em concreto.

Já a linha de aditivos ADVA® é composta por aditivos superplastificantes à base de policarboxilato. São isentos de cloretos e possuem grande capacidade de redução das quantidades de água das misturas, além de fornecerem excelente manutenção de abatimento e resistência à segregação. É indicado para toda a linha de concretos dosados em central, pré-fabricados e concretos protendidos, principalmente quando se busca concretos com elevada fluidez e autoadensável.

### 3.1.4 Clínquer nanoestruturado

O clínquer de cimento Portland utilizado para síntese de NTC foi fornecido pela InterCement®. O processo de NTC sobre o clínquer é realizado continuamente no Centro de Tecnologia em Nanomateriais e Grafeno (CTNano), da UFMG, e as etapas para sua obtenção segue o fluxograma da Figura 3.3.

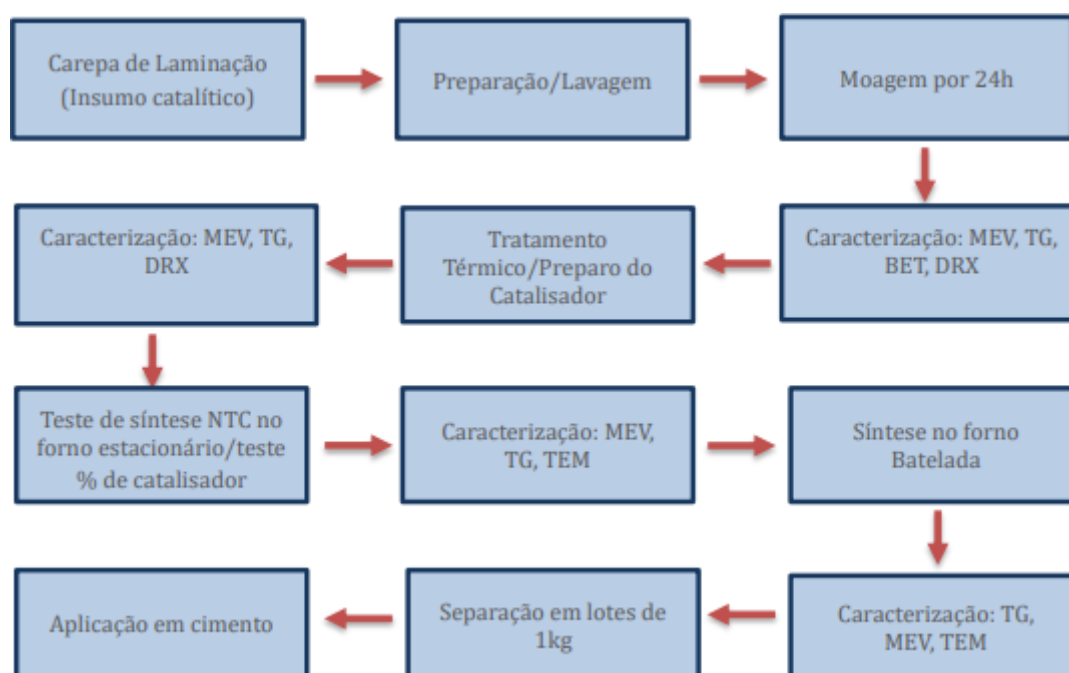


Figura 3.3 – Fluxograma de obtenção do clínquer nanoestruturado.

Fonte: CTNano/UFMG

O Quadro 3.1 apresenta as características do clínquer nanoestruturado utilizado nessa pesquisa. A figura 3.4 mostra o clínquer nanoestruturado empregado no estudo.

*Quadro 3.1 - Características do clínquer nanoestruturado*

| Ficha técnica do clínquer nanoestruturado |                                     |
|-------------------------------------------|-------------------------------------|
| Lote                                      | CNT00319                            |
| Rendimento                                | 15% (+-2)                           |
| Processo de síntese                       | Processo batelada rotativo tipo CVD |
| Morfologia                                | NTC/NFC                             |

Fonte: CTNano/UFG



*Figura 3.4 – Clínquer nanoestruturado do Lote CNT00319.*

#### *Análise termogravimétrica*

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

Estruturas degradadas abaixo de 400°C podem configurar presença de carbono amorfo ou estruturas com muitos defeitos.

No gráfico da Figura 3.5 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 CNT00319 foi de 15 % no total, com uma temperatura média de queima a 500°C.

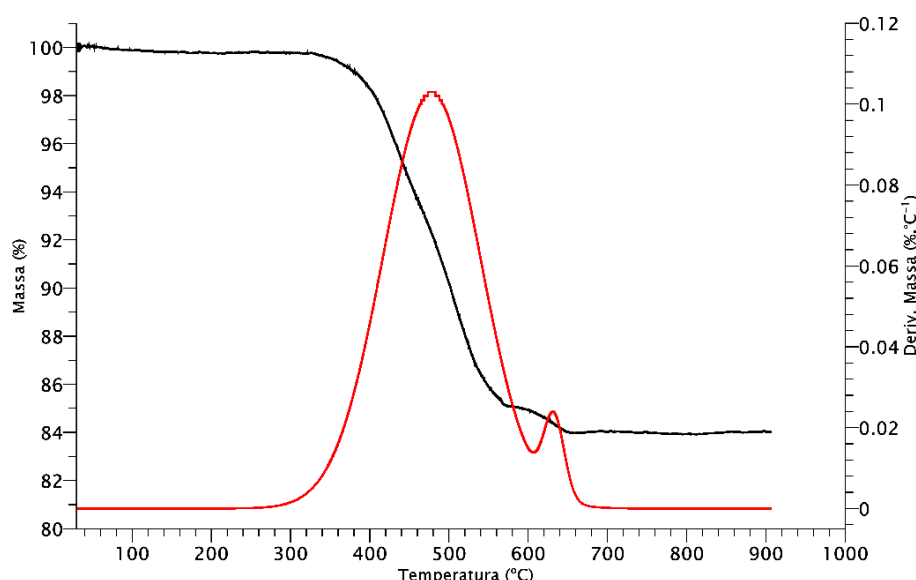
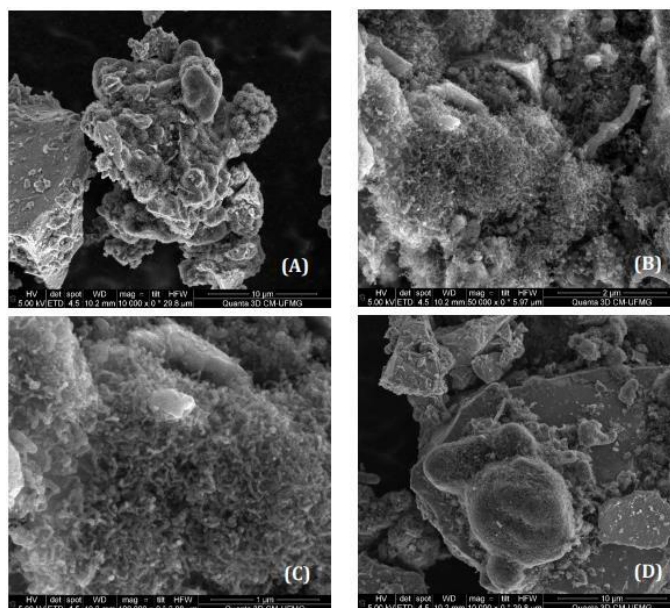


Figura 3.5 – Análise termogravimétrica do clínquer nanoestruturado de lote CNT00319.

Fonte: CTNano/UFG

### *Microscopia eletrônica de varredura - MEV*

A análise morfológica do lote CNT00319 foi feita por meio de microscopia eletrônica de varredura de elétrons (MEV). A Figura 3.6 mostra como os NTC estão dispostos nas partículas de clínquer. Nota-se que grande parte das partículas de clínquer estão recobertas pelas nanoestruturas, porém, observa-se também algumas partículas sem sinais de recobrimento.



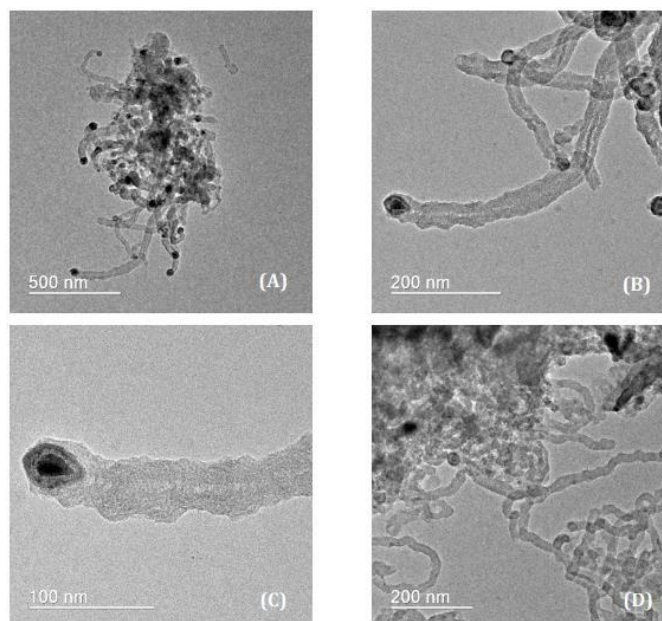
*Figura 3.6 – Imagens de MEV do clínquer nanoestruturado de lote CNT00319.*  
Fonte: CTNano/UFGM

A interação catalisador-substrato, como também, a concentração de partículas de ferro distribuídas na matriz, interferem no modo como os nanotubos e nanofibras crescem e se organizam sobre o clínquer. Nesse sentido, tanto a concentração quanto a interação podem ser analisadas para que uma distribuição mais homogênea na matriz seja promovida, sem aglomeração pontual.

De maneira geral, os NTC/NFC são curtos e os diâmetros visualmente equivalentes.

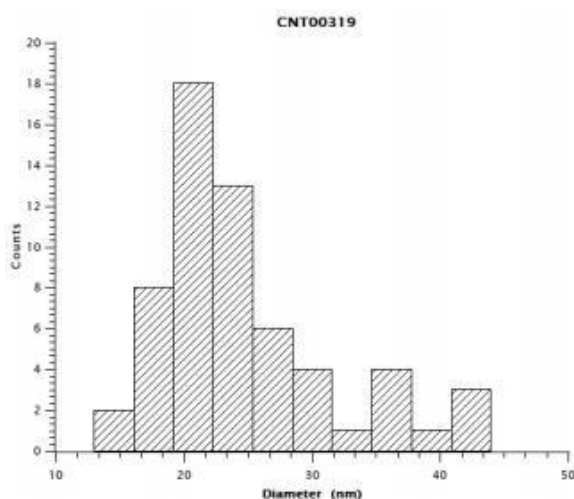
#### *Microscopia eletrônica de transmissão – MET*

A estrutura interna, formação de paredes, diâmetro interno e externo são algumas características possíveis de serem avaliadas pela técnica de MET (CTNano/UFGM). De acordo com as imagens da Figura 3.7, a morfologia do material sintetizado sobre o clínquer compreende nanotubos e nanofibras de carbono.



*Figura 3.7 – Imagens de MET do clínquer nanoestruturado de lote CNT00319.*  
Fonte: CTNano/UFG

Os resultados apresentados corroboram o fato de que os nanotubos e nanofibras de carbono estão aderidos à matriz do clínquer, e em sua maioria apresentam um crescimento de base e possuem um diâmetro médio de 25 nm. A análise dos diâmetros pode ser observada no histograma da Figura 3.8.



*Figura 3.8 – Histograma dos diâmetros de NTC e NFC produzidos sobre o clínquer de lote CNT00319.*  
Fonte: CTNano/UFG

### 3.2 Descrição da composição dos concretos autoadensável

Os concretos autoadensável foram dosados utilizando o mesmo método de dosagem que Borges (2019) empregou em sua pesquisa. Este método de dosagem é comumente utilizado na rotina da central concreteira da Intercement, em Praia Grande/SP e, segundo o Engenheiro responsável, não segue nenhum método específico (como os citados no item 2.1.2) e sim um método próprio da empresa, criado por meio de testes e estudos prévios realizados que atendem às especificações exigidas.

As seguintes premissas foram utilizadas para a composição dos concretos autoadensável: relação água/cimento de 0,45 e classe de espalhamento maior ou igual a *SF 2*, de acordo com a ABNT NBR 15823-1 (2017). Foram produzidos quatro traços de concreto autoadensável, como mostra o Quadro 3.2 . Foi produzido um concreto de referência (CAAREF), sem a presença do nanotubos de carbono (NTC), e concretos com substituição de parte do cimento por clínquer nanoestruturado nos quais o teor de NTC em relação a massa total de cimento anidro foram: 0,5 % de NTC (CAANTC050), 0,75 % de NTC(CAANTC075) e 1 % de NTC (CAANTC1). Os valores apresentados no quadro 3.2 são para 1 m<sup>3</sup> de concreto. Para o cálculo da quantidade de clínquer nanoestruturado foi utilizado um teor de 15 % de NTC em massa, de acordo com o rendimento obtido pela análise termogravimétrica (item 3.1.4).

Quadro 3.2 – Proporções dos materiais constituintes dos concretos autoadensável

| Denominação dos Concretos | Cimento | Clínquer Nanoestruturado | Água | Areia Natural | Areia Artificial | Brita 0 | Aditivo Mira 481 | Aditivo ADVA 518 |
|---------------------------|---------|--------------------------|------|---------------|------------------|---------|------------------|------------------|
|                           | (kg)    | (kg)                     | (kg) | (kg)          | (kg)             | (kg)    | (kg)             | (kg)             |
| CAAREF                    | 409     | 0                        | 184  | 573           | 385              | 818     | 3,27             | 3,76             |
| CAANTC050                 | 395,37  | 13,63*                   |      |               |                  |         |                  |                  |
| CAANTC075                 | 388,55  | 20,45**                  |      |               |                  |         |                  |                  |
| CAANTC1                   | 381,73  | 27,27***                 |      |               |                  |         |                  |                  |

\* Para CAANTC050 – 0,50 % de cimento =  $0,50 * 409/100 * 100/15 = 13,63$

\*\* Para CAANTC075 – 0,75 % de cimento =  $0,75 * 409/100 * 100/15 = 20,45$

\*\*\* Para CAANTC1 – 1 % de cimento =  $1 * 409/100 * 100/15 = 27,27$

### 3.3 Produção dos concretos

Os concretos foram produzidos no início de fevereiro de 2020, na central concreteira da InterCement® em Praia Grande/SP e essa produção foi dividida em dois dias. Foram produzidos, no total, 4 traços, sendo o primeiro dia destinado a produção do CAA de referência e ao CAA com 0,5 % de NTC. Os traços destes concretos foram executados na seguinte ordem: primeiramente o traço de referência, em seguida o traço com 0,5 % de NTC. O segundo dia foi destinado a produção do CAA com 0,75 % de NTC e 1 % de NTC. Os traços destes concretos foram feitos na seguinte ordem: primeiramente, o traço com 0,75 % de NTC e, em seguida, o traço com 1 % de NTC.

Os traços de concreto foram preparados em betoneira de eixo horizontal de 250 litros, enquanto a mistura de cimento Portland ao clínquer nanoestruturado foi realizada em outra betoneira de eixo horizontal de 120 litros.

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

### *Concreto autoadensável de referência – CAAREF*

- 1 – As fôrmas metálicas foram limpas e lubrificadas com óleo desmoldante; 2
- Os materiais sólidos componentes do traço foram separados e pesados;
- 3 – O primeiro material a ser colocado na betoneira foi a brita 0, seguida da areia natural e posteriormente da areia industrial; mistura do material por 1 minuto;
- 4 – O cimento foi em seguida colocado na betoneira e todo o material misturado por aproximadamente 30 segundos;
- 5 – Foi colocada metade da quantidade de água na betoneira e foi misturada por 2 minutos;
- 6 – Adição do aditivo MIRA 481 na betoneira e mistura por 2 minutos;
- 7 – Adição do aditivo ADVA 518 na betoneira e mistura por 2 minutos;
- 8 – Os tubos de ensaio que continham os aditivos foram lavados com o restante da água e essa água contendo o restante dos aditivos foi colocada dentro da betoneira com ela ligada, mudando a sua inclinação, quando necessário, para uma melhor mistura por mais 4 minutos;
- 9 – Foi verificado se havia concreto aderido nas paredes da betoneira e caso houvesse, era retirado com colher de pedreiro e régua metálica, até que não houvesse mais material nestas condições;
- 10 – O concreto foi retirado da betoneira e colocado em carrinho de mão para prosseguimento dos ensaios no estado fresco e moldagem.

### *Concretos autoadensável nanoestruturados*

- 1 – Primeiramente procedeu-se com limpeza e secagem da betoneira de 120 litros para realização da mistura do cimento CP V com o clínquer contendo NTC na proporção de cada traço;
- 2 – Mistura do clínquer nanoestruturado ao cimento Portland na betoneira de 120 litros, durante 10 minutos. Esse tempo foi suficiente para que se pudesse atestar visualmente uma mistura bem homogênea;
- 3 – As fôrmas metálicas foram limpas e lubrificadas com óleo desmoldante;
- 4 – Os materiais sólidos componentes do traço foram separados e pesados;

- 5 – O primeiro material a ser colocado na betoneira foi a brita 0, seguida da areia natural e posteriormente da areia industrial; mistura do material por 1 minuto
- 6 – Colocação do cimento (já combinado com clínquer nanoestruturado – item 2 acima) na betoneira e todo o material misturado por 30 segundos;
- 7 – Foi colocada metade da quantidade de água na betoneira e foi misturada por 2 minutos;
- 8 – Adição do aditivo MIRA 481 na betoneira e mistura por 2 minutos;
- 9 – Adição do aditivo ADVA 518 na betoneira e mistura por 2 minutos;
- 10 – Os tubos de ensaio que continham os aditivos foram lavados com o restante da água e essa água contendo o restante dos aditivos foi colocada dentro da betoneira com ela ligada, mudando a sua inclinação, quando necessário, para uma melhor mistura por mais 4 minutos;
- 11 – Foi verificado se havia concreto aderido nas paredes da betoneira e caso houvesse, era retirado com colher de pedreiro e régua metálica, até que não houvesse mais material nestas condições;
- 12 – O concreto foi retirado da betoneira e colocado em carrinho de mão para prosseguimento dos ensaios no estado fresco e moldagem.

A Figura 3.9 mostra algumas etapas da produção dos concretos autoadensável.



Figura 3.9 – a) lubrificação das fôrmas com óleo desmoldante; b) materiais pesados e separados; c) CAA nas fôrmas

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

Os seguintes ensaios no concreto em seu estado fresco foram realizados antes das moldagens dos corpos de prova: ensaio de espalhamento e do tempo de escoamento (“*Slump Flow Test*” e “*Slump Flow T<sub>500</sub> Test*”), determinação da habilidade passante sob fluxo livre (Método do Anel J) e ensaio de teor de ar incorporado pelo método pressométrico. Todos estes métodos fornecem parâmetros de trabalhabilidade dos concretos.

#### 3.4.1 Determinação do espalhamento e tempo de escoamento

De acordo com a NBR 15823-1 (2017), o valor do espalhamento do concreto autoadensável (CAA) fornece indicações de sua fluidez e de sua habilidade de preenchimento em fluxo livre. A Tabela 3.11 mostra as classes de espalhamento do CAA em função de sua aplicação. Para os CAA desse estudo, foi escolhida a classe de espalhamento SF 2.

*Tabela 3.11 - Classes de espalhamento do CAA em função de sua aplicação*

| Classe de espalhamento | Espalhamento (mm) | Aplicação                                                                                                                                                                                                                                                   | Exemplo                                     |
|------------------------|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| SF 1                   | 550 a 650         | Estruturas não armadas ou com baixa taxa de armadura e embutidos, cuja concretagem é realizada a partir do ponto mais alto, com deslocamento livre;<br><br>Estruturas que requerem uma curta distância de espalhamento horizontal do concreto autoadensável | Lajes, estacas e certas fundações profundas |
| SF 2                   | 660 a 750         | Adequada para a maioria das aplicações correntes                                                                                                                                                                                                            | Paredes, vigas, pilares                     |
| SF 3                   | 760 a 850         | Estruturas com alta densidade de armadura e/ou de forma arquitetônica complexa, com o uso de concreto com agregado graúdo de pequenas dimensões (menor que 12,5 mm)                                                                                         | Pilares-parede, paredes-diafragma, pilares  |

Fonte: Anexo A NBR 15823-1 (2017)

O teste para determinação do espalhamento (*“slump flow test”*) consiste em medir, cessado o espalhamento do concreto, dois diâmetros ortogonais. Para a realização do ensaio, 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 foi posicionada no chão, próxima a betoneira. Além disso, utilizou-se um tronco de cone metálico vazado de espessura 1,5 mm, diâmetro inferior de 200 mm, diâmetro superior de 100 mm e de altura igual a 300 mm, 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.

Então, o concreto autoadensável foi recolhido da betoneira conforme a ABNT NM 33 (1998), em recipiente 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 3.10.



Figura 3.10 – a) CAA sendo colocado no cone; b) retirada do cone c) concreto exposto na chapa metálica d) medida do espalhamento

Para determinar o tempo de escoamento dos CAA, foram realizados testes empregando o método do cone de Abrams. Para determinação do tempo de escoamento, o ensaio consistiu em:

- Posicionar o cone de Abrams no centro de uma base plana;
- Preencher o cone com concreto retirando o excesso;
- Determinar o tempo necessário após a retirada do cone para que o espalhamento do concreto sobre a base atinja um diâmetro de 500 mm (*“slump flow  $t_{500}$  test”*).

A Tabela 3.12 mostra as classes de viscosidade plástica aparente do CAA em função do tempo e aplicação.

*Tabela 3.12 - Classes de viscosidade plástica aparente do CAA em função de sua aplicação*

| Classe de viscosidade plástica aparente | $t_{500}$ (s) | Aplicação                                                                                                                                                                                                    | Exemplo                                                                          |
|-----------------------------------------|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| VS1                                     | $\leq 2$      | Adequado para elementos estruturais com alta densidade de armadura e embutidos, mas requer controle da exsudação e da segregação; Concretagens realizadas a partir do ponto mais alto com deslocamento livre | Paredes-diafragma, pilares-parede, indústria de pré-moldados e concreto aparente |
| VS2                                     | $> 2$         | Adequado para a maioria das aplicações correntes. Apresenta efeito tixotrópico que acarreta menor pressão sobre as fôrmas e melhor resistência à segregação                                                  | Vigas, lajes e outras.                                                           |

Fonte: Anexo A NBR 15823-1 (2017)

#### 3.4.2 Determinação da habilidade passante – Ensaio do anel J

Como os resultados obtidos no ensaio de espalhamento não proporcionam uma medida direta para avaliar a habilidade do CAA passar entre as armaduras, Groth e Nemeger (1999) propuseram uma combinação do ensaio de

espalhamento com um anel, denominado anel J, a fim de analisar o risco de bloqueio do escoamento do CAA e também verificar a resistência a segregação do CAA.

O ensaio do anel *J* (*J-Ring Test*) é utilizado para avaliar a capacidade do CAA no estado fresco fluir sem perder sua uniformidade ao atravessar espaços confinados ou descontinuidades geométricas.

Para a execução do ensaio, os equipamentos utilizados foram os mesmos utilizados para o ensaio de espalhamento e tempo de escoamento, além do anel *J*. O ensaio seguiu as prescrições estabelecidas pela NBR 15823-3 (2017). No que se refere à metodologia de ensaio, os procedimentos apresentaram a mesma sequência executiva observada no ensaio do cone de Abrams, no entanto, com a presença do anel *J* que impedia a passagem livre do CAA.

O ensaio consistiu em avaliar o espalhamento final com a utilização do anel *J*, que deve ser determinado pela Equação 3.1.

$$JF = \frac{J_1 + J_2}{2} \quad (3.1)$$

onde  $J_1$  é o diâmetro maior e  $J_2$  é o diâmetro menor obtidos no ensaio com o anel *J*, ambos expressos em milímetros (mm).

Além disso, foi determinada também a diferença entre o diâmetro médio do espalhamento, no ensaio sem o anel *J* e o espalhamento obtido com o anel *J*. Essa diferença foi calculada pela Equação 3.2.

$$PJ = SF - JF \quad (3.2)$$

Onde  $JF$  é a média aritmética dos dois valores de diâmetro de espalhamento obtidos no ensaio do anel *J*, expressa em milímetros (mm);  $SF$  é a média aritmética dos dois valores de diâmetro de espalhamento obtidos no ensaio *slump flow test*, sem anel *J*, expressa em milímetros (mm) e  $PJ$  é a diferença entre o diâmetro médio de espalhamento obtido com e sem a utilização do anel *J*, expressa em milímetros (mm).

Além disso, no ensaio, foi observado se houve obstrução à passagem do concreto pelas barras do anel J, e o indício de segregação, tanto no centro da amostra quanto na passagem pelas barras.

A Tabela 3.13 apresenta as classes de habilidade passante (fluxo livre) pelo método do anel J de acordo com a NBR 15823-1 (2017).

*Tabela 3.13 - Classes de habilidade passante do CAA em função de sua aplicação*

| Viscosidade plástica aparente | PJ (mm)                               | Aplicação                                                                                                             | Exemplo                                             |
|-------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| PJ 1                          | De 0 mm a 25 mm com 16 barras de aço  | Adequada para a maioria das aplicações correntes. Elementos estruturais com espaçamentos de armadura de 60 mm a 80 mm | Vigas, pilares, tirantes, indústria de pré-moldados |
| PJ 2                          | De 25 mm a 50 mm com 16 barras de aço | Adequada para elementos estruturais com espaçamentos de armadura de 80 mm a 100 mm                                    | Lajes, painéis, elementos de fundação               |

Fonte: Anexo A NBR 15823-1 (2017)

A Figura 3.11 ilustra o ensaio.



*Figura 3.11 - Ensaio do anel J*

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

A ABNT NM 47 (2002) regulamenta, no Brasil, o ensaio do teor de ar incorporado pelo método pressométrico, que tem como objetivo determinar o volume de ar incorporado percentualmente ao volume total de concreto em seu estado fresco. Este ensaio foi realizado para todos os traços de concreto autoadensável.

Na norma que regulamenta o ensaio são apresentados dois tipos de medidores de ar disponíveis para utilização, que diferem em sua técnica operativa. Nesse estudo, o equipamento utilizado para a determinação do teor de ar do concreto fresco pelo método pressométrico foi o medidor tipo B. Trata-se de um medidor de aço 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 concreto.

O teste teve início com a coleta de uma amostra de concreto, em recipiente metálico não absorvente, conforme prescreve a ABNT NM 33 (1998), diretamente da betoneira. Na sequência, colocou-se o recipiente de medida sobre uma plataforma nivelada e o encheu com a amostra de concreto.

Finalizado o procedimento de enchimento, a superfície da amostra contida no recipiente foi rasada com régua metálica, deslizando-a sobre a borda até sua regularização. As bordas do recipiente e da tampa foram cuidadosamente limpas e em seguida houve o fechamento hermético do aparelho.

Em seguida, a válvula de ar principal foi fechada e os dois registros localizados na tampa foram abertos. Com auxílio de uma seringa, injetou-se água através de um dos registros para que o ar existente entre a tampa e a superfície de concreto fosse totalmente eliminado. A água foi introduzida até que saísse através do registro oposto sem bolhas de ar. Para expulsar o ar aprisionado acima da superfície da amostra de concreto, o equipamento foi sacudido suavemente.

Após o fechamento da válvula de sangramento de ar, bombeou-se ar para a câmara até que o ponteiro do manômetro estivesse na posição inicial, indicando pressão igual a zero. Por fim, os dois registros foram fechados e a válvula de ar principal aberta. Para uma melhor estabilização da pressão antes da leitura de porcentagem de ar, foram efetuados golpes suaves com os dedos e então a leitura da porcentagem de ar na escala do manômetro foi registrada. O resultado do ensaio foi expresso em porcentagem com aproximação de 0,1% para teores até 2% e 0,2% para teores de 2% a 8%.

### 3.5 Moldagem dos corpos de prova

Nesse estudo foram utilizadas fôrmas, previamente identificadas, de aço cilíndricas, com dimensões de 100 x 200 mm (diâmetro e altura) e os concretos foram moldados de acordo com as especificações da ABNT NBR 5738 (2003). Para a colocação do concreto nos moldes metálicos, foi utilizada uma concha metálica, além de uma colher de pedreiro para rasar o CP. Na Figura 3.12 pode-se observar a moldagem dos CP's.



Figura 3.12 – a) Fôrmas já identificadas e com o óleo desmoldante; b) CAA sendo colocado nas fôrmas c) CAA nas fôrmas

Após moldagem dos CP's, eles permaneceram, de um dia para o outro, em uma sala fechada com temperatura ambiente. Então, após 24h, estes CP's foram desformados, identificados com giz de cera e transportados para uma câmara úmida, cuja temperatura e umidade eram controladas, onde permaneceram até as idades propostas para os ensaios.

A Tabela 3.14 apresenta a quantidade de CP's moldados, para cada traço de CAA, levando em consideração a idade e o tipo de ensaio mecânico.

*Tabela 3.14 - Quantidade de CP's moldados, para cada traço de CAA*

| <b>Idade dos ensaios</b> | <b>Resistência à compressão</b> | <b>Resistência à tração por compressão diametral</b> | <b>Módulo de elasticidade</b> |
|--------------------------|---------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------|
| 3 dias                   | 3                               | 5                                                    | 3                             |
| 7 dias                   | 3                               | 5                                                    | 3                             |
| 28 dias                  | 3                               | 5                                                    | 3                             |
| 56 dias                  | 3                               | 5                                                    | 3                             |

### **3.6 Ensaios dos concretos no estado endurecido**

A caracterização do comportamento do concreto autoadensável, no estado endurecido, foi feita em diferentes idades (3, 7, 28 e 56 dias) por meio da avaliação da resistência à compressão, da resistência à tração por compressão diametral e do módulo de elasticidade.

De acordo com Button (2012), o planejamento experimental, também denominado delineamento experimental, representa um conjunto de ensaios estabelecido com critérios científicos e estatísticos, com o objetivo de determinar a influência de diversas variáveis nos resultados de um dado sistema ou processo.

Como o objetivo da pesquisa era analisar o comportamento do concreto autoadensável (CAA) produzido com nanotubos de carbono em diferentes teores (0,5 %, 0,75 % e 1 %) e compará-los a um concreto de referência, sem NTC, primeiramente foi feito o delineamento dos experimentos, determinação

das variáveis mais influentes e atribuição de valores de modo a otimizar e minimizar a variabilidade dos resultados e também minimizar a influência de variáveis incontroláveis. Assim, levou a obtenção de resultados com um maior grau confiabilidade.

Os ensaios foram realizados seguindo as normas vigentes atualizadas:

- NBR 5739:2018 Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos;
- NBR 7222:2011 Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos;
- NBR 8522:2017 Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão.

### *3.6.1 Resistência à compressão axial e módulo de elasticidade*

De acordo com Marcondes (2012), uma das principais propriedades mecânicas para avaliar concretos de cimento Portland é a resistência à compressão. Mehta e Monteiro (2014) consideram a resistência à compressão do concreto como uma espécie de parâmetro de sua qualidade, além de ser usada também como índice para as demais resistências mecânicas. Marcondes (2012) cita que valores abaixo do esperado de resistência podem indicar que o concreto apresenta problemas estruturais que podem ser originados desde a sua dosagem, confecção, utilização de materiais inadequados até uma má formação interna da estrutura por falta de adensamento ou por ausência de cura.

O ensaio de resistência à compressão axial consistiu na determinação da carga máxima de ruptura suportada pelo corpo de prova, que, no caso deste trabalho, foi realizado nas idades de 3, 7, 28 e 56 dias do concreto. As faces de contato dos CP's com os pratos da prensa foram retificadas. O ensaio foi realizado como prescreve a norma NBR 5739 (2018), utilizando prensa hidráulica. Segundo a norma, a resistência à compressão é obtida pela Equação 3.3:

$$f_c = \frac{4.F}{\pi.D^2} \quad (3.3)$$

em que:

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

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

D = diâmetro do corpo-de-prova, em milímetros (mm).

Já o módulo de elasticidade ou módulo de Young é a razão de uma tensão aplicada sobre um corpo e a deformação nele verificada. A ABNT NBR 6118 (2014) exige que a grandeza seja determinada de acordo com os procedimentos recomendados pela ABNT NBR 8522 (2017) que define a metodologia do ensaio estático, denominada módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente inicial, e módulo de deformação secante.

O ensaio foi realizado, de acordo com a ABNT NBR 5738 (2016), em 3 corpos de prova cilíndricos curados em água até as datas dos ensaios. Inicialmente os corpos de prova foram posicionados no centro da prensa e submetidos a três carregamentos e descarregamentos sucessivos entre a tensão inicial de 0,5 MPa e a tensão limite máxima de  $0,3*f_c$ . A resistência média  $f_c$  foi determinada previamente a partir dos resultados de ruptura de dois corpos de prova ensaiados a compressão axial conforme a ABNT NBR 5739 (2018).

Em seguida foi realizado, em cada corpo de prova, 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,  $0,8*f_c$ . A deformação foi medida 5  $\pm$  2 segundos após a estabilização da carga correspondente a cada nível de tensão. Para medida da deformação, foi utilizado um compressômetro de bases dependentes que continha um relógio comparador com precisão de medida de 0,001 mm. O compressômetro mede o deslocamento relativo entre duas seções, espaçadas de 100 mm, ao longo da altura do corpo de prova. Como esse compressômetro é de base dependentes, o deslocamento relativo

real do corpo de prova corresponde à metade do valor medido pelo relógio comparador.

A partir da curva tensão versus deformação de cada corpo de prova, foi calculado o módulo de elasticidade de acordo com a norma 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 % de  $f_c$ . O módulo de elasticidade inicial,  $E_{ci}$ , em GPa, foi calculado pela Equação 3.4.

$$E_{ci} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \times 10^{-3} = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \times 10^{-3} \quad (3.4)$$

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.

Após a realização dos ensaios da relação tensão versus deformação de cada concreto em cada idade, os respectivos corpos de prova foram recolocados na prensa 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.

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. Este equipamento pertence à InterCement®, estando localizada em sua unidade de Praia Grande/SP. Na Figura 3.13 podem ser visualizados como os CP's são posicionados na máquina nos ensaios à compressão (A) e ensaios de módulo de elasticidade (B).



*Figura 3.13 – a) Posicionamento do CP para ensaio de compressão;  
b) Posicionamento do CP para ensaio da relação tensão versus deformação.*

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

Para a determinação da resistência à tração por compressão diametral, utilizou-se a norma NBR 7222 (2011), que estabelece os parâmetros para o ensaio. Foram utilizados vinte corpos de prova para cada idade (cinco CP's para cada tipo de concreto). Eles foram retificados e suas medidas coletadas utilizando um paquímetro e anotadas numa planilha.

A medida da resistência à tração por compressão também foi feita na máquina de ensaios utilizada na resistência à compressão e módulo de elasticidade. 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.

Segundo a norma utilizada, a resistência à tração por compressão diametral foi obtida pela Equação 3.5:

$$f_{ct,sp} = \frac{2.F}{\pi.D.l} \quad (3.5)$$

em que:

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

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

D = diâmetro do corpo de prova, em milímetros (mm);

l = comprimento do corpo de prova, em milímetros (mm).

Na Figura 3.14 podem ser visualizados como os CP's foram posicionados na máquina nos ensaios à tração por compressão diametral (A) e mais detalhes do aparato utilizado para posicionamento dos CP's na máquina de ensaio (B). A figura 3.15 ilustra os corpos de prova após a ruptura por tração diametral.



Figura 3.14 – a) Posicionamento do CP para ensaio de tração por compressão diametral; b) Detalhes do aparato para posicionamento de CP's na máquina de ensaio.



*Figura 3.15 – Corpos de prova depois de rompidos (idade de 7 dias) na seguinte sequência da esquerda para a direita: CAAREF, CAANTC050, CAANTC075 e CAANTC1.*

## 4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E ANÁLISE

São apresentados, a seguir, os resultados e análise dos efeitos dos nanotubos de carbono (NTC) na trabalhabilidade, habilidade passante e nas resistências mecânicas dos concretos autoadensável (CAA) avaliados.

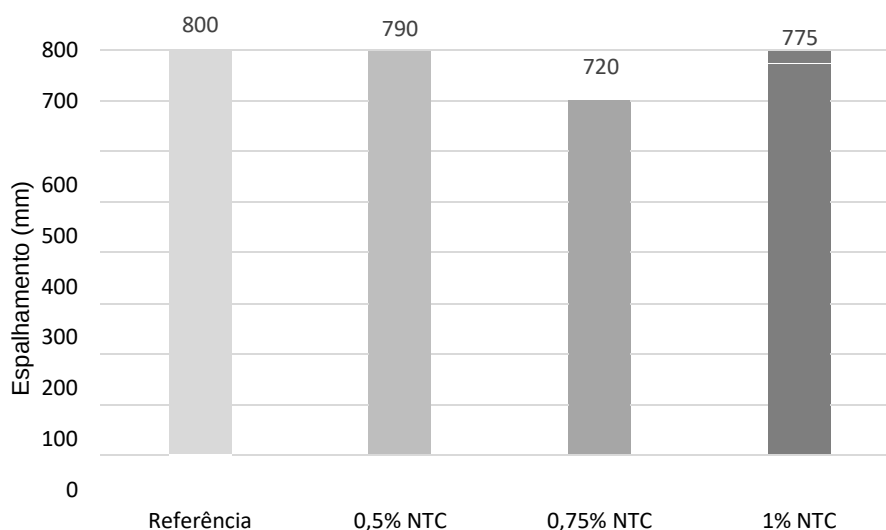
### 4.1 Resultados e análise dos ensaios dos concretos autoadensável no estado fresco

#### 4.1.1 Ensaio de espalhamento e tempo de escoamento

Logo após o preparo dos concretos autoadensável (CAA) e antes das moldagens dos corpos de prova, foi realizado o ensaio de espalhamento ( slump flow test) e tempo de escoamento (slump flow  $t_{500}$  test) para cada CAA e os resultados são apresentados e analisados a seguir.

##### *Slump Flow Test (inicial)*

Pode-se observar no gráfico da Figura 4.1 que o concreto CAANTC075 nanoestruturado com 0,75 % de NTC apresentou uma diminuição no espalhamento de 10 %, em relação ao CAA de referência (sem NTC). Já ostras com 0,5 % de NTC (CAANTC050) e 1 % de NTC (CAANTC1), apresentaram, respectivamente, diminuição no espalhamento de 1,25 % e 3,13 %, em relação ao espalhamento encontrando no CAA de referência (sem NTC).



*Figura 4.1 – Resultados do slump flow test do concreto.*

O valor do espalhamento do concreto autoadensável de referência, sem NTC, se encaixa na classe de espalhamento *SF3*, de acordo com a ABNT NBR 15823-1 (2017). A classe *SF3* abrange concretos para aplicações em estruturas com alta densidade de armadura e/ou de forma arquitetônica complexos e concretos com agregado graúdo de pequenas dimensões (menor que 12,5 mm).

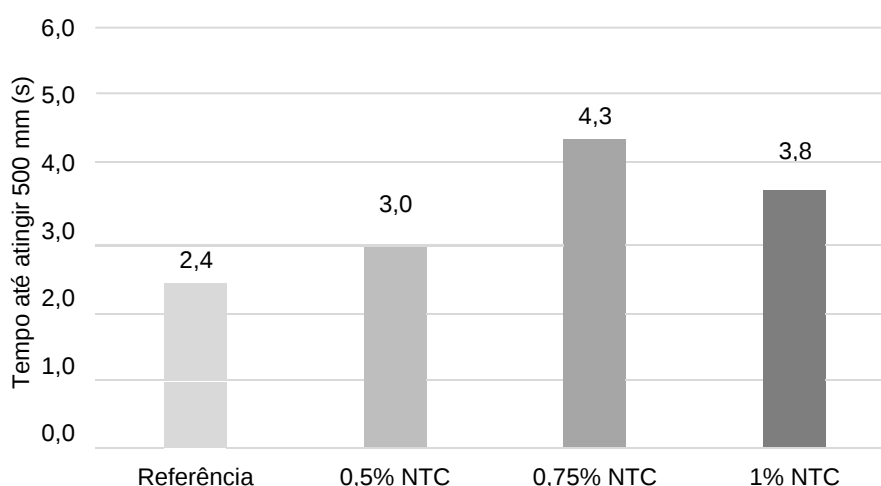
Pode-se dizer que os NTC não influenciaram a trabalhabilidade do concreto autoadensável nos traços com 0,5 % de NTC (CAANTC050) e 1,0 % de NTC (CAANTC1), uma vez que os valores de espalhamento encontrados se encaixam na classe de espalhamento *SF3*, assim como o CAA de referência. Apenas o traço com 0,75 % de NTC apresentou espalhamento dentro da classe *SF2* da ABNT NBR 15823-1 (2017). Portanto todos os concretos atenderam às premissas do estudo: classe de espalhamento maior ou igual a *SF 2*, de acordo com a ABNT NBR 15823-1 (2017).

Nos resultados obtidos por Borges (2019), o CAA nanoestruturado, em relação ao CAA de referência sem NTC, apresentou uma diminuição no valor do espalhamento de 7,53 % para o traço que continha 0,30 % de NTC (CAANTC030). Praticamente o mesmo percentual de redução 8,22 % foi encontrado no CAA com 0,15 % NTC (CAANTC015). Apesar dessa redução,

os três CAA (referência, CAANTC015 e CAANTC030) pertenceram a classe de espalhamento *SF 2*, segundo a ABNT NBR 15823-1 (2017). Portanto nesse estudo, pode-se dizer que os NTC também não influenciaram a trabalhabilidade dos CAA analisados.

#### *Slump Flow $T_{500}$ Test (inicial)*

Com relação ao tempo de escoamento para que o concreto atingisse a marca de 500 mm, na medida que houve diminuição do espalhamento, mais tempo o concreto levou para atingir a marca, como era de se esperar. O tempo que cada traço analisado levou para alcançar a marca de 500 mm é indicado no gráfico da Figura 4.2.

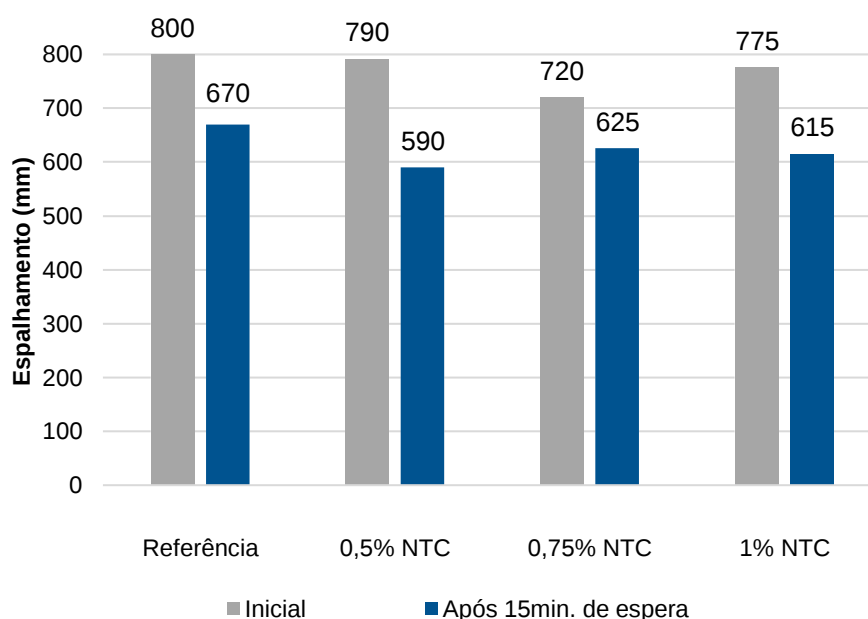


*Figura 4.2 – Tempo até o concreto atingir o espalhamento de 500 mm*

De acordo com a ABNT NBR 15823-1 (2017), que determina as classes de viscosidade plástica aparente do CAA em função de sua aplicação, todos os CAA analisados se enquadram na classe de viscosidade plástica aparente *VS 2*, que abrange concretos destinados a aplicações correntes, como vigas e pilares.

### *Slump Flow Test e Slump Flow T500 Test (após 15 minutos)*

Com o objetivo de avaliar a perda de trabalhabilidade do concreto com o passar do tempo, foi feita uma nova medida do espalhamento e do tempo de escoamento para cada CAA após 15 minutos do término do processo de produção do concreto na betoneira. Os valores (inicial e após os 15 minutos de espera) estão apresentados no gráfico da Figura 4.3.



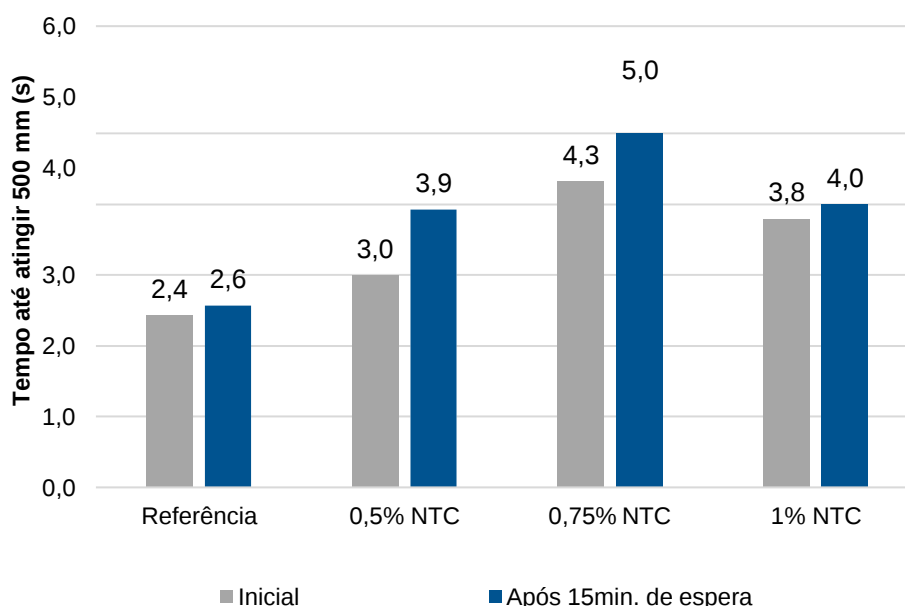
*Figura 4.3 – Resultados do slump flow test (inicial e após 15 minutos de espera)*

Os resultados apresentados no gráfico indicam que, após os 15 minutos de espera, há uma tendência de diminuição do espalhamento para todos os CAA analisados, ou seja, a trabalhabilidade diminuiu. A maior redução (25 %) ocorreu para o CAA com 0,5 % de NTC (CAANTC050) e a menor (13 %) para o CAANTC075. O CAA de referência apresentou redução de 16 %.

Observa-se no gráfico da Figura 4.3 que o CAA nanoestruturado com 0,5 % de NTC (CAANTC050) foi o concreto que apresentou uma diminuição no espalhamento mais significativa: 11,94 % em relação ao CAA de referência (sem NTC). Os concretos com 0,75 % de NTC (CAANTC075) e 1 % de NTC (CAANTC1) apresentaram diminuição no espalhamento de 6,22 % e 8,21 %, respectivamente.

Estes resultados revelam que os NTC influenciaram a trabalhabilidade dos CAA, de forma mais significativa, após um tempo de espera de 15 minutos, uma vez que os valores de espalhamento encontrados em todos os CAA nanoestruturados se encaixam na classe de espalhamento *SF1* da ABNT NBR 15823-1 (2017). O CAA de referência também mudou de classe: passou da *SF3* para a *SF2*.

Com relação ao tempo de escoamento, os resultados de ambas as medidas (inicial e após 15 minutos de espera) estão apresentados no gráfico da Figura 4.4.



*Figura 4.4 – Resultados do tempo até os CAA atingirem o espalhamento de 500 mm (inicial e após 15 minutos de espera)*

Os resultados apresentados no gráfico da Figura 4.4 indicam que, após os 15 minutos de espera, há uma tendência de aumento do tempo de escoamento para todos os CAA analisados. Porém de acordo com a ABNT NBR 15823-1 (2017), que determina as classes de viscosidade plástica aparente do CAA em função de sua aplicação, todos os CAA analisados continuaram se enquadrando na classe de viscosidade plástica aparente VS 2 mesmo após 15 minutos de espera.

O *Slump Flow Test* apresentou resultados que permitiram diferenciar o comportamento dos concretos nanoestruturados, se comparado ao *Slump Flow T<sub>500</sub> Test*. Nesse último, todos os concretos analisados continuaram se enquadrando na mesma classe de viscosidade plástica aparente VS 2, mesmo após 15 minutos de espera. Dessa forma, o *Slump Flow T<sub>500</sub> test* não permitiu diferenciar o comportamento de cada concreto em função do teor de NTC.

#### 4.1.2 Ensaio da habilidade passante - Anel J

Os resultados dos diâmetros médios dos espalhamentos com o Anel J bem como sem ele estão apresentados no gráfico da Figura 4.5. A diferença PJ entre os diâmetros médios dos espalhamentos, com e sem o anel J está apresentada na Tabela 4.1.

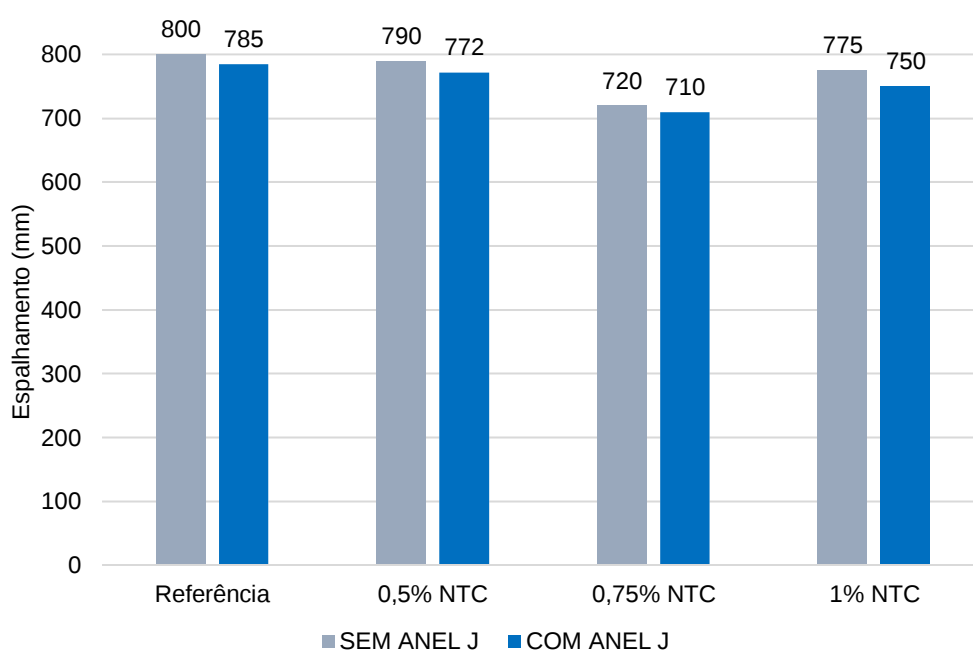


Figura 4.5 – Comparação entre os diâmetros médios dos espalhamentos utilizando o anel J e sem ele.

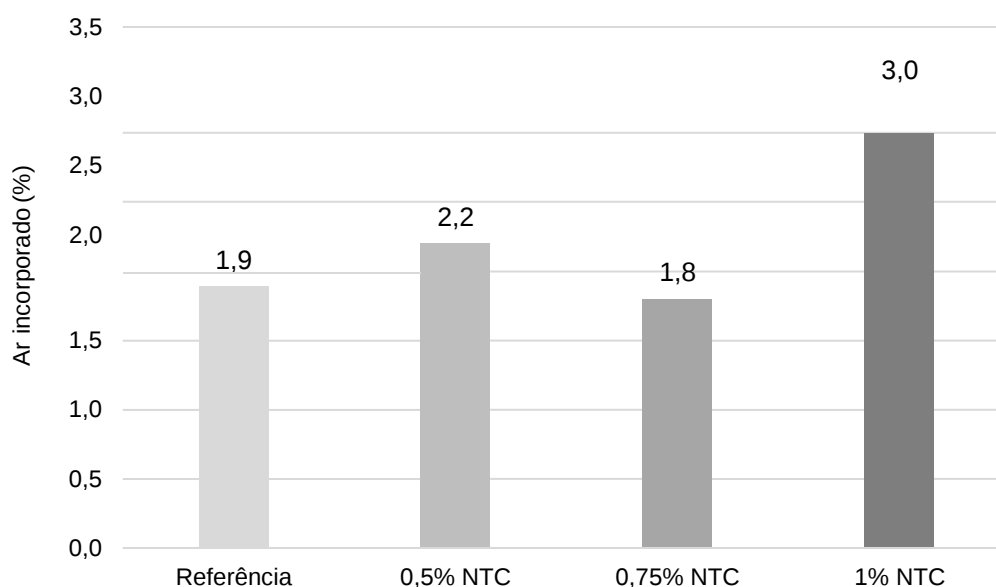
*Tabela 4.1 – Diferença entre os diâmetros de espalhamento com e sem anel J.*

| Denominação dos concretos | Diâmetro Médio do Espalhamento (mm) |            | PJ (mm) |
|---------------------------|-------------------------------------|------------|---------|
|                           | Sem Anel J                          | Com Anel J |         |
| CAAREF                    | 800                                 | 785        | 15      |
| CAANTC050                 | 790                                 | 772        | 18      |
| CAANTC075                 | 720                                 | 710        | 10      |
| CAANTC1                   | 775                                 | 750        | 25      |

Pode ser observado a presença dos NTC não interferiu no espalhamento dos concretos, uma vez que a diferença entre os espalhamentos, com e sem o anel J, continuou pertencendo à classe de habilidade passante PJ1, de acordo com a ABNT NBR 15823-1 (2017), como o CAA de referência.

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

Os resultados do ensaio de teor de ar incorporado dos traços de concreto autoadensável são apresentados no gráfico da Figura 4.6. Como pode ser observado, há uma tendência de aumento do teor de ar incorporado na medida que o teor de nanotubos de carbono aumenta, exceto para o traço com 0,75 % de NTC, onde o teor de ar incorporado medido foi praticamente o mesmo do CAA de referência. Todavia, diante da realização de apenas uma amostra de cada traço de CAA e de pequenas diferenças, os resultados revelam que os NTC não influenciaram os resultados de teor de ar incorporado nos CAA avaliados. Resultado similar foi encontrado por Borges em CAA contendo 0,15 % e 0,3 % de NTC.



*Figura 4.6 – Resultados do teor de ar incorporado nos concretos autoadensável*

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

### *4.2.1 Resistência à compressão*

Para determinação das resistências à compressão, em cada idade e traço, foram ensaiados 6 corpos de prova: três corpos de prova exclusivamente destinados para a compressão e três corpos de prova advindos do ensaio de módulo de elasticidade, totalizando, assim, 6 valores de ruptura, que foram utilizados para os cálculos de resistência à compressão.

O resumo dos resultados de resistência à compressão está representado na Tabela 4.2 e no gráfico da Figura 4.7. Os resultados obtidos estão apresentados no Apêndice A. Já as análises estatísticas realizadas com o teste *t-Student*, com um nível de confiança de 95 %, estão apresentadas resumidamente na Tabela 4.3 e mais detalhadamente no Apêndice B.

Tabela 4.2 - Resumo de resistência à compressão por idade

| Idade (dias) | Parâmetros                         | CAAREF | CAANTC050 | CAANTC075 | CAANTC1 |
|--------------|------------------------------------|--------|-----------|-----------|---------|
| 3            | Resistência média (MPa)            | 38,84  | 41,35     | 39,95     | 37,23   |
|              | Desvio Padrão (MPa)                | 0,55   | 0,87      | 0,99      | 1,38    |
|              | Coeficiente de variação (%)        | 1,42   | 2,10      | 2,48      | 3,71    |
|              | Diferença em relação ao CAAREF (%) | -      | 6,46      | 2,86      | -4,14   |
| 7            | Resistência média (MPa)            | 45,97  | 46,62     | 45,63     | 44,10   |
|              | Desvio Padrão (MPa)                | 2,73   | 1,37      | 1,37      | 2,70    |
|              | Coeficiente de variação (%)        | 5,95   | 2,94      | 3,00      | 6,12    |
|              | Diferença em relação ao CAAREF (%) | -      | 1,41      | -0,74     | -4,06   |
| 28           | Resistência média (MPa)            | 59,75  | 58,54     | 55,66     | 57,39   |
|              | Desvio Padrão (MPa)                | 0,83   | 3,35      | 2,66      | 1,44    |
|              | Coeficiente de variação (%)        | 1,39   | 5,72      | 4,78      | 2,51    |
|              | Diferença em relação ao CAAREF (%) | -      | -2,02     | -6,84     | -3,95   |
| 56           | Resistência média (MPa)            | 71,56  | 72,02     | 68,40     | 63,29   |
|              | Desvio Padrão (MPa)                | 1,93   | 2,27      | 3,79      | 4,13    |
|              | Coeficiente de variação (%)        | 2,28   | 2,66      | 2,92      | 5,81    |
|              | Diferença em relação ao CAAREF (%) | -      | 0,64      | -4,42     | -11,56  |

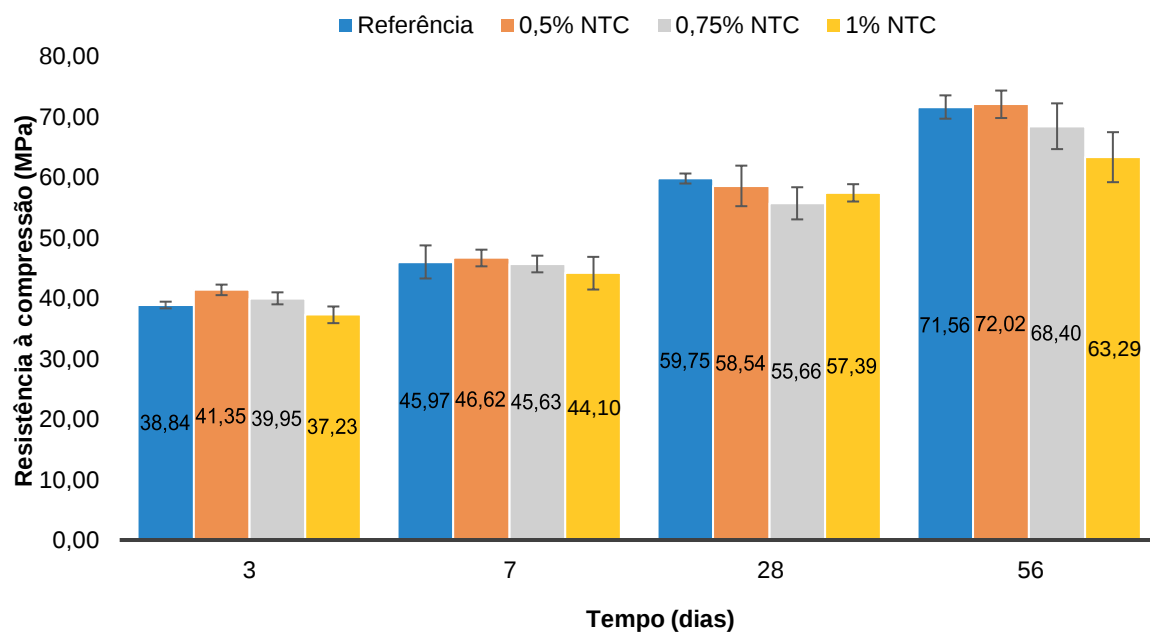


Figura 4.7 – Resultados de resistência à compressão por idade.

Tabela 4.3 - Resumo do teste *t-Student* para resistência à compressão por idade

| Idade (dias) | CAAREF x CAANTC050 | CAAREF x CAANTC075 | CAAREF x CAANTC1 |
|--------------|--------------------|--------------------|------------------|
| 3            | CAAREF < CAANTC050 | CAAREF < CAANTC075 | CAAREF > CAANTC1 |
| 7            | CAAREF = CAANTC050 | CAAREF = CAANTC075 | CAAREF = CAANTC1 |
| 28           | CAAREF = CAANTC050 | CAAREF > CAANTC075 | CAAREF > CAANTC1 |
| 56           | CAAREF = CAANTC050 | CAAREF = CAANTC075 | CAAREF > CAANTC1 |

A avaliação dos resultados dos CAA realizada com o teste *t-Student* revela que:

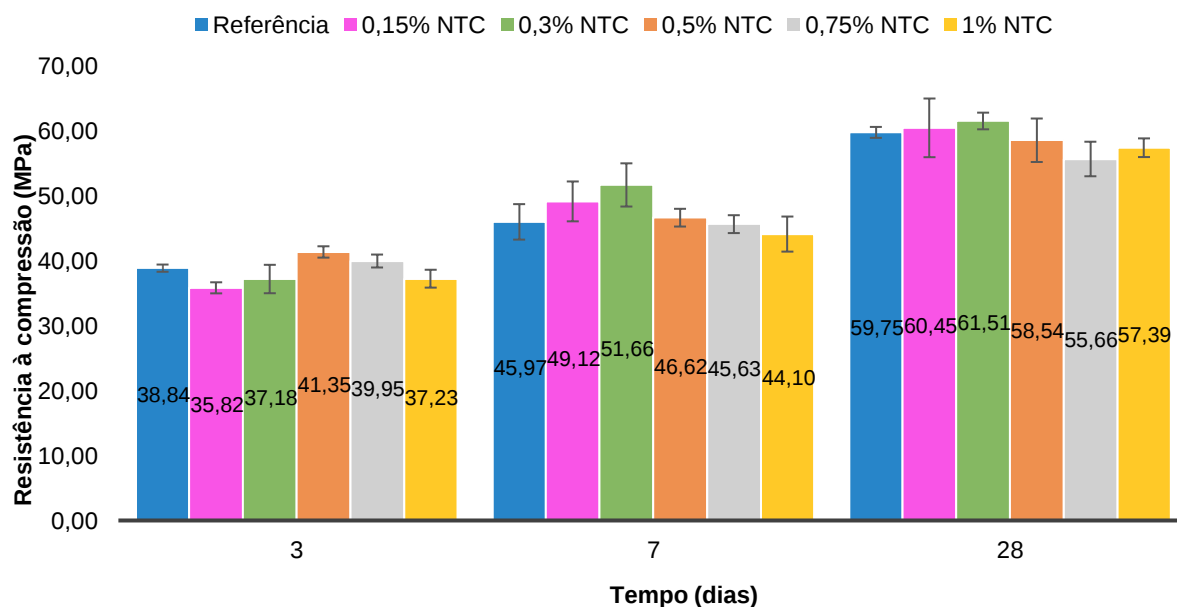
1. Aos 3 dias, todos os traços nanoestruturados estudados tiveram desempenho diferenciado em relação ao traço de referência (CAAREF), sem NTC. Para os menores teores de NTC, houve ganho de resistência à compressão: 6,46 e 2,86 %, respectivamente para o CAANTC050 e CAANTC075. Já o CAA com 1 % de NTC, a maior quantidade estudada, houve perda de 4,14 % na resistência à compressão em relação CAAREF.
2. Aos 7 dias, nenhum traço nanoestruturado apresentou diferença significativa em relação ao traço de referência CAAREF, sem NTC.
3. Aos 28 dias, os CAA com maior porcentagem de NTC apresentaram diferenças significativas nos valores de resistência à compressão em relação ao CAAREF: redução de 6,84 e de 2,86 % para o CAANTC075 e CAANTC1 respectivamente.
4. Na última idade analisada (56 dias), apenas o CAA com maior teor de NTC apresentou diferença significativa em relação ao CAAREF: redução de 11,56% na resistência à compressão.

O resumo dos resultados de resistência à compressão dos concretos autoadensável nanoestruturados encontrados por Borges (2019), em sua pesquisa, estão apresentados na Tabela 4.4. Seus resultados foram comparados ao CAAREF apresentado no presente estudo e seus valores estão evidenciados na Tabela 4.2. Borges (2019) avaliou os teores de 0,15 e 0,30 % de NTC, nas idades de 3, 7 e 28 dias, não considerando a idade de 56 dias.

*Tabela 4.4 - Resumo dos resultados de Borges (2019), para resistência à compressão.*

| Idade (dias) | Parâmetros                         | CAANTC015 | CAANTC030 |
|--------------|------------------------------------|-----------|-----------|
| 3            | Resistência média (MPa)            | 35,82     | 37,18     |
|              | Desvio Padrão (MPa)                | 0,86      | 2,19      |
|              | Coefficiente de variação (%)       | 2,39      | 5,90      |
|              | Diferença em relação ao CAAREF (%) | -13,00    | -10,00    |
| 7            | Resistência média (MPa)            | 49,12     | 51,66     |
|              | Desvio Padrão (MPa)                | 3,07      | 3,32      |
|              | Coefficiente de variação (%)       | 6,26      | 6,42      |
|              | Diferença em relação ao CAAREF (%) | 13,94     | 19,83     |
| 28           | Resistência média (MPa)            | 60,45     | 61,51     |
|              | Desvio Padrão (MPa)                | 4,51      | 1,28      |
|              | Coefficiente de variação (%)       | 7,47      | 2,08      |
|              | Diferença em relação ao CAAREF (%) | 1,55      | 3,33      |

No gráfico da Figura 4.8 são apresentados os resultados de resistência à compressão encontrados por Borges (2019), em conjunto com os resultados das resistências à compressão encontrados neste estudo.



*Figura 4.8 – Resultados de resistência à compressão por idade, incluindo os resultados de Borges (2019).*

As análises estatísticas, incluindo os resultados de Borges (2019), realizadas com o teste *t-Student*, com um nível de confiança de 95 %, estão apresentadas resumidamente na Tabela 4.5 e mais detalhadamente no Apêndice B.

*Tabela 4.5 - Resumo do teste t-Student para resistência à compressão por idade incluindo os resultados de Borges (2019).*

| Idade (dias) | REF x NTC015 | REF x NTC030 | REF x NTC050 | REF x NTC075 | REF x NTC1 |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------|
| 3            | REF > NTC015 | REF = NTC030 | REF < NTC050 | REF < NTC075 | REF > NTC1 |
| 7            | REF = NTC015 | REF < NTC030 | REF = NTC050 | REF = NTC075 | REF = NTC1 |
| 28           | REF = NTC015 | REF < NTC030 | REF = NTC050 | REF > NTC075 | REF > NTC1 |

A avaliação dos resultados dos CAA realizada com o teste *t-Student* revela que:

1. Aos 3 dias, nota-se que, para o menor teor estudado, o traço CAANTC015, contendo 0,15 % de NTC, houve diminuição da resistência à compressão, de 7,8 %, comparado ao concreto de referência. Ao aumentar o teor para 0,30 %, não foram encontradas diferenças significativas nos valores de resistência. Para os traços seguintes, CAANTC050 e CAANTC075, houve ganhos de resistência à compressão de 6,46 e 2,86 %, respectivamente. O traço CAANTC1, cujo teor de NTC foi o maior estudado, apresentou perda de resistência à compressão de 4,14 %. Observa-se uma tendência de diminuição da resistência à compressão na medida que os teores de NTC aumentam.
2. Aos 7 dias, somente o traço CAANTC030 apresentou diferença significativa em relação ao concreto de referência CAAREF, sem NTC: ganho de 12 %.
3. Aos 28 dias, os CAA com maior porcentagem de NTC apresentaram diferenças significativas nos valores de resistência à compressão em relação ao CAAREF: redução de 6,84 e de 4,0 % para o CAANTC075 e CAANTC1 respectivamente. Já o CAANTC030 foi o único traço que apresentou ganhos na resistência à compressão de 3%.

A análise de todos esses resultados revela inicialmente que o aumento de teores de NTC acima de 0,5 % em relação a massa de cimento levou a um pior desempenho na resistência à compressão dos CAA nanoestruturados. O

CAANTC030 foi o que apresentou melhor desempenho com ganhos mais significativos de resistência à compressão, em relação ao concreto de referência CAAREF sem NTC. Mais estudos se fazem necessários para confirmar esse comportamento e teor ótimo de NTC sintetizados sobre o clínquer.

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

Para determinação das resistências à tração por compressão diametral de cada CAA, em cada idade, foram ensaiados 5 corpos de prova. Porém, para os cálculos de resistência à tração por compressão diametral, foram utilizados apenas 4 desses valores de modo a manter o coeficiente de variação inferior a 10%.

O resumo dos resultados de resistência à tração por compressão diametral está representado na Tabela 4.6 e no gráfico da Figura 4.9. Os resultados obtidos estão apresentados no Apêndice A. Já as análises estatísticas realizadas com o teste *t-Student*, com um nível de confiança de 95 %, estão apresentadas resumidamente na Tabela 4.7 e mais detalhadamente no Apêndice B.

Tabela 4.6 - Resumo de resistência à tração por idade.

| Idade (dias) | Parâmetros                         | CAAREF | CAANTC050 | CAANTC075 | CAANTC1 |
|--------------|------------------------------------|--------|-----------|-----------|---------|
| 3            | Resistência média (MPa)            | 3,14   | 3,80      | 3,69      | 3,60    |
|              | Desvio Padrão (MPa)                | 0,28   | 0,36      | 0,34      | 0,23    |
|              | Coeficiente de variação (%)        | 9,08   | 9,47      | 9,21      | 6,39    |
|              | Diferença em relação ao CAAREF (%) | -      | 21,02     | 17,52     | 14,65   |
| 7            | Resistência média (MPa)            | 3,41   | 3,93      | 3,98      | 4,00    |
|              | Desvio Padrão (MPa)                | 0,19   | 0,23      | 0,38      | 0,39    |
|              | Coeficiente de variação (%)        | 5,46   | 5,85      | 9,55      | 9,75    |
|              | Diferença em relação ao CAAREF (%) | -      | 15,25     | 16,71     | 17,30   |
| 28           | Resistência média (MPa)            | 4,24   | 4,57      | 4,67      | 4,33    |
|              | Desvio Padrão (MPa)                | 0,34   | 0,42      | 0,38      | 0,19    |
|              | Coeficiente de variação (%)        | 8,02   | 9,19      | 8,14      | 4,39    |
|              | Diferença em relação ao CAAREF (%) | -      | 7,78      | 10,14     | 2,12    |
| 56           | Resistência média (MPa)            | 4,93   | 5,01      | 5,08      | 5,32    |
|              | Desvio Padrão (MPa)                | 0,16   | 0,17      | 0,27      | 0,21    |
|              | Coeficiente de variação (%)        | 3,34   | 3,39      | 5,31      | 3,95    |
|              | Diferença em relação ao CAAREF (%) | -      | 1,62      | 3,04      | 7,91    |

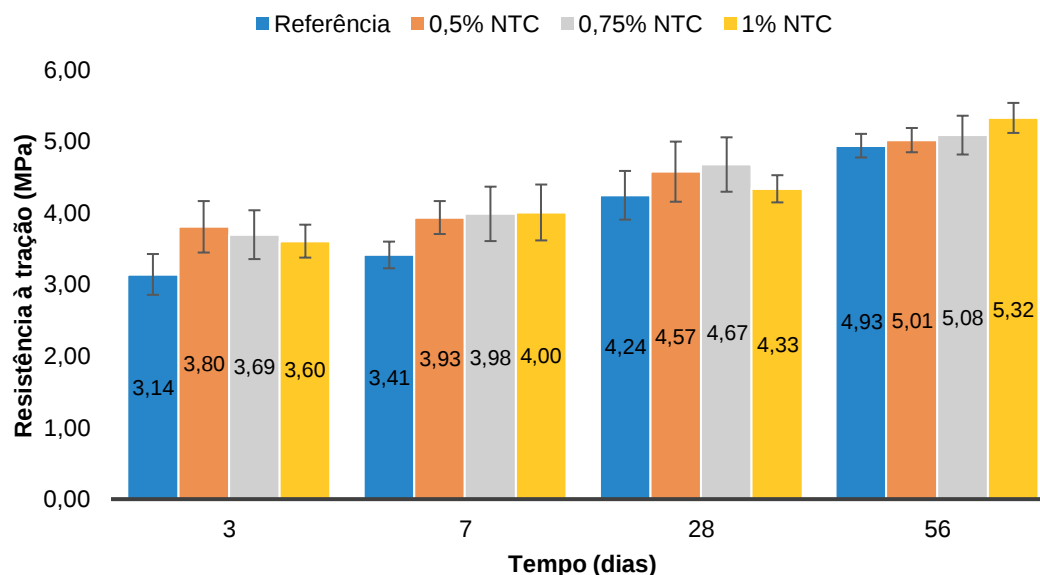


Figura 4.9 – Resultados de resistência à tração por idade.

Tabela 4.7 - Resumo do teste t-Student para resistência à tração por idade

| Idade (dias) | CAAREF x CAANTC050 | CAAREF x CAANTC075 | CAAREF x CAANTC1 |
|--------------|--------------------|--------------------|------------------|
| 3            | CAAREF < CAANTC050 | CAAREF < CAANTC075 | CAAREF < CAANTC1 |
| 7            | CAAREF < CAANTC050 | CAAREF = CAANTC075 | CAAREF = CAANTC1 |
| 28           | CAAREF = CAANTC050 | CAAREF = CAANTC075 | CAAREF = CAANTC1 |
| 56           | CAAREF = CAANTC050 | CAAREF = CAANTC075 | CAAREF = CAANTC1 |

A avaliação dos resultados do concreto autoadensável indica que houve ganhos significativos nas resistências à tração, aos 3 dias, para todos os concretos nanoestruturados em relação aos concretos de referência (CAAREF), sem NTC. Esse aumento de resistência foi de 21,02 % para o CAANTC050 com traço 0,5 % de NTC, de 17,52 % para o CAANTC075 com 0,75 % de NTC e de 14,65 % para o CAANTC1 contendo 1 % de NTC. Nota-se que, nessa idade, com o aumento no teor de NTC, observa-se uma tendência de redução na porcentagem dos ganhos de resistência à tração.

Na idade de 7 dias, apenas o CAANTC050 com 0,5 % de NTC apresentou ganhos significativos de resistência à tração: 15,25 % em relação ao concreto de referência, CAAREF.

Aos 28 e 56 dias, independente do teor de NTC, não houve diferenças significativas nas resistências à tração dos concretos nanoestruturados em relação ao concreto de referência.

O resumo dos resultados de resistência à tração por compressão diametral dos concretos autoadensável nanoestruturados encontrados por Borges (2019), em sua pesquisa, estão apresentados na Tabela 4.8. Seus resultados foram comparados ao CAAREF apresentado no presente estudo e seus valores estão evidenciados na Tabela 4.6. Borges (2019) avaliou os teores de 0,15 e 0,30 % de NTC, nas idades de 3, 7 e 28 dias, não considerando a idade de 56 dias.

Tabela 4.8 - Resumo dos resultados de Borges (2019), para resistência à tração.

| Idade (dias) | Parâmetros                         | CAANTC015 | CAANTC030 |
|--------------|------------------------------------|-----------|-----------|
| 3            | Resistência média (MPa)            | 3,51      | 3,74      |
|              | Desvio Padrão (MPa)                | 0,47      | 0,40      |
|              | Coeficiente de variação (%)        | 13,39     | 10,62     |
|              | Diferença em relação ao CAAREF (%) | 2,63      | 9,36      |
| 7            | Resistência média (MPa)            | 3,76      | 4,17      |
|              | Desvio Padrão (MPa)                | 0,27      | 0,43      |
|              | Coeficiente de variação (%)        | 7,11      | 10,20     |
|              | Diferença em relação ao CAAREF (%) | 3,87      | 15,19     |
| 28           | Resistência média (MPa)            | 4,50      | 5,16      |
|              | Desvio Padrão (MPa)                | 0,28      | 0,91      |
|              | Coeficiente de variação (%)        | 6,22      | 17,74     |
|              | Diferença em relação ao CAAREF (%) | 0,22      | 21,70     |

No gráfico da Figura 4.10 são apresentados os resultados de resistência à compressão encontrados por Borges (2019), em conjunto com os resultados das resistências à compressão encontrados neste estudo.

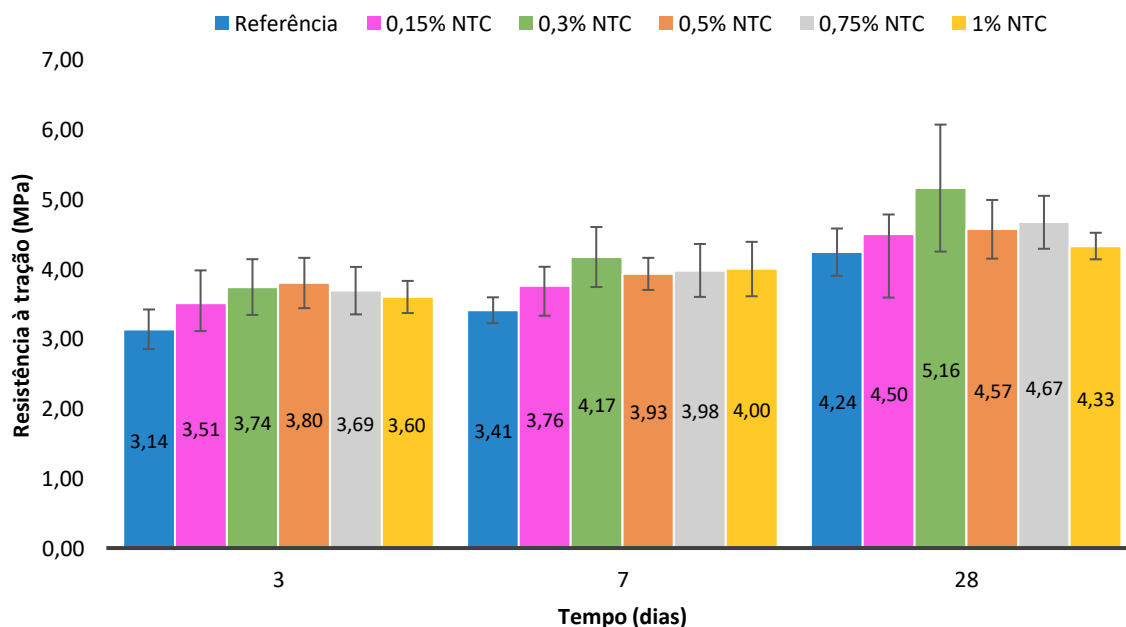


Figura 4.10 – Resultados de resistência à tração por idade, incluindo os resultados de Borges (2019).

As análises estatísticas, incluindo os resultados de Borges (2019), realizadas com o teste *t-Student*, com um nível de confiança de 95 %, estão apresentadas resumidamente na Tabela 4.9 e mais detalhadamente no Apêndice B.

*Tabela 4.9 - Resumo do teste t-Student para resistência à tração por idade, incluindo os resultados de Borges (2019)*

| Idade (dias) | REF x NTC015 | REF x NTC030 | REF x NTC050 | REF x NTC075 | REF x NTC1 |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------|
| 3            | REF = NTC015 | REF = NTC030 | REF < NTC050 | REF < NTC075 | REF < NTC1 |
| 7            | REF = NTC015 | REF < NTC030 | REF < NTC050 | REF = NTC075 | REF = NTC1 |
| 28           | REF = NTC015 | REF = NTC030 | REF = NTC050 | REF = NTC075 | REF = NTC1 |

A avaliação dos resultados dos CAA realizada com o teste *t-Student* revela que:

1. Aos 3 dias, houve aumento de resistência à tração de 21,02 % para o CAANTC050 com traço 0,5 % de NTC, de 17,52 % para o CAANTC075 com 0,75 % de NTC e de 14,65 % para o CAANTC1 contendo 1 % de NTC. Nota-se que, nessa idade, com o aumento no teor de NTC, observa-se uma tendência de redução na porcentagem dos ganhos de resistência à tração.
2. Aos 7 dias, os concretos CAANTC030 e CAANTC050 apresentaram diferenças significativas em relação ao concreto de referência, sem NTC, sendo 22,3 e 15,4 %, respectivamente. Nessa idade, é observado, também, que há uma tendência de redução na porcentagem dos ganhos de resistência à tração, na medida que o teor de NTC aumenta.
3. Aos 28 dias, os CAA não apresentaram diferenças significativas na resistência à tração por compressão diametral, em relação ao CAAREF.

Analizando todos os resultados, o CAANTC050 foi o que apresentou comportamento diferenciado com ganhos mais significativos de resistência à tração por compressão, em relação ao concreto de referência sem NTC. Esse resultado mostra um comportamento diferente do encontrado com relação a resistência à compressão, onde o CAANTC030 teve melhor desempenho. Esses comportamentos diferenciados indicam a necessidade de mais estudos para avaliar teor ótimo de NTC sintetizados sobre o clínquer.

### 4.2.3 Relação tensão versus deformação na compressão

O diagrama tensão versus deformação é representado traçando os resultados médios das deformações medidas no eixo das abscissas e as tensões correspondentes no eixo das ordenadas (tensões de  $0,2*f_c$ ,  $0,3*f_c$ ,  $0,4*f_c$ ,  $0,5*f_c$ ,  $0,6*f_c$ ,  $0,7*f_c$  e  $0,8*f_c$ ). Os diagramas tensão versus deformação referentes aos CAA estudados, incluindo os resultados encontrados por Borges (2019), em sua pesquisa, se encontram nas Figuras 4.11 a 4.13, correspondendo, respectivamente, as idades de 3, 7, 28 dias. Borges (2019) avaliou a relação tensão versus deformação na compressão de CAA contendo 0,15 e 0,30 % de NTC, nas idades de 3, 7 e 28 dias. O diagrama da Figura 4.14 mostra somente a relação tensão versus deformação, na idade de 56 dias, dos concretos CAANTC050, CAANTC075, CAANTC1, além do CAAREF, sem NTC.

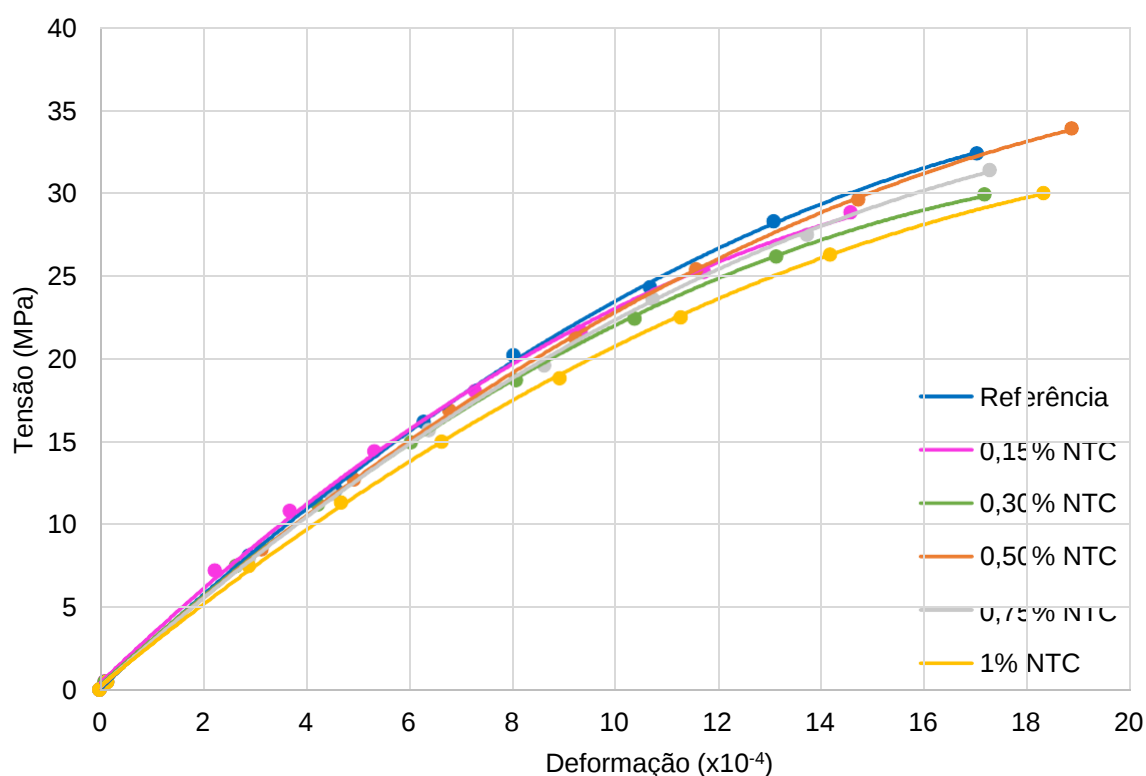


Figura 4.11 – Diagrama tensão versus deformação dos CAA aos 3 dias.

Os resultados da relação tensão versus deformação na idade de 3 dias apresentados na Figura 4.11 revelam praticamente uma igualdade no comportamento para valores de tensão de até 15 MPa. Acima dessa tensão há uma tendência de aumento da capacidade de deformação nos concretos nanoestruturados quando comparados ao concreto de referência, sem NTC. A exceção foi o concreto CAANTC015. O concreto CAANTC1 que continha o maior teor de NTC apresentou para tensões mais elevadas maior capacidade de se deformar quando comparado aos demais concretos.

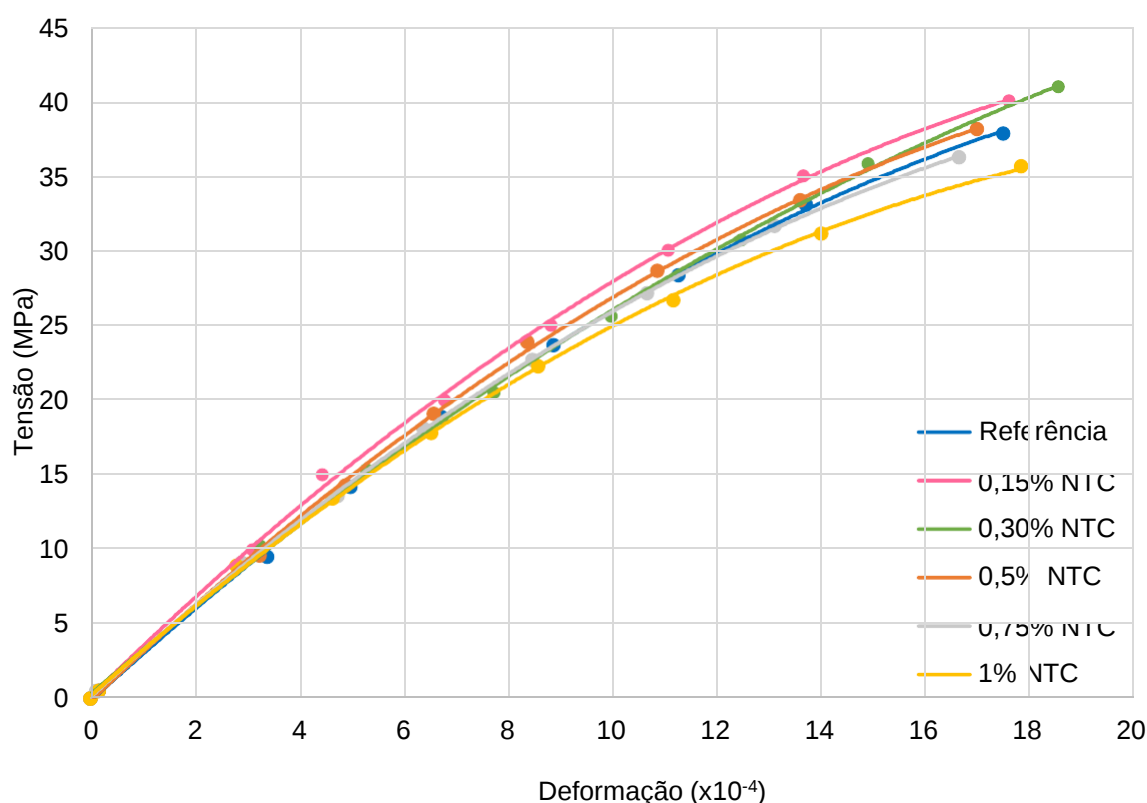


Figura 4.12 – Diagrama tensão versus deformação dos CAA aos 7 dias.

Como na idade de 3 dias, os resultados da relação tensão versus deformação na idade de 7 dias (Figura 4.12) revelam praticamente uma igualdade no comportamento para valores menores de tensão (até 20 MPa). Para tensões maiores, observa-se que os CAA nanoestruturados CAANTC075 e CAANTC1 para uma mesma tensão aplicada uma maior capacidade de deformação quando comparados ao concreto de referência, sem NTC. Vale enfatizar que o CAANTC1 se afastou ainda mais da curva do CAAREF, se comparado ao

CAANT075, o que significa que sua capacidade em se deformar é ainda maior. O concreto que apresentou menor capacidade de deformação, para uma mesma tensão aplicada, foi o CAANTC015, que continha 0,15 % de NTC, o menor teor analisado. Os concretos CAANTC030 e CAANTC050 apresentaram comportamentos semelhantes entre si e ao concreto de referência sem NTC.

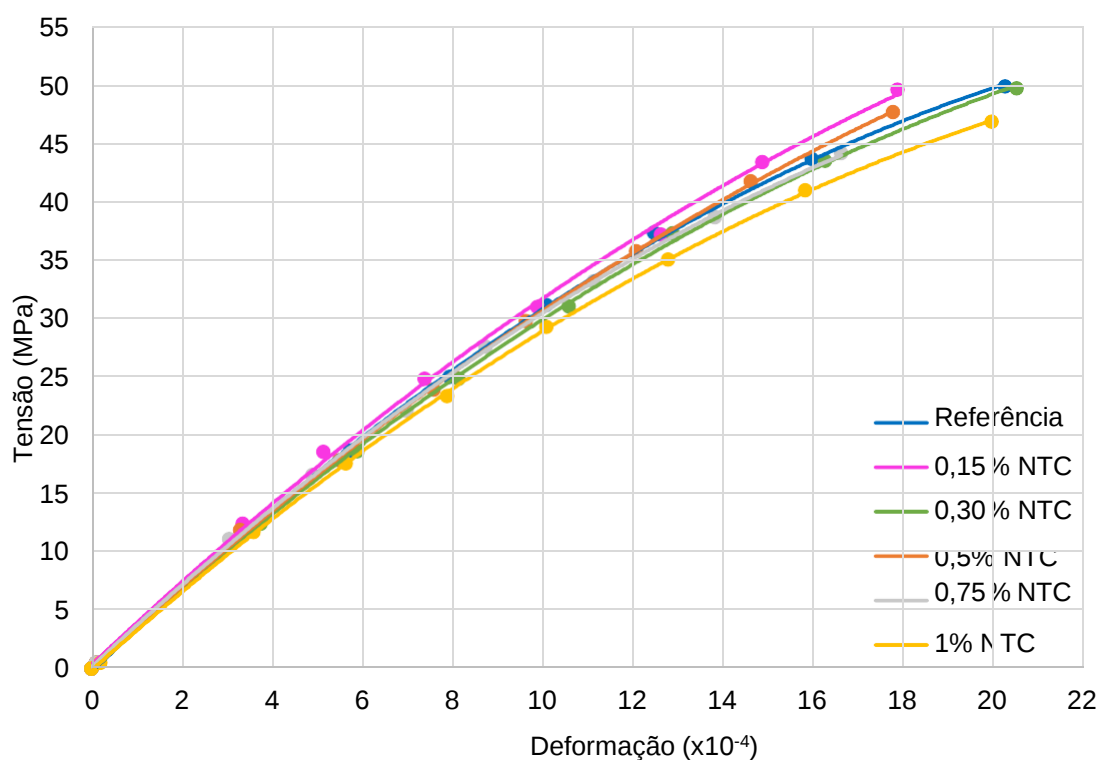


Figura 4.13 – Diagrama tensão versus deformação dos CAA aos 28 dias.

Da mesma forma que nas idades de 3 e 7 dias, aos 28 dias, a relação tensão versus deformação de todos os CAA avaliados foi praticamente igual para tensões de até 30 MPa. Para tensões mais elevadas (acima de 40 MPa), o CAANTC1 foi o concreto que apresentou maior capacidade em se deformar, para uma mesma tensão aplicada. O concreto que apresentou menor capacidade de deformação, para uma mesma tensão aplicada, foi o CAANTC015. Os demais concretos nanoestruturados apresentaram comportamento similar ao concreto de referência, sem NTC.

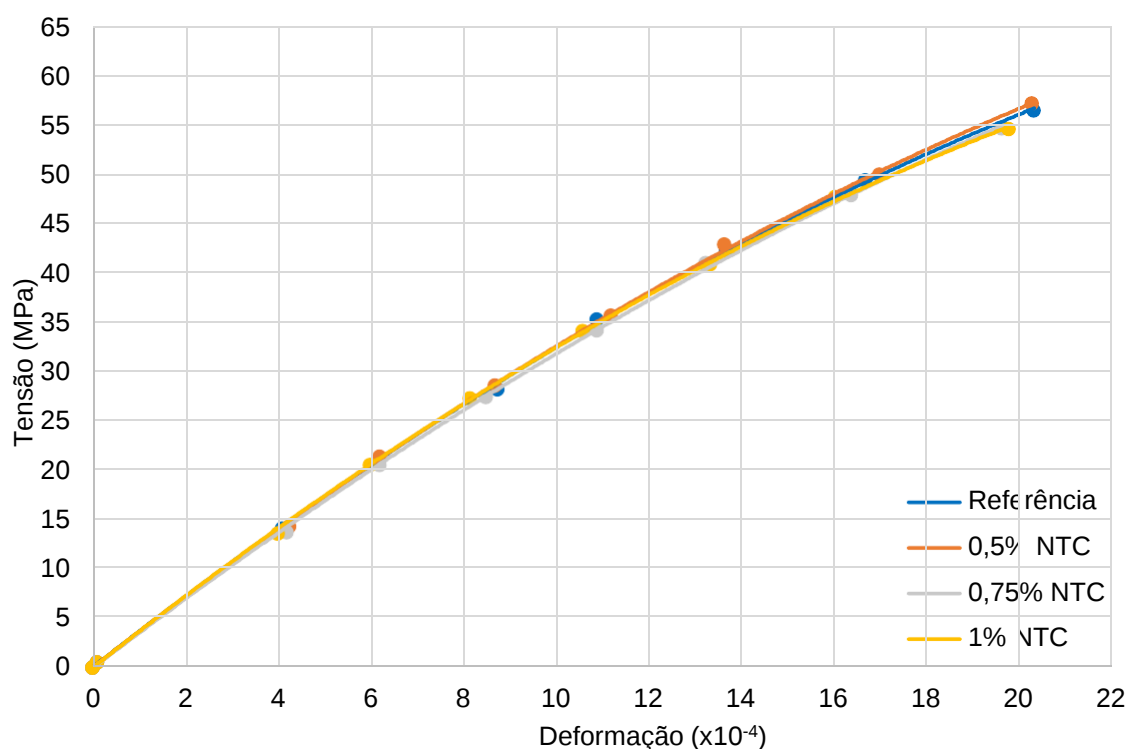


Figura 4.14 – Diagrama tensão versus deformação dos CAA aos 56 dias.

Aos 56 dias, observa-se (Figura 4.14) que, para todo o diagrama tensão versus deformação, todos os concretos nanoestruturados apresentam comportamentos praticamente iguais entre si bem como em relação ao concreto de referência, sem NTC.

#### 4.2.4 Módulo de elasticidade tangente inicial

Para simular uma estrutura em uso, o método estático que determina o módulo de deformação tangente inicial, preconizado pela ABNT NBR 8522:2017, utiliza carregamentos e descarregamentos prévios no corpo de prova, sendo o módulo de elasticidade calculado a partir da inclinação de reta tangente imaginária, traçada paralela à reta secante construída com dados da curva tensão versus deformação, obtida no ensaio. Para determinação dos módulos de elasticidade, foram ensaiados 3 corpos de prova para cada traço (CAAREF, CAANTC050, CAANTC075 e CAANTC1), em cada idade (3, 7, 28 e 56 dias).

O resumo dos resultados do módulo de elasticidade está representado na Tabela 4.10 e no gráfico da Figura 4.15. Os resultados obtidos estão apresentados no Apêndice A. Já as análises estatísticas realizadas com o teste *t-Student*, com um nível de confiança de 95 %, estão apresentadas resumidamente na Tabela 4.11 e mais detalhadamente no Apêndice B.

*Tabela 4.10 – Resumo de módulo de elasticidade do concreto por idade*

| Idade (dias) | Parâmetros                         | CAAREF | CAANTC050 | CAANTC075 | CAANTC1 |
|--------------|------------------------------------|--------|-----------|-----------|---------|
| 3            | Módulo de elasticidade médio (GPa) | 26,09  | 25,51     | 25,43     | 24,47   |
|              | Desvio Padrão (MPa)                | 0,57   | 0,41      | 1,22      | 0,85    |
|              | Coeficiente de variação (%)        | 2,19   | 1,61      | 4,80      | 3,47    |
|              | Diferença em relação ao CAAREF (%) | -      | -2,22     | -2,53     | -6,21   |
| 7            | Módulo de elasticidade médio (GPa) | 28,25  | 28,47     | 28,17     | 28,56   |
|              | Desvio Padrão (MPa)                | 0,31   | 0,77      | 0,31      | 1,31    |
|              | Coeficiente de variação (%)        | 1,08   | 2,70      | 0,35      | 0,63    |
|              | Diferença em relação ao CAAREF (%) | -      | 0,78      | -0,28     | 1,1     |
| 28           | Módulo de elasticidade médio (GPa) | 32,97  | 32,52     | 33,54     | 31,28   |
|              | Desvio Padrão (MPa)                | 0,43   | 0,31      | 0,35      | 0,17    |
|              | Coeficiente de variação (%)        | 1,30   | 0,95      | 1,04      | 4,49    |
|              | Diferença em relação ao CAAREF (%) | -      | -1,36     | 1,73      | -5,13   |
| 56           | Módulo de elasticidade médio (GPa) | 33,93  | 33,65     | 33,66     | 33,90   |
|              | Desvio Padrão (MPa)                | 0,04   | 1,31      | 1,51      | 0,04    |
|              | Coeficiente de variação (%)        | 0,12   | 3,89      | 4,49      | 0,12    |
|              | Diferença em relação ao CAAREF (%) | -      | -0,82     | -0,80     | -0,09   |

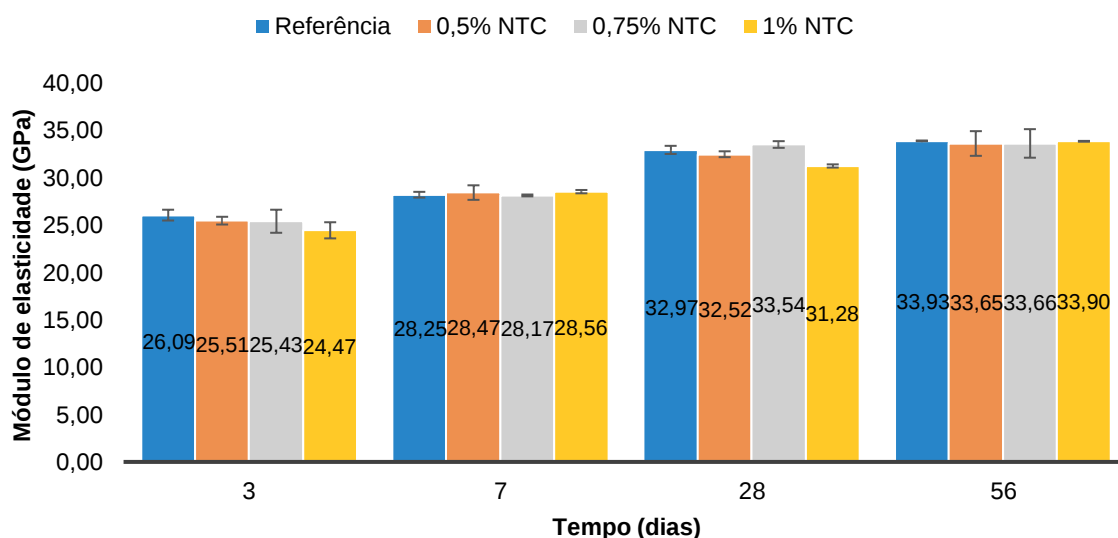


Figura 4.15 – Resultados de módulo de elasticidade por idade.

Tabela 4.11 - Resumo do teste t-Student para módulo de elasticidade por idade

| Idade (dias) | CAAREF x CAANTC050 | CAAREF x CAANTC075 | CAAREF x CAANTC1 |
|--------------|--------------------|--------------------|------------------|
| 3            | CAAREF = CAANTC050 | CAAREF = CAANTC075 | CAAREF = CAANTC1 |
| 7            | CAAREF = CAANTC050 | CAAREF = CAANTC075 | CAAREF = CAANTC1 |
| 28           | CAAREF = CAANTC050 | CAAREF = CAANTC075 | CAAREF > CAANTC1 |
| 56           | CAAREF = CAANTC050 | CAAREF = CAANTC075 | CAAREF = CAANTC1 |

A avaliação dos resultados do concreto autoadensável indica que, independentemente do teor de NTC, não houve diferença significativa dos módulos de elasticidade tangente inicial dos CAA nanoestruturados em relação ao CAA de referência. A única exceção foi na idade de 28 dias na qual oCAANTC1 apresentou redução de 5,13% no módulo de elasticidade tangente inicial em relação ao CAAREF.

O resumo dos resultados de módulo de elasticidade tangente inicial dos concretos autoadensável nanoestruturados encontrados por Borges (2019), em sua pesquisa, estão apresentados na Tabela 4.12. Seus resultados foram comparados ao CAAREF apresentado no presente estudo e seus valores estão evidenciados na Tabela 4.10. Borges (2019) avaliou os teores de 0,15 % e 0,30 % de NTC, nas idades de 3, 7 e 28 dias, não considerando a idade de 56 dias.

Tabela 4.12 - Resumo dos resultados de Borges (2019), para módulo de elasticidade

| Idade (dias) | Parâmetros                         | CAANTC015 | CAANTC030 |
|--------------|------------------------------------|-----------|-----------|
| 3            | Módulo de elasticidade médio (GPa) | 27,06     | 25,11     |
|              | Desvio Padrão (MPa)                | 0,78      | 0,17      |
|              | Coeficiente de variação (%)        | 2,88      | 0,68      |
|              | Diferença em relação ao CAAREF (%) | 1,50      | -5,81     |
| 7            | Módulo de elasticidade médio (GPa) | 30,92     | 27,59     |
|              | Desvio Padrão (MPa)                | 1,38      | 1,41      |
|              | Coeficiente de variação (%)        | 4,45      | 5,11      |
|              | Diferença em relação ao CAAREF (%) | 11,28     | -0,71     |
| 28           | Módulo de elasticidade médio (GPa) | 34,66     | 30,93     |
|              | Desvio Padrão (MPa)                | 0,39      | 0,98      |
|              | Coeficiente de variação (%)        | 1,13      | 3,17      |
|              | Diferença em relação ao CAAREF (%) | 6,62      | -4,85     |

No gráfico da Figura 4.16 são apresentados os resultados de módulo de elasticidade tangente inicial encontrados por Borges (2019), em conjunto com os resultados de módulo encontrados neste estudo.

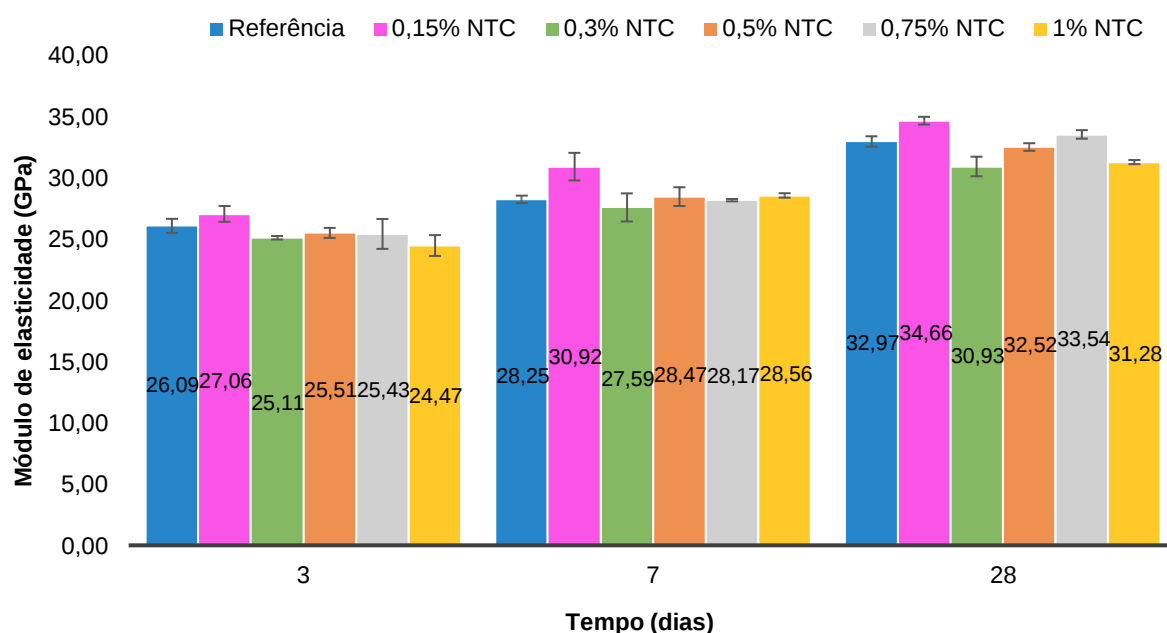


Figura 4.16 – Resultados de módulo de elasticidade por idade, incluindo os resultados de Borges (2019).

As análises estatísticas, incluindo os resultados de Borges (2019), realizadas com o teste *t-Student*, com um nível de confiança de 95 %, estão apresentadas resumidamente na Tabela 4.13 e mais detalhadamente no Apêndice B.

Tabela 4.13 - Resumo do teste t-Student para módulo de elasticidade por idade

| Idade (dias) | REF x NTC015 | REF x NTC030 | REF x NTC050 | REF x NTC075 | REF x NTC1 |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------|
| 3            | REF = NTC015 | REF = NTC030 | REF = NTC050 | REF = NTC075 | REF = NTC1 |
| 7            | REF = NTC015 | REF = NTC030 | REF = NTC050 | REF = NTC075 | REF = NTC1 |
| 28           | REF < NTC015 | REF = NTC030 | REF = NTC050 | REF = NTC075 | REF > NTC1 |

Independentemente da idade, os CAA nanoestruturados não apresentaram diferenças significativas nos valores de módulo de elasticidade tangente inicial, quando comparados aos concretos de referência, sem a presença de nanotubos de carbono. Este fato já era esperado em função dos resultados da relação tensão versus deformação que mostrou comportamento praticamente igual para todos os CAA avaliados para níveis baixos de tensão aplicada.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Nos estudos encontrados na bibliografia, utilizando nanotubos de carbono (NTC) nos concretos, pode ser observado que teores altos de NTC não são comumente adotados, principalmente quando se utiliza nanotubos de carbono em mistura física. Apesar disso, os resultados apresentados por Borges (2019) foram o que impulsionaram o presente estudo na utilização de maiores teores de NTC no concreto autoadensável (CAA). O uso do clínquer nanoestruturado ao invés dos nanotubos de carbono em mistura física pode possibilitar o aumento dos teores de NTC.

Vale salientar, que durante a produção dos CAA, não houve impasse por parte da equipe da central de concreto na utilização do clínquer nanoestruturado. A substituição de parte do cimento utilizado no traço, pelo clínquer com NTC, não alterou a dinâmica de produção dos concretos, não apresentando dificuldade no manuseio do material.

Com relação aos resultados encontrados nos ensaios do concreto autoadensável no estado fresco, especificamente no ensaio de espalhamento, do traço com 0,5 % de NTC para o traço com 1 % de NTC, houve diminuição do espalhamento, sugerindo uma perda de trabalhabilidade na medida que o teor de NTC aumenta. Após os 15 minutos de espera (perda de 15 minutos), todos os traços nanoestruturados apresentaram perda de trabalhabilidade, em relação ao concreto de referência, sem NTC.

Sobre o tempo de escoamento, todos os traços nanoestruturados pertenceram a classe de viscosidade plástica aparente VS 2, antes e depois do tempo de espera de 15 minutos, assim como o concreto de referência, sem NTC. Esse resultado revela que talvez esse ensaio não seja o mais indicado para uma avaliação mais criteriosa a respeito do comportamento dos concretos nanoestruturados com diferentes teores de NTC, diferente do que acontece no ensaio de espalhamento.

Os resultados do ensaio com o Anel *J* revelaram que a presença nos NTC não promoveu diferenças no comportamento: em todos os casos, os CAA nanoestruturados avaliados continuaram pertencendo à classe de habilidade passante PJ 1, bem como o concreto de referência sem NTC. Avaliando ainda, de forma visual, não houve obstrução à passagem do concreto pelas barras do anel *J* e nem indícios de segregação, o que indicou que a presença de nanotubos de carbono não interferiu na habilidade passante do material.

Com relação aos resultados encontrados nos ensaios de resistência à compressão dos CAA contendo NTC observou-se que a medida que os teores de nanotubos de carbono foram aumentando, houve uma tendência de diminuição das resistências à compressão. Fazendo uma análise de todos os teores incluindo os resultados de resistência à compressão apresentados por Borges (2019), que utilizou menores porcentagens de NTC, observa-se um melhor desempenho nos concretos CAANTC030 e CAANTC050, contendo respectivamente 0,3 e 0,5 % de NTC em relação à massa de cimento. Estes foram os únicos concretos que não apresentaram redução nas resistências à compressão, em relação ao concreto de referência CAAREF. Além disso, o CAANTC030 foi o concreto que apresentou o maior ganho de resistência à compressão, de 12 % em relação ao concreto de referência, sem NTC, sendo esse ganho observado na idade de 7 dias.

Com relação aos resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, incluindo os obtidos por Borges (2019) que utilizou menores porcentagens de NTC, observou-se também um melhor desempenho nos concretos CAANTC030 e CAANTC050, que apresentaram os maiores ganhos de resistência à tração, em relação ao CAAREF. Para a resistência à tração notou-se também uma tendência de redução de ganhos de resistência na medida que os teores de NTC em relação à massa de cimento aumentaram acima de 0,5 %.

Com relação à curva tensão versus deformação na compressão de todos os CAA nanoestruturados incluindo os investigados por Borges (2019) pode-se dizer que não houve diferença de comportamento para os níveis menores de

tensão em todas as idades avaliadas. Para níveis mais elevados de tensão, o CAANTC1, contendo 1 % de NTC em relação à massa de cimento, apresentou uma maior capacidade de deformação em relação aos demais concretos.

Os resultados da análise do módulo de elasticidade tangente inicial mostraram que não houve alteração significativa dos valores encontrados nos concretos nanoestruturados em relação ao concreto de referência sem NTC. Os diagramas tensão versus deformação de cada concreto avaliado apresentaram comportamentos semelhantes na fase inicial, entre 0,5 MPa e 30% de  $f_c$ , para todas as idades, o que justifica esse resultado.

De acordo com os resultados apresentados, pode-se dizer que um possível teor ótimo de NTC a ser adicionado ao concreto autoadensável para que o mesmo alcance seu melhor desempenho, esteja entre os teores de 0,30 e 0,50 % de NTC. Foram esses os teores que proporcionaram o melhor desempenho dos CAA avaliados. Os resultados apresentados nesta pesquisa revelam também que teores acima de 0,5 % de NTC não trouxeram ganhos significativos de desempenho aos concretos autoadensável avaliados.

Estudos como este, sobre o efeito da utilização de nanotubos de carbono em concretos, ainda são relativamente recentes. Resultados de outras pesquisas feitas em diversas partes do mundo relatam que há muito para ser pesquisado e desenvolvido no que diz respeito ao uso desse material em concretos, qual a forma mais eficiente de utilizá-lo, quais parâmetros devem ser avaliados e estudados para que se atinja o seu máximo potencial.

Não restam dúvidas que a nanotecnologia chegou para possibilitar que os materiais de construção civil atinjam seu melhor desempenho. O emprego cada vez maior desses nanomateriais em concretos tem como finalidade promover melhorias no desempenho mecânico e na durabilidade, assim como redução no consumo de insumos, além de terem seus custos adequados ao mercado da construção. No caso dos nanotubos de carbono, esse último fator chama a atenção, pois o preço dos NTC está ficando cada vez menor.

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

- Verificar o comportamento mecânico de concretos produzidos com nanotubos de carbono sintetizados diretamente sobre o clínquer utilizando teores entre 0,30 e 0,50 % de NTC;
- Estudar o comportamento de concretos com NTC sintetizados diretamente sobre o clínquer no tocante à carbonatação e à penetração dos íons cloretos;
- Realizar estudos de porosidade, de permeabilidade 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;
- Considerar a consistência do concreto fixa e ajustar os teores dos aditivos;
- Considerar a utilização de outros aditivos.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AİTCIN, P.; FLATT, R. J. **Science and Technology of Concrete Admixtures**, Edited by. Cambridge: Woodhead, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard terminology relating to concrete and concrete aggregates**. ASTM C125 – 15a. West Conshohoken, PA, USA, 2015.

ASLANI, F.; NEJADI, S. Mechanical Properties of Conventional and Self-Compacting Concrete: an analytical study. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 330-347, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.034>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). Cimento: diferentes tipos e aplicações. 2018. Disponível em: <https://abcp.org.br/imprensa/artigos/cimento-diferentes-tipos-e-aplicacoes/>. Acesso em: 19 de maio de 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – Procedimentos para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2019.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-1**: Concreto autoadensável – Classificação, controle e aceitação no estado fresco. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-3**: Concreto autoadensável – Determinação da habilidade passante – Método do Anel J. Rio de Janeiro, 2017.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 33**: Concreto – Amostragem de concreto fresco. Rio de Janeiro, 1998.

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

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção - Novos Materiais para a Construção Civil**. 5°. ed. Rio de Janeiro: LTC, v. 1, 2013. 488 p.

BONEN D.; SHAH S. P. Fresh and hardened properties of self-consolidating concrete. Progress in Structural Engineering and Materials. V7, 14-26, 2004.

BORGES, L. A. **Desempenho de concretos produzidos com nanotubos de carbono sintetizados diretamente sobre o clínquer**. 2019. 152f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

BHUSHAN, B. **Handbook of Nanotechnology**. 2°. ed. New York: Springer, v. I, 2007. 1875 p.

BUTTON, S. T., **Metodologia para planejamento experimental e análise de resultados**. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas. Apostila. 2012.

CAMPITELI, V.C. **Concreto de Cimento Portland: Um Método de Dosagem**. Revista Engenharia Civil UM, nº 20, 2004.

CAPAZ, R.B.; CHANCHAM, H. Nanotubos e a Nova Era do Carbono. **Ciência Hoje**, v. 33, p.198, 2003.

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, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.221>.

CASCUDO, O.; CARASEK, H. **Durabilidade do Concreto: Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente**. Tradução de Oswaldo Cascudo e Helena Carasek. 1º. ed. São Paulo: IBRACON, v. I, 2014. 615 p.

COUTO, G. G. **Nano partículas de níquel: síntese, caracterização, propriedades e estudo de sua utilização como catalisadores na obtenção de nano tubos de carbono**. 2006. 127f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

DACZKO, J. A. **Self-consolidating concrete: applying what we know**. Nova Iorque: Spon Press, 2012.

DOMONE, P. L. A review of the hardened mechanical properties of self- compacting concrete. **Cement & Concrete Composites**. v. 29, n. 1, p. 1-12, 2007, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.07.010>

DRESSELHAUS, G.; DRESSELHAUS, M.S.; JORIO, A. Unusual properties and structure of carbon nanotubes. **Annual Review of Materials Research**, v. 34, p.247, 2004, <https://doi.org/10.1146/annurev.matsci.34.040203.114607>.

EFNARC. **Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete**. EFNARC 2002. Disponível em: <http://www.efnarc.org/pdf/SandGforSCC.PDF>. Acesso em: 19 de maio de 2020.

FARIAS, M. M.; PALMEIRA, E. M. Agregados para a construção civil, em Isaia, Geraldo C. (Ed.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, v. 1. cap. 3, p. 481-524, 2007.

FERNANDES, F. M. **Síntese de nanotubos de carbono orientados e aplicação na produção de pontas de AFM**. 2008. 76f. Dissertação de Mestrado - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

FIGUEIREDO, M. C. **Avaliação do uso de fíler de resíduo de construção e demolição na produção de concreto autoadensável**. 2019. 163f. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Feira de Santana, Bahia, 2019.

GIL, A. M. **Contribuição ao estudo de dosagem de concretos autoadensáveis reforçados com fibras metálicas**. 2018. 144f. Dissertação de Mestrado – Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, São Leopoldo, RS, 2018.

GLEIZE, P. J. P., Nanotecnologia e materiais de construção. em Isaia, Geraldo C. (Ed.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, v. 2. cap. 50, p. 1659-1685, 2007.

GOMES, P. C. C.; BARROS, A. R. **Métodos de dosagem de concreto autoadensável**. 1a ed. São Paulo: Editora PINI, 2009. 165 p.

GOMES, P. C. C.; GETTU, R.; AGULLÓ, L. Uma nova metodologia para obtenção de concreto autoadensável de alta resistência com aditivos minerais. Em: V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, 2003, São Paulo.

GOMES, P.C.C. **Optimization and characterization of high-strength self-compacting concrete**. 2002. 139p. Tese - Escola Técnica Superior D'Enginyers de Camins, Universitat Politècnica de Catalunya, Catalunya, 2002.

GOODIER, C.I., Development of self-compacting concrete, **Proceedings of the ICE-Structures and Buildings**, 156 (4), 2003, <https://doi.org/10.1680/stbu.2003.156.4.405>.

GROTH, P.; NEMEGER, D. The use of steel fibers in self-compacting concrete. In: First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (Stockholm, Sweden), A. Skarendahl and Ö. Petersson (editors), RILEM Publications S.A.R.L, pp. 497- 508, 1999.

GUIMARÃES, A. T. C.; Propriedades do concreto fresco em Isaia, Geraldo C. (Ed.). **Concreto Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: IBRACON, v.1, capítulo 16, p. 473-494, 2005.

HAWREEN, A. ; BOGAS, J. A., Creep, shrinkage and mechanical properties of concrete reinforced with different types of carbon nanotubes. **Construction and Building Materials**. Nº 198, p. 70-81, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.253>.

HELENE, P.R.L.; TERZIAN, P. Manual de dosagem e controle do concreto. PINI. São Paulo, 1992.

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

IJIMA, S.; BRABEC, C.; MAITI, A.; BERNHOLC, J.; Structural flexibility of carbon nanotubes, **Journal of Chemical Physics**., vol 104, Nº. 5. 1996. <https://doi.org/10.1063/1.470966>.

KHAYAT, K. H.; ASSAAD, J.; DACZKO, J. Comparison of field-oriented test methods to assess dynamic stability of self-consolidating concrete. **ACI Materials Journal**, v. 101, n. 2, p. 168-176, 2004.

KOWALD, T. Influence of surface-modified carbon nanotubes on ultra-high performance concrete. Proceedings of International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany, pp. 195–202, 2005.

KWAN, A. K. H.; MORA, C. F. Effects of various shape parameters on packing of aggregates particles. **Magazine of Concrete Research**, v. 53, n. 2, p. 91-100, 2001, <https://doi.org/10.1680/mac.2001.53.2.91>.

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**. WO2009132407 A2, 05 nov 2009. PCT/BR2009/000119.

LI, G. Y.; WANG, P. M.; ZHAO, X. Mechanical behavior and microstructure of cement composites incorporating surface-treated multi-walled carbon nanotubes. **Carbon**, v. 43, p. 1239-1245, 2004, <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbon.2004.12.017>.

LISBÔA, E.M. **Obtenção do concreto autoadensável utilizando resíduo do beneficiamento do mármore e granito e estudo de propriedades mecânicas.** 2004. 65f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2004.

LUDVIG, P. **Synthesis and Characterization of Portland Cement Manufactured with Carbon Nanotubes.** 2012. 199f. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

MARANGON, E. **Desenvolvimento e caracterização de concretos autoadensáveis reforçados com fibras de aço.** 2006. 142 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2006.

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.

MATOS; C. F. de. **Materiais Nanocompósitos Multifuncionais Formados entre Nanotubos De Carbono e Látices Poliméricos.** 2011. 127f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, 2011.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais.** 2ªed. São Paulo: IBRACON, v. I, 2014. 782 p., 2014.

MELO, K. A. **Contribuição à dosagem de concreto autoadensável com adição de fíler de calcário.** 2005. 184f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

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

MONTE, R. **Avaliação de métodos de ensaio de fluidez em pastas de cimento com aditivos superplastificantes.** Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, p. 13, 2008.

MORAIS, J. F. **Aplicação da nanotecnologia na indústria da construção: Análise experimental em produtos cimentícios com nanotubos de carbono.** 2012. 187f. Tese de Doutorado - Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2012.

MORAES, K. A. M. **Otimização do uso de adições minerais para a produção de concreto autoadensável.** 2010. 225f. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.

MORSY, M. S.; ALSAYED, S. H.; AQEL, M. Hybrid effect of carbon nanotube and nano-clay on physico-mechanical properties of cement mortar. **Construction and Building Materials**, n. 25, p. 145-149, 2011, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.046>.

MOSHKALYOV, S. A.; MOREAU, A. L. D.; GUTTIÉRREZ, H. R.; COTTA, M. A.; SWART, J. W. Carbon nanotubes growth by chemical vapor deposition using thin film nickel catalyst. **Materials Science & Engineering**, B. v. 112, p. 147-153, 2004.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto.** 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

OKAMURA, H. OUCHI, M. Self-compacting concrete. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 1, n.1, p. 5-15, 2003.

OLIVEIRA, Ronaldo Sabino de. **Concreto Autoadensável: Solução ou modismo.** 2011. 55f. Monografia – Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2011.

RHEE I; ROH Y-S. Properties of normal-strength concrete and mortar with multi-walled carbon nanotubes. **Magazine of Concrete Research**. Volume 65, pp. 951-961, 2013, <http://dx.doi.org/10.1680/mac.12.00212>.

REPETTE, W. L. Concreto Autoadensável. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. Vol. II, Cap. 48, p 1769-1806. Ed. Geraldo C. Isaia IBRACON 2011.

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.

RODRIGUES, D.C. **Inovações tecnológicas do concreto: uma análise do cenário atual do concreto na construção civil e suas expectativas**. 2017. 52f. Monografia – Universidade Regional do Cariri – URCA, Juazeiro do Norte, CE. 2017.

SANCHEZ, F.; SOBOLEV, K. Nanotechnology in concrete - A review. **Construction and Building Materials**, 15 May 2010. 2060-2071, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.03.014>.

SANTOS, T. A. C. **Estudo da Adição de Polímero Superabsorvente e de Nano Partículas de Sílica para Melhorar as Propriedades de Concretos de Alto Desempenho**. 2016. 145f. Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2016.

SANTRA, A.; BOUL, P. J.; PANG, X. Influence of Nanomaterials in Oilwell Cement Hydration and Mechanical Properties. **SPE International**, 2012. 1-13.

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

SHEHATA, L. C. D.; COUTINHO, B. S.; SHEHATA, I. A. M., Comportamento estrutural do concreto autoadensável. **I Simpósio Latino Americano sobre Concreto Autoadensável**. Ibracon Maceió, 2012.

SIDDIQUE, R.; METHA, A. Effect of carbon nanotubes on properties of cement mortars. **Construction and Building Materials**, n. 50, p. 116-129, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.019>.

SOUZA, T.C.C. **Síntese contínua e caracterização de cimento Portland fabricando com nanotubos de carbono**. 2015. 209p. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. 2º. ed. London: Thomas Telford, v. I, 1997. 459 p.

TUTIKIAN B. F.; DAL MOLIN D. C., **Concreto autoadensável**. 1ª ed. São Paulo: Editora PINI, 2008. 140 p.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. **Concreto autoadensável**. 2ª ed. São Paulo: Editora PINI, 2015.

TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. Capítulo 12: Dosagem dos concretos de cimento Portland. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1ª Edição. Editora IBRACON. São Paulo. 2011.

YAHIA, A.; TANIMURA, M.; SHIMOYAMA, Y. Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler – effect of powder content and w/c ratio, **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 3, p. 532-539, 2005, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.008>.

YI, G.; WANG, P.; & ZHAO, X. Mechanical Behavior and Microstructure of Cement Composites Incorporating Surface-Treated Multi-Walled Carbon Nanotubes. **Carbon**, vol.43, p. 1239-1245, 2005, <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2004.12.017>.

ZERBINO, R.; BARRAGÁN, B.; AGULLÓ, L. GARCÍA, T.; GETTU, R., Reologia de hormigones autocompactables. **Ciencia y Tecnología del Hormigón**. Nº 13, 2006.

## 7 APÊNDICES

### A. Resistências mecânicas do concreto autoadensável

#### Resistência à compressão

| COMPRESSÃO - TRAÇO REFERÊNCIA - CAAREF |                                |                |                                |                |                                |                |                                |
|----------------------------------------|--------------------------------|----------------|--------------------------------|----------------|--------------------------------|----------------|--------------------------------|
| 3 dias                                 |                                | 7 dias         |                                | 28 dias        |                                | 56 dias        |                                |
| Amostra                                | Resistência à compressão (Mpa) | Amostra        | Resistência à compressão (Mpa) | Amostra        | Resistência à compressão (Mpa) | Amostra        | Resistência à compressão (Mpa) |
| 1                                      | 39,43                          | 1              | 44,22                          | 1              | 60,52                          | 1              | 71,91                          |
| 2                                      | 39,12                          | 2              | 43,95                          | 2              | 58,81                          | 2              | 70,00                          |
| 3                                      | 38,11                          | 3              | 42,49                          | 3              | 60,36                          | 3              | 71,67                          |
| 4                                      | 38,80                          | 4              | 47,80                          | 4              | 60,32                          | 4              | 74,58                          |
| 5                                      | 39,33                          | 5              | 48,72                          | 5              | 59,89                          | 5              | 72,21                          |
| 6                                      | -                              | 6              | 48,66                          | 6              | 58,62                          | 6              | 69,01                          |
| Média                                  | 38,84                          | Média          | 45,97                          | Média          | 59,75                          | Média          | 71,56                          |
| Desvio Padrão                          | 0,55                           | Desvio Padrão  | 2,73                           | Desvio Padrão  | 0,83                           | Desvio Padrão  | 1,93                           |
| Coef. variação                         | 1,42%                          | Coef. variação | 5,95%                          | Coef. variação | 1,39%                          | Coef. variação | 2,28%                          |

| COMPRESSÃO - TRAÇO 0,5% NTC - CAANTC050 |                                |                |                                |                |                                |                |                                |
|-----------------------------------------|--------------------------------|----------------|--------------------------------|----------------|--------------------------------|----------------|--------------------------------|
| 3 dias                                  |                                | 7 dias         |                                | 28 dias        |                                | 56 dias        |                                |
| Amostra                                 | Resistência à compressão (Mpa) | Amostra        | Resistência à compressão (Mpa) | Amostra        | Resistência à compressão (Mpa) | Amostra        | Resistência à compressão (Mpa) |
| 1                                       | 42,66                          | 1              | 48,04                          | 1              | 61,28                          | 1              | 71,02                          |
| 2                                       | 42,12                          | 2              | 47,21                          | 2              | 58,88                          | 2              | 69,01                          |
| 3                                       | 41,00                          | 3              | 45,60                          | 3              | 58,41                          | 3              | 72,55                          |
| 4                                       | 40,34                          | 4              | 44,88                          | 4              | 61,55                          | 4              | 75,78                          |
| 5                                       | 41,14                          | 5              | 45,86                          | 5              | 58,85                          | 5              | 72,66                          |
| 6                                       | 40,82                          | 6              | 48,15                          | 6              | 52,28                          | 6              | 71,08                          |
| Média                                   | 41,35                          | Média          | 46,62                          | Média          | 58,54                          | Média          | 72,02                          |
| Desvio Padrão                           | 0,87                           | Desvio Padrão  | 1,37                           | Desvio Padrão  | 3,35                           | Desvio Padrão  | 2,27                           |
| Coef. variação                          | 2,10%                          | Coef. variação | 2,94%                          | Coef. variação | 5,72%                          | Coef. variação | 2,66%                          |

| COMPRESSÃO - TRAÇO 0,75% NTC - CAANTC075 |                                |                |                                |                |                                |                |                                |
|------------------------------------------|--------------------------------|----------------|--------------------------------|----------------|--------------------------------|----------------|--------------------------------|
| 3 dias                                   |                                | 7 dias         |                                | 28 dias        |                                | 56 dias        |                                |
| Amostra                                  | Resistência à compressão (Mpa) | Amostra        | Resistência à compressão (Mpa) | Amostra        | Resistência à compressão (Mpa) | Amostra        | Resistência à compressão (Mpa) |
| 1                                        | 39,20                          | 1              | 45,89                          | 1              | 56,00                          | 1              | 61,62                          |
| 2                                        | 40,86                          | 2              | 45,62                          | 2              | 53,64                          | 2              | 69,54                          |
| 3                                        | 39,53                          | 3              | 44,83                          | 3              | 57,70                          | 3              | 68,20                          |
| 4                                        | 41,00                          | 4              | 48,11                          | 4              | 58,31                          | 4              | 69,54                          |
| 5                                        | 38,58                          | 5              | 44,07                          | 5              | 56,92                          | 5              | 68,28                          |
| 6                                        | 40,53                          | 6              | 45,24                          | 6              | 51,37                          | 6              | 73,21                          |
| Média                                    | 39,95                          | Média          | 45,63                          | Média          | 55,66                          | Média          | 68,40                          |
| Desvio Padrão                            | 0,99                           | Desvio Padrão  | 1,37                           | Desvio Padrão  | 2,66                           | Desvio Padrão  | 3,79                           |
| Coef. variação                           | 2,48%                          | Coef. variação | 2,94%                          | Coef. variação | 4,78%                          | Coef. variação | 2,92%                          |

| COMPRESSÃO - TRAÇO 1% NTC - CAANTC1 |                                |                |                                |                |                                |                |                                |
|-------------------------------------|--------------------------------|----------------|--------------------------------|----------------|--------------------------------|----------------|--------------------------------|
| 3 dias                              |                                | 7 dias         |                                | 28 dias        |                                | 56 dias        |                                |
| Amostra                             | Resistência à compressão (Mpa) | Amostra        | Resistência à compressão (Mpa) | Amostra        | Resistência à compressão (Mpa) | Amostra        | Resistência à compressão (Mpa) |
| 1                                   | 37,03                          | 1              | 44,47                          | 1              | 58,46                          | 1              | 58,33                          |
| 2                                   | 37,74                          | 2              | 42,99                          | 2              | 59,02                          | 2              | 67,73                          |
| 3                                   | 37,51                          | 3              | 39,37                          | 3              | 55,69                          | 3              | 68,79                          |
| 4                                   | 37,97                          | 4              | 44,80                          | 4              | 56,45                          | 4              | 60,58                          |
| 5                                   | 34,60                          | 5              | 45,73                          | 5              | 56,15                          | 5              | 61,49                          |
| 6                                   | 38,55                          | 6              | 47,21                          | 6              | 58,54                          | 6              | 62,84                          |
| Média                               | 37,76                          | Média          | 44,10                          | Média          | 57,39                          | Média          | 63,29                          |
| Desvio Padrão                       | 1,38                           | Desvio Padrão  | 2,70                           | Desvio Padrão  | 1,44                           | Desvio Padrão  | 4,13                           |
| Coef. variação                      | 3,71%                          | Coef. variação | 6,12%                          | Coef. variação | 2,51%                          | Coef. variação | 5,81%                          |

**Resistência à tração por compressão diametral**

| <b>TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL - TRAÇO REFERÊNCIA - CAAREF</b> |                            |                |                            |                |                            |                |                            |
|--------------------------------------------------------------------|----------------------------|----------------|----------------------------|----------------|----------------------------|----------------|----------------------------|
| 3 dias                                                             |                            | 7 dias         |                            | 28 dias        |                            | 56 dias        |                            |
| Amostra                                                            | Resistência à tração (Mpa) | Amostra        | Resistência à tração (Mpa) | Amostra        | Resistência à tração (Mpa) | Amostra        | Resistência à tração (Mpa) |
| 1                                                                  | 3,27                       | 1              | 3,47                       | 1              | 4,58                       | 1              | 5,08                       |
| 2                                                                  | 3,38                       | 2              | 3,45                       | 2              | 4,43                       | 2              | 4,78                       |
| 3                                                                  | 2,73                       | 3              | 3,57                       | 3              | 4,14                       | 3              | 5,07                       |
| 4                                                                  | 3,16                       | 4              | 3,14                       | 4              | 3,81                       | 4              | 4,80                       |
| 5                                                                  | -                          | 5              | -                          | 5              | -                          | 5              | -                          |
| Média                                                              | 3,14                       | Média          | 3,41                       | Média          | 4,24                       | Média          | 4,93                       |
| Desvio Padrão                                                      | 0,28                       | Desvio Padrão  | 0,19                       | Desvio Padrão  | 0,34                       | Desvio Padrão  | 0,16                       |
| Coef. variação                                                     | 9,08%                      | Coef. variação | 5,46%                      | Coef. variação | 8,02%                      | Coef. variação | 3,34%                      |

| <b>TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL - TRAÇO 0,5% NTC - CAANTC050</b> |                            |                |                            |                |                            |                |                            |
|---------------------------------------------------------------------|----------------------------|----------------|----------------------------|----------------|----------------------------|----------------|----------------------------|
| 3 dias                                                              |                            | 7 dias         |                            | 28 dias        |                            | 56 dias        |                            |
| Amostra                                                             | Resistência à tração (Mpa) | Amostra        | Resistência à tração (Mpa) | Amostra        | Resistência à tração (Mpa) | Amostra        | Resistência à tração (Mpa) |
| 1                                                                   | 3,40                       | 1              | 3,73                       | 1              | 4,45                       | 1              | 5,21                       |
| 2                                                                   | 3,60                       | 2              | 4,05                       | 2              | 4,26                       | 2              | 4,81                       |
| 3                                                                   | 4,11                       | 3              | 4,20                       | 3              | 4,38                       | 3              | 4,94                       |
| 4                                                                   | 4,10                       | 4              | 3,75                       | 4              | 5,18                       | 4              | 5,09                       |
| 5                                                                   | -                          | 5              | -                          | 5              | -                          | 5              | -                          |
| Média                                                               | 3,80                       | Média          | 3,93                       | Média          | 4,57                       | Média          | 5,01                       |
| Desvio Padrão                                                       | 0,36                       | Desvio Padrão  | 0,23                       | Desvio Padrão  | 0,42                       | Desvio Padrão  | 0,17                       |
| Coef. variação                                                      | 9,47%                      | Coef. variação | 5,85%                      | Coef. variação | 9,19%                      | Coef. variação | 3,39%                      |

| TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL - TRAÇO 0,75% NTC - CAANTC075 |                            |                |                            |                |                            |                |                            |
|---------------------------------------------------------------|----------------------------|----------------|----------------------------|----------------|----------------------------|----------------|----------------------------|
| 3 dias                                                        |                            | 7 dias         |                            | 28 dias        |                            | 56 dias        |                            |
| Amostra                                                       | Resistência à tração (Mpa) | Amostra        | Resistência à tração (Mpa) | Amostra        | Resistência à tração (Mpa) | Amostra        | Resistência à tração (Mpa) |
| 1                                                             | 4,06                       | 1              | 4,32                       | 1              | 5,15                       | 1              | 4,70                       |
| 2                                                             | 3,84                       | 2              | 4,28                       | 2              | 4,75                       | 2              | 5,11                       |
| 3                                                             | 3,55                       | 3              | 3,56                       | 3              | 4,26                       | 3              | 5,18                       |
| 4                                                             | 3,29                       | 4              | 3,76                       | 4              | 4,53                       | 4              | 5,34                       |
| 5                                                             | -                          | 5              | -                          | 5              | -                          | 5              | -                          |
| Média                                                         | 3,68                       | Média          | 3,98                       | Média          | 4,67                       | Média          | 5,08                       |
| Desvio Padrão                                                 | 0,34                       | Desvio Padrão  | 0,38                       | Desvio Padrão  | 0,38                       | Desvio Padrão  | 0,27                       |
| Coef. variação                                                | 9,21%                      | Coef. variação | 9,55%                      | Coef. variação | 8,14%                      | Coef. variação | 5,31%                      |

| TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL - TRAÇO 1% NTC - CAANTC1 |                            |                |                            |                |                            |                |                            |
|----------------------------------------------------------|----------------------------|----------------|----------------------------|----------------|----------------------------|----------------|----------------------------|
| 3 dias                                                   |                            | 7 dias         |                            | 28 dias        |                            | 56 dias        |                            |
| Amostra                                                  | Resistência à tração (Mpa) | Amostra        | Resistência à tração (Mpa) | Amostra        | Resistência à tração (Mpa) | Amostra        | Resistência à tração (Mpa) |
| 1                                                        | 3,37                       | 1              | 4,29                       | 1              | 4,35                       | 1              | 5,02                       |
| 2                                                        | 3,43                       | 2              | 3,74                       | 2              | 4,11                       | 2              | 5,33                       |
| 3                                                        | 3,78                       | 3              | 4,36                       | 3              | 4,56                       | 3              | 5,43                       |
| 4                                                        | 3,80                       | 4              | 3,59                       | 4              | 4,28                       | 4              | 5,49                       |
| 5                                                        | -                          | 5              | -                          | 5              | -                          | 5              | -                          |
| Média                                                    | 3,60                       | Média          | 4,00                       | Média          | 4,33                       | Média          | 5,32                       |
| Desvio Padrão                                            | 0,36                       | Desvio Padrão  | 0,39                       | Desvio Padrão  | 0,19                       | Desvio Padrão  | 0,21                       |
| Coef. variação                                           | 6,39%                      | Coef. variação | 9,75%                      | Coef. variação | 4,39%                      | Coef. variação | 3,95%                      |

**Módulo de elasticidade**

| <b>MÓDULO DE ELASTICIDADE - TRAÇO REFERÊNCIA - CAAREF</b> |                              |                |                              |                |                              |                |                              |
|-----------------------------------------------------------|------------------------------|----------------|------------------------------|----------------|------------------------------|----------------|------------------------------|
| 3 dias                                                    |                              | 7 dias         |                              | 28 dias        |                              | 56 dias        |                              |
| Amostra                                                   | Módulo de elasticidade (GPa) | Amostra        | Módulo de elasticidade (GPa) | Amostra        | Módulo de elasticidade (GPa) | Amostra        | Módulo de elasticidade (GPa) |
| 1                                                         | 26,70                        | 1              | 28,25                        | 1              | 33,09                        | 1              | 33,91                        |
| 2                                                         | 25,99                        | 2              | 27,94                        | 2              | 32,50                        | 2              | 33,93                        |
| 3                                                         | 25,57                        | 3              | 28,55                        | 3              | 33,33                        | 3              | 33,95                        |
| Média                                                     | 26,09                        | Média          | 28,25                        | Média          | 32,97                        | Média          | 33,93                        |
| Desvio Padrão                                             | 0,57                         | Desvio Padrão  | 0,31                         | Desvio Padrão  | 0,43                         | Desvio Padrão  | 0,02                         |
| Coef. variação                                            | 2,19%                        | Coef. variação | 1,08%                        | Coef. variação | 1,30%                        | Coef. variação | 0,12%                        |

| <b>MÓDULO DE ELASTICIDADE - TRAÇO 0,5% NTC - CAANTC050</b> |                              |                |                              |                |                              |                |                              |
|------------------------------------------------------------|------------------------------|----------------|------------------------------|----------------|------------------------------|----------------|------------------------------|
| 3 dias                                                     |                              | 7 dias         |                              | 28 dias        |                              | 56 dias        |                              |
| Amostra                                                    | Módulo de elasticidade (GPa) | Amostra        | Módulo de elasticidade (GPa) | Amostra        | Módulo de elasticidade (GPa) | Amostra        | Módulo de elasticidade (GPa) |
| 1                                                          | 25,42                        | 1              | 28,75                        | 1              | 32,22                        | 1              | 34,26                        |
| 2                                                          | 25,15                        | 2              | 29,05                        | 2              | 32,52                        | 2              | 32,15                        |
| 3                                                          | 25,96                        | 3              | 27,60                        | 3              | 32,83                        | 3              | 34,55                        |
| Média                                                      | 25,51                        | Média          | 28,47                        | Média          | 32,52                        | Média          | 33,65                        |
| Desvio Padrão                                              | 0,41                         | Desvio Padrão  | 0,77                         | Desvio Padrão  | 0,31                         | Desvio Padrão  | 1,31                         |
| Coef. variação                                             | 1,61%                        | Coef. variação | 2,70%                        | Coef. variação | 0,95%                        | Coef. variação | 3,89%                        |

| MÓDULO DE ELASTICIDADE - TRAÇO 0,75% NTC - CAANTC075 |                              |                |                              |                |                              |                |                              |
|------------------------------------------------------|------------------------------|----------------|------------------------------|----------------|------------------------------|----------------|------------------------------|
| 3 dias                                               |                              | 7 dias         |                              | 28 dias        |                              | 56 dias        |                              |
| Amostra                                              | Módulo de elasticidade (GPa) | Amostra        | Módulo de elasticidade (GPa) | Amostra        | Módulo de elasticidade (GPa) | Amostra        | Módulo de elasticidade (GPa) |
| 1                                                    | 26,28                        | 1              | 28,17                        | 1              | 33,20                        | 1              | 35,40                        |
| 2                                                    | 25,98                        | 2              | 28,27                        | 2              | 33,89                        | 2              | 32,81                        |
| 3                                                    | 24,04                        | 3              | 28,07                        | 3              | 33,54                        | 3              | 32,77                        |
| Média                                                | 25,43                        | Média          | 28,17                        | Média          | 33,54                        | Média          | 33,66                        |
| Desv. Padrão                                         | 1,22                         | Desvio Padrão  | 0,10                         | Desvio Padrão  | 0,35                         | Desvio Padrão  | 1,51                         |
| Coef. variação                                       | 4,80%                        | Coef. variação | 0,35%                        | Coef. variação | 1,04%                        | Coef. variação | 4,49%                        |

| MÓDULO DE ELASTICIDADE - TRAÇO 1% NTC - CAANTC1 |                              |                |                              |                |                              |                |                              |
|-------------------------------------------------|------------------------------|----------------|------------------------------|----------------|------------------------------|----------------|------------------------------|
| 3 dias                                          |                              | 7 dias         |                              | 28 dias        |                              | 56 dias        |                              |
| Amostra                                         | Módulo de elasticidade (GPa) | Amostra        | Módulo de elasticidade (GPa) | Amostra        | Módulo de elasticidade (GPa) | Amostra        | Módulo de elasticidade (GPa) |
| 1                                               | 25,41                        | 1              | 28,35                        | 1              | 31,09                        | 1              | 33,94                        |
| 2                                               | 24,27                        | 2              | 28,67                        | 2              | 31,40                        | 2              | 33,90                        |
| 3                                               | 23,74                        | 3              | 28,67                        | 3              | 31,36                        | 3              | 33,86                        |
| Média                                           | 24,47                        | Média          | 28,56                        | Média          | 31,28                        | Média          | 33,90                        |
| Desv. Padrão                                    | 0,85                         | Desvio Padrão  | 0,18                         | Desvio Padrão  | 0,17                         | Desvio Padrão  | 0,04                         |
| Coef. variação                                  | 3,47%                        | Coef. variação | 0,63%                        | Coef. variação | 0,54%                        | Coef. variação | 0,12%                        |

## B. Análise estatística dos resultados

Todas as análises foram feitas pelos testes de *t-Student*, que foram realizados pelo *Excel*, seguindo os seguintes passos: Dados > Análise de dados > Teste T:duas amostras presumindo variâncias diferentes. Os valores foram comparados da maneira descrita a seguir e utilizando-se dos seguintes parâmetros:

- Referência x NTC050; Referência x NTC075 e Referência x NTC1.
- Nível de confiança = 95 % ou  $\alpha = 5 \%$
- Hipótese da diferença de média = 0
- Modo: bicaudal

| Compressão - Análise 3 dias    | Referência | 0,5% NTC | Análise                                                           |
|--------------------------------|------------|----------|-------------------------------------------------------------------|
| Média                          | 38,84      | 41,35    | Hipótese nula REJEITADA<br>A diferença das médias é significativa |
| Variância                      | 0,31       | 0,76     |                                                                   |
| Observações                    | 6          | 6        |                                                                   |
| Hipótese da diferença de média | 0          |          |                                                                   |
| gl                             | 8          |          |                                                                   |
| Stat t                         | -5,9544    |          |                                                                   |
| P(T<=t) bi-caudal              | 0,0003     |          | P<0,05                                                            |
| t crítico bi-caudal            | 2,3060     |          | < Stat t <- tcrít < tcrít                                         |

| Compressão - Análise 3 dias    | Referência | 0,75% NTC | Análise                                                           |
|--------------------------------|------------|-----------|-------------------------------------------------------------------|
| Média                          | 38,84      | 39,95     | Hipótese nula REJEITADA<br>A diferença das médias é significativa |
| Variância                      | 0,31       | 0,98      |                                                                   |
| Observações                    | 6          | 6         |                                                                   |
| Hipótese da diferença de média | 0          |           |                                                                   |
| gl                             | 8          |           |                                                                   |
| Stat t                         | -2,3944    |           |                                                                   |
| P(T<=t) bi-caudal              | 0,0436     |           | P<0,05                                                            |
| t crítico bi-caudal            | 2,3060     |           | < Stat t <- tcrít < tcrít                                         |

| Compressão - Análise 3 dias    | Referência | 1% NTC | Análise                                                           |
|--------------------------------|------------|--------|-------------------------------------------------------------------|
| Média                          | 38,84      | 37,23  | Hipótese nula REJEITADA<br>A diferença das médias é significativa |
| Variância                      | 0,31       | 1,92   |                                                                   |
| Observações                    | 6          | 6      |                                                                   |
| Hipótese da diferença de média | 0          |        |                                                                   |
| gl                             | 7          |        |                                                                   |
| Stat t                         | 2,6455     |        |                                                                   |
| P(T<=t) bi-caudal              | 0,0332     |        | P<0,05                                                            |
| t crítico bi-caudal            | 2,3646     |        | - tcrít < tcrít < Stat t                                          |

| Compressão - Análise 7 dias    | Referência | 0,5% NTC | Análise                                                                   |
|--------------------------------|------------|----------|---------------------------------------------------------------------------|
| Média                          | 45,97      | 46,62    | Hipótese nula ACEITA<br><b>A diferença das médias NÃO é significativa</b> |
| Variância                      | 7,48       | 1,87     |                                                                           |
| Observações                    | 6          | 6        |                                                                           |
| Hipótese da diferença de média | 0          |          |                                                                           |
| gl                             | 7          |          |                                                                           |
| Stat t                         | -0,5207    |          |                                                                           |
| P(T<=t) bi-caudal              | 0,6186     |          | P>0,05                                                                    |
| t crítico bi-caudal            | 2,3646     |          | < Stat t <- tcrít < tcrít                                                 |

| Compressão - Análise 7 dias    | Referência | 0,75% NTC | Análise                                                               |
|--------------------------------|------------|-----------|-----------------------------------------------------------------------|
| Média                          | 45,97      | 45,63     | Hipótese nula ACEITA<br>A diferença das médias<br>NÃO é significativa |
| Variância                      | 7,48       | 1,89      |                                                                       |
| Observações                    | 6          | 6         |                                                                       |
| Hipótese da diferença de média | 0          |           |                                                                       |
| gl                             | 7          |           |                                                                       |
| Stat t                         | 0,2774     |           |                                                                       |
| P(T<=t) bi-caudal              | 0,7895     |           | P>0,05                                                                |
| t crítico bi-caudal            | 2,3646     |           | <- tcrít < Stat t < tcrít                                             |

| Compressão - Análise 7 dias    | Referência | 1% NTC | Análise                                                               |
|--------------------------------|------------|--------|-----------------------------------------------------------------------|
| Média                          | 45,97      | 44,10  | Hipótese nula ACEITA<br>A diferença das médias<br>NÃO é significativa |
| Variância                      | 7,48       | 7,31   |                                                                       |
| Observações                    | 6          | 6      |                                                                       |
| Hipótese da diferença de média | 0          |        |                                                                       |
| gl                             | 10         |        |                                                                       |
| Stat t                         | 1,1963     |        |                                                                       |
| P(T<=t) bi-caudal              | 0,2592     |        | P>0,05                                                                |
| t crítico bi-caudal            | 2,2281     |        | <- tcrít < Stat t < tcrít                                             |

| Compressão - Análise 28 dias   | Referência | 0,5% NTC | Análise                                                               |
|--------------------------------|------------|----------|-----------------------------------------------------------------------|
| Média                          | 59,75      | 58,54    | Hipótese nula ACEITA<br>A diferença das médias<br>NÃO é significativa |
| Variância                      | 0,69       | 11,20    |                                                                       |
| Observações                    | 6          | 6        |                                                                       |
| Hipótese da diferença de média | 0          |          |                                                                       |
| gl                             | 6          |          |                                                                       |
| Stat t                         | 0,8607     |          | P>0,05                                                                |
| P(T<=t) bi-caudal              | 0,4225     |          |                                                                       |
| t crítico bi-caudal            | 2,4469     |          | <- tcrít < Stat t < tcrít                                             |

| <i>Compressão - Análise 28 dias</i> | <i>Referência</i> | <i>0,75% NTC</i> | <i>Análise</i>                                                           |
|-------------------------------------|-------------------|------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| Média                               | 59,75             | 55,66            | Hipótese nula REJEITADA<br><b>A diferença das médias é significativa</b> |
| Variância                           | 0,69              | 7,07             |                                                                          |
| Observações                         | 6                 | 6                |                                                                          |
| Hipótese da diferença de média      | 0                 |                  |                                                                          |
| gl                                  | 6                 |                  |                                                                          |
| Stat t                              | 3,6003            |                  |                                                                          |
| P(T<=t) bi-caudal                   | 0,0114            |                  | P<0,05                                                                   |
| t crítico bi-caudal                 | 2,4469            |                  | < Stat t <- tcrít < tcrít                                                |

| Compressão - Análise 28 dias   | Referência | 1% NTC | Análise                                                           |
|--------------------------------|------------|--------|-------------------------------------------------------------------|
| Média                          | 59,75      | 57,39  | Hipótese nula REJEITADA<br>A diferença das médias é significativa |
| Variância                      | 0,69       | 2,09   |                                                                   |
| Observações                    | 6          | 6      |                                                                   |
| Hipótese da diferença de média | 0          |        |                                                                   |
| gl                             | 8          |        |                                                                   |
| Stat t                         | 3,4787     |        |                                                                   |
| P(T<=t) bi-caudal              | 0,0083     |        | P<0,05                                                            |
| t crítico bi-caudal            | 2,3060     |        | < Stat t <- tcrít < tcrít                                         |

| Compressão - Análise 56 dias   | Referência | 0,5% NTC | Análise                                                               |
|--------------------------------|------------|----------|-----------------------------------------------------------------------|
| Média                          | 71,56      | 72,02    | Hipótese nula ACEITA<br>A diferença das médias<br>NÃO é significativa |
| Variância                      | 3,72       | 5,15     |                                                                       |
| Observações                    | 6          | 6        |                                                                       |
| Hipótese da diferença de média | 0          |          |                                                                       |
| gl                             | 10         |          |                                                                       |
| Stat t                         | -0,3727    |          |                                                                       |
| P(T<=t) bi-caudal              | 0,7171     |          | P>0,05                                                                |
| t crítico bi-caudal            | 2,2281     |          | <- tcrít < Stat t < tcrít                                             |

| Compressão - Análise 56 dias   | Referência | 0,75% NTC | Análise                                                               |
|--------------------------------|------------|-----------|-----------------------------------------------------------------------|
| Média                          | 71,56      | 68,40     | Hipótese nula ACEITA<br>A diferença das médias<br>NÃO é significativa |
| Variância                      | 3,72       | 14,35     |                                                                       |
| Observações                    | 6          | 6         |                                                                       |
| Hipótese da diferença de média | 0          |           |                                                                       |
| gl                             | 7          |           |                                                                       |
| Stat t                         | 1,8236     |           | P>0,05                                                                |
| P(T<=t) bi-caudal              | 0,1110     |           |                                                                       |
| t crítico bi-caudal            | 2,3646     |           |                                                                       |
|                                |            |           | <- tcrít < Stat t < tcrít                                             |

| Compressão - Análise 56 dias   | Referência | 1% NTC | Análise                                                           |
|--------------------------------|------------|--------|-------------------------------------------------------------------|
| Média                          | 71,56      | 63,29  | Hipótese nula REJEITADA<br>A diferença das médias é significativa |
| Variância                      | 3,72       | 17,07  |                                                                   |
| Observações                    | 6          | 6      |                                                                   |
| Hipótese da diferença de média | 0          |        |                                                                   |
| gl                             | 7          |        |                                                                   |
| Stat t                         | 4,4424     |        |                                                                   |
| P(T<=t) bi-caudal              | 0,0030     |        | P<0,05                                                            |
| t crítico bi-caudal            | 2,3646     |        | - tcrít < tcrít < Stat t                                          |

*Resistência à tração por compressão diametral*

| Tração - Análise 3 dias        | Referência | 0,5% NTC                  | Análise                                                           |
|--------------------------------|------------|---------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Média                          | 3,14       | 3,80                      | Hipótese nula REJEITADA<br>A diferença das médias é significativa |
| Variância                      | 0,08       | 0,12                      |                                                                   |
| Observações                    | 4          | 4                         |                                                                   |
| Hipótese da diferença de média | 0          |                           |                                                                   |
| gl                             | 6          |                           |                                                                   |
| Stat t                         | -2,9156    |                           |                                                                   |
| P(T<=t) bi-caudal              | 0,0278     | P<0,05                    |                                                                   |
| t crítico bi-caudal            | 2,4469     | < Stat t <- tcrít < tcrít |                                                                   |

| Tração - Análise 3 dias        | Referência | 0,75% NTC | Análise                                                           |
|--------------------------------|------------|-----------|-------------------------------------------------------------------|
| Média                          | 3,14       | 3,69      | Hipótese nula REJEITADA<br>A diferença das médias é significativa |
| Variância                      | 0,08       | 0,11      |                                                                   |
| Observações                    | 4          | 4         |                                                                   |
| Hipótese da diferença de média | 0          |           |                                                                   |
| gl                             | 6          |           |                                                                   |
| Stat t                         | -2,4979    |           |                                                                   |
| P(T<=t) bi-caudal              | 0,0467     |           | P<0,05                                                            |
| t crítico bi-caudal            | 2,4469     |           | < Stat t <- tcrít < tcrít                                         |

| <i>Tração - Análise 3 dias</i> | <i>Referência</i> | <i>1% NTC</i> | <i>Análise</i>                                                           |
|--------------------------------|-------------------|---------------|--------------------------------------------------------------------------|
| Média                          | 3,14              | 3,60          | Hipótese nula REJEITADA<br><b>A diferença das médias é significativa</b> |
| Variância                      | 0,08              | 0,05          |                                                                          |
| Observações                    | 4                 | 4             |                                                                          |
| Hipótese da diferença de média | 0                 |               |                                                                          |
| gl                             | 6                 |               |                                                                          |
| Stat t                         | -2,5290           |               |                                                                          |
| P(T<=t) bi-caudal              | 0,0447            |               | P<0,05                                                                   |
| t crítico bi-caudal            | 2,4469            |               | < Stat t <- tcrít < tcrít                                                |

| <i>Tração - Análise 7 dias</i> | <i>Referência</i> | <i>0,5% NTC</i> | <i>Análise</i>                                                           |
|--------------------------------|-------------------|-----------------|--------------------------------------------------------------------------|
| Média                          | 3,41              | 3,93            | Hipótese nula REJEITADA<br><b>A diferença das médias é significativa</b> |
| Variância                      | 0,03              | 0,05            |                                                                          |
| Observações                    | 4                 | 4               |                                                                          |
| Hipótese da diferença de média | 0                 |                 |                                                                          |
| gl                             | 6                 |                 |                                                                          |
| Stat t                         | -3,5439           |                 |                                                                          |
| P(T<=t) bi-caudal              | 0,0122            |                 | P<0,05                                                                   |
| t crítico bi-caudal            | 2,4469            |                 | < Stat t <- tcrít < tcrít                                                |

| <i>Tração - Análise 7 dias</i> | <i>Referência</i> | <i>0,75% NTC</i> | <i>Análise</i>                                                            |
|--------------------------------|-------------------|------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| Média                          | 3,41              | 3,98             | Hipótese nula ACEITA<br><b>A diferença das médias NÃO é significativa</b> |
| Variância                      | 0,03              | 0,14             |                                                                           |
| Observações                    | 4                 | 4                |                                                                           |
| Hipótese da diferença de média | 0                 |                  |                                                                           |
| gl                             | 4                 |                  |                                                                           |
| Stat t                         | -2,7137           |                  |                                                                           |
| P(T<=t) bi-caudal              | 0,0533            |                  | P>0,05                                                                    |
| t crítico bi-caudal            | 2,7764            |                  | <- tcrít < Stat t < tcrít                                                 |

| <i>Tração - Análise 7 dias</i> | <i>Referência</i> | <i>1% NTC</i> | <i>Análise</i>                                                            |
|--------------------------------|-------------------|---------------|---------------------------------------------------------------------------|
| Média                          | 3,41              | 4,00          | Hipótese nula ACEITA<br><b>A diferença das médias NÃO é significativa</b> |
| Variância                      | 0,03              | 0,15          |                                                                           |
| Observações                    | 4                 | 4             |                                                                           |
| Hipótese da diferença de média | 0                 |               |                                                                           |
| gl                             | 4                 |               |                                                                           |
| Stat t                         | -2,7368           |               |                                                                           |
| P(T<=t) bi-caudal              | 0,0521            |               | P>0,05                                                                    |
| t crítico bi-caudal            | 2,7764            |               | <- tcrít < Stat t < tcrít                                                 |

| <i>Tração - Análise 28 dias</i> | <i>Referência</i> | <i>0,5% NTC</i> | <i>Análise</i>                                                            |
|---------------------------------|-------------------|-----------------|---------------------------------------------------------------------------|
| Média                           | 4,24              | 4,57            | Hipótese nula ACEITA<br><b>A diferença das médias NÃO é significativa</b> |
| Variância                       | 0,12              | 0,17            |                                                                           |
| Observações                     | 4                 | 4               |                                                                           |
| Hipótese da diferença de média  | 0                 |                 |                                                                           |
| gl                              | 6                 |                 |                                                                           |
| Stat t                          | -1,2196           |                 |                                                                           |
| P(T<=t) bi-caudal               | 0,2684            |                 | P>0,05                                                                    |
| t crítico bi-caudal             | 2,4469            |                 | <- tcrít < Stat t < tcrít                                                 |

| <i>Tração - Análise 28 dias</i> | <i>Referência</i> | <i>0,75% NTC</i> | <i>Análise</i>                                                            |
|---------------------------------|-------------------|------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| Média                           | 4,24              | 4,67             | Hipótese nula ACEITA<br><b>A diferença das médias NÃO é significativa</b> |
| Variância                       | 0,12              | 0,14             |                                                                           |
| Observações                     | 4                 | 4                |                                                                           |
| Hipótese da diferença de média  | 0                 |                  |                                                                           |
| gl                              | 6                 |                  |                                                                           |
| Stat t                          | -1,7062           |                  |                                                                           |
| P(T<=t) bi-caudal               | 0,1388            |                  | P>0,05                                                                    |
| t crítico bi-caudal             | 2,4469            |                  | <- tcrít < Stat t < tcrít                                                 |

| <i>Tração - Análise 28 dias</i> | <i>Referência</i> | <i>1% NTC</i> | <i>Análise</i>                                                            |
|---------------------------------|-------------------|---------------|---------------------------------------------------------------------------|
| Média                           | 4,24              | 4,33          | Hipótese nula ACEITA<br><b>A diferença das médias NÃO é significativa</b> |
| Variância                       | 0,12              | 0,03          |                                                                           |
| Observações                     | 4                 | 4             |                                                                           |
| Hipótese da diferença de média  | 0                 |               |                                                                           |
| gl                              | 5                 |               |                                                                           |
| Stat t                          | -0,4386           |               |                                                                           |
| P(T<=t) bi-caudal               | 0,6793            |               | P>0,05                                                                    |
| t crítico bi-caudal             | 2,5706            |               | <- tcrít < Stat t < tcrít                                                 |

| <i>Tração - Análise 56 dias</i> | <i>Referência</i> | <i>0,5% NTC</i> | <i>Análise</i>                                                            |
|---------------------------------|-------------------|-----------------|---------------------------------------------------------------------------|
| Média                           | 4,93              | 5,01            | Hipótese nula ACEITA<br><b>A diferença das médias NÃO é significativa</b> |
| Variância                       | 0,03              | 0,03            |                                                                           |
| Observações                     | 4                 | 4               |                                                                           |
| Hipótese da diferença de média  | 0                 |                 |                                                                           |
| gl                              | 6                 |                 |                                                                           |
| Stat t                          | -0,6668           |                 |                                                                           |
| P(T<=t) bi-caudal               | 0,5297            |                 | P>0,05                                                                    |
| t crítico bi-caudal             | 2,4469            |                 | <- tcrít < Stat t < tcrít                                                 |

| Tração - Análise 56 dias       | Referência | 0,75% NTC | Análise                                                               |
|--------------------------------|------------|-----------|-----------------------------------------------------------------------|
| Média                          | 4,93       | 5,08      | Hipótese nula ACEITA<br>A diferença das médias<br>NÃO é significativa |
| Variância                      | 0,03       | 0,07      |                                                                       |
| Observações                    | 4          | 4         |                                                                       |
| Hipótese da diferença de média | 0          |           |                                                                       |
| gl                             | 5          |           |                                                                       |
| Stat t                         | -0,9419    |           | P>0,05                                                                |
| P(T<=t) bi-caudal              | 0,3895     |           |                                                                       |
| t crítico bi-caudal            | 2,5706     |           |                                                                       |
|                                |            |           | <- tcrít < Stat t < tcrít                                             |

| Tração - Análise 56 dias       | Referência | 1% NTC | Análise                                                           |
|--------------------------------|------------|--------|-------------------------------------------------------------------|
| Média                          | 4,93       | 5,32   | Hipótese nula REJEITADA<br>A diferença das médias é significativa |
| Variância                      | 0,03       | 0,04   |                                                                   |
| Observações                    | 4          | 4      |                                                                   |
| Hipótese da diferença de média | 0          |        |                                                                   |
| gl                             | 6          |        |                                                                   |
| Stat t                         | -2,8928    |        |                                                                   |
| P(T<=t) bi-caudal              | 0,0276     |        | P<0,05                                                            |
| t crítico bi-caudal            | 2,4469     |        | < Stat t <- tcrít < tcrít                                         |

#### *Módulo de elasticidade*

| Módulo - Análise 3 dias        | Referência | 0,5% NTC | Análise                                                               |
|--------------------------------|------------|----------|-----------------------------------------------------------------------|
| Média                          | 26,09      | 25,51    | Hipótese nula ACEITA<br>A diferença das médias<br>NÃO é significativa |
| Variância                      | 0,33       | 0,17     |                                                                       |
| Observações                    | 3          | 3        |                                                                       |
| Hipótese da diferença de média | 0          |          |                                                                       |
| Gl                             | 4          |          |                                                                       |
| Stat t                         | 1,4177     |          |                                                                       |
| P(T<=t) bi-caudal              | 0,2292     |          | P>0,05                                                                |
| t crítico bi-caudal            | 2,7764     |          | <- tcrít < Stat t < tcrít                                             |

| Módulo - Análise 3 dias        | Referência | 0,75% NTC | Análise                                                               |
|--------------------------------|------------|-----------|-----------------------------------------------------------------------|
| Média                          | 26,09      | 25,43     | Hipótese nula ACEITA<br>A diferença das médias<br>NÃO é significativa |
| Variância                      | 0,33       | 1,48      |                                                                       |
| Observações                    | 3          | 3         |                                                                       |
| Hipótese da diferença de média | 0          |           |                                                                       |
| Gl                             | 3          |           |                                                                       |
| Stat t                         | 0,8423     |           | P>0,05                                                                |
| P(T<=t) bi-caudal              | 0,4615     |           |                                                                       |
| t crítico bi-caudal            | 3,1824     |           |                                                                       |
|                                |            |           | <- tcrít < Stat t < tcrít                                             |

| Módulo - Análise 3 dias        | Referência | 1% NTC | Análise                                                               |
|--------------------------------|------------|--------|-----------------------------------------------------------------------|
| Média                          | 26,09      | 24,47  | Hipótese nula ACEITA<br>A diferença das médias<br>NÃO é significativa |
| Variância                      | 0,33       | 0,73   |                                                                       |
| Observações                    | 3          | 3      |                                                                       |
| Hipótese da diferença de média | 0          |        |                                                                       |
| gl                             | 3          |        |                                                                       |
| Stat t                         | 2,7212     |        | P>0,05                                                                |
| P(T<=t) bi-caudal              | 0,0725     |        |                                                                       |
| t crítico bi-caudal            | 3,1824     |        | <- tcrít < Stat t < tcrít                                             |

| Módulo - Análise 7 dias        | Referência | 0,5% NTC | Análise                                                               |
|--------------------------------|------------|----------|-----------------------------------------------------------------------|
| Média                          | 28,25      | 28,47    | Hipótese nula ACEITA<br>A diferença das médias<br>NÃO é significativa |
| Variância                      | 0,09       | 0,59     |                                                                       |
| Observações                    | 3          | 3        |                                                                       |
| Hipótese da diferença de média | 0          |          |                                                                       |
| gl                             | 3          |          |                                                                       |
| Stat t                         | -0,4625    |          | P>0,05                                                                |
| P(T<=t) bi-caudal              | 0,6752     |          |                                                                       |
| t crítico bi-caudal            | 3,1824     |          |                                                                       |
|                                |            |          | <- tcrít < Stat t < tcrít                                             |

| Módulo - Análise 7 dias        | Referência | 0,75% NTC | Análise                                                               |
|--------------------------------|------------|-----------|-----------------------------------------------------------------------|
| Média                          | 28,25      | 28,17     | Hipótese nula ACEITA<br>A diferença das médias<br>NÃO é significativa |
| Variância                      | 0,09       | 0,01      |                                                                       |
| Observações                    | 3          | 3         |                                                                       |
| Hipótese da diferença de média | 0          |           |                                                                       |
| gl                             | 2          |           |                                                                       |
| Stat t                         | 0,4137     |           |                                                                       |
| P(T<=t) bi-caudal              | 0,7192     |           | P>0,05                                                                |
| t crítico bi-caudal            | 4,3027     |           | <- tcrít < Stat t < tcrít                                             |

| Módulo - Análise 7 dias        | Referência | 1% NTC | Análise                                                               |
|--------------------------------|------------|--------|-----------------------------------------------------------------------|
| Média                          | 28,25      | 28,56  | Hipótese nula ACEITA<br>A diferença das médias<br>NÃO é significativa |
| Variância                      | 0,09       | 0,03   |                                                                       |
| Observações                    | 3          | 3      |                                                                       |
| Hipótese da diferença de média | 0          |        |                                                                       |
| gl                             | 3          |        |                                                                       |
| Stat t                         | -1,5381    |        |                                                                       |
| P(T<=t) bi-caudal              | 0,2216     |        | P>0,05                                                                |
| t crítico bi-caudal            | 3,1824     |        | <- tcrít < Stat t < tcrít                                             |

| Módulo - Análise 28 dias       | Referência | 0,5% NTC | Análise                                                               |
|--------------------------------|------------|----------|-----------------------------------------------------------------------|
| Média                          | 32,97      | 32,52    | Hipótese nula ACEITA<br>A diferença das médias<br>NÃO é significativa |
| Variância                      | 0,18       | 0,09     |                                                                       |
| Observações                    | 3          | 3        |                                                                       |
| Hipótese da diferença de média | 0          |          |                                                                       |
| gl                             | 4          |          |                                                                       |
| Stat t                         | 1,4850     |          | P>0,05                                                                |
| P(T<=t) bi-caudal              | 0,2117     |          |                                                                       |
| t crítico bi-caudal            | 2,7764     |          | <- tcrít < Stat t < tcrít                                             |

| Módulo - Análise 28 dias       | Referência | 0,75% NTC | Análise                                                               |
|--------------------------------|------------|-----------|-----------------------------------------------------------------------|
| Média                          | 32,97      | 33,54     | Hipótese nula ACEITA<br>A diferença das médias<br>NÃO é significativa |
| Variância                      | 0,18       | 0,12      |                                                                       |
| Observações                    | 3          | 3         |                                                                       |
| Hipótese da diferença de média | 0          |           |                                                                       |
| gl                             | 4          |           |                                                                       |
| Stat t                         | -1,7981    |           | P>0,05                                                                |
| P(T<=t) bi-caudal              | 0,1466     |           |                                                                       |
| t crítico bi-caudal            | 2,7764     |           |                                                                       |
|                                |            |           | <- tcrít < Stat t < tcrít                                             |

| Módulo - Análise 28 dias       | Referência | 1% NTC | Análise                                                           |
|--------------------------------|------------|--------|-------------------------------------------------------------------|
| Média                          | 32,97      | 31,28  | Hipótese nula REJEITADA<br>A diferença das médias é significativa |
| Variância                      | 0,18       | 0,03   |                                                                   |
| Observações                    | 3          | 3      |                                                                   |
| Hipótese da diferença de média | 0          |        |                                                                   |
| gl                             | 3          |        |                                                                   |
| Stat t                         | 6,3745     |        |                                                                   |
| P(T<=t) bi-caudal              | 0,0078     |        | P<0,05                                                            |
| t crítico bi-caudal            | 3,1824     |        | < Stat t <- tcrít < tcrít                                         |

| Módulo - Análise 56 dias       | Referência | 0,5% NTC | Análise                                                               |
|--------------------------------|------------|----------|-----------------------------------------------------------------------|
| Média                          | 33,93      | 33,65    | Hipótese nula ACEITA<br>A diferença das médias<br>NÃO é significativa |
| Variância                      | 0,0004     | 1,7160   |                                                                       |
| Observações                    | 3          | 3        |                                                                       |
| Hipótese da diferença de média | 0          |          |                                                                       |
| gl                             | 2          |          |                                                                       |
| Stat t                         | 0,3658     |          | P>0,05                                                                |
| P(T<=t) bi-caudal              | 0,7496     |          |                                                                       |
| t crítico bi-caudal            | 4,3027     |          |                                                                       |
|                                |            |          | <- tcrít < Stat t < tcrít                                             |

| Módulo - Análise 56 dias       | Referência | 0,75% NTC | Análise                                                               |
|--------------------------------|------------|-----------|-----------------------------------------------------------------------|
| Média                          | 33,93      | 33,66     | Hipótese nula ACEITA<br>A diferença das médias<br>NÃO é significativa |
| Variância                      | 0,0004     | 2,2711    |                                                                       |
| Observações                    | 3          | 3         |                                                                       |
| Hipótese da diferença de média | 0          |           |                                                                       |
| gl                             | 2          |           |                                                                       |
| Stat t                         | 0,3103     |           | P>0,05                                                                |
| P(T<=t) bi-caudal              | 0,7857     |           |                                                                       |
| t crítico bi-caudal            | 4,3027     |           |                                                                       |
|                                |            |           | <- tcrít < Stat t < tcrít                                             |

| Módulo - Análise 56 dias       | Referência | 1% NTC | Análise                                                               |
|--------------------------------|------------|--------|-----------------------------------------------------------------------|
| Média                          | 33,93      | 33,90  | Hipótese nula ACEITA<br>A diferença das médias<br>NÃO é significativa |
| Variância                      | 0,0004     | 0,0016 |                                                                       |
| Observações                    | 3          | 3      |                                                                       |
| Hipótese da diferença de média | 0          |        |                                                                       |
| gl                             | 3          |        |                                                                       |
| Stat t                         | 1,1619     |        |                                                                       |
| P(T<=t) bi-caudal              | 0,3293     |        | P>0,05                                                                |

| Compressão - Análise 3 dias    | Referência | 0,15% NTC | Análise                                                           |
|--------------------------------|------------|-----------|-------------------------------------------------------------------|
| Média                          | 38,84      | 35,82     | Hipótese nula REJEITADA<br>A diferença das médias é significativa |
| Variância                      | 0,31       | 0,73      |                                                                   |
| Observações                    | 6          | 6         |                                                                   |
| Hipótese da diferença de média | 0          |           |                                                                   |
| gl                             | 9          |           |                                                                   |
| Stat t                         | 7,2833     |           |                                                                   |
| P(T<=t) bi-caudal              | 0,00005    |           | P<0,05                                                            |
| t crítico bi-caudal            | 2,2622     |           | - tcrít < tcrít < Stat t                                          |

| <i>Compressão - Análise 3 dias</i> | <i>Referência</i> | <i>0,30% NTC</i> | <i>Análise</i>                                                            |
|------------------------------------|-------------------|------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| Média                              | 38,84             | 37,18            | Hipótese nula ACEITA<br><b>A diferença das médias NÃO é significativa</b> |
| Variância                          | 0,31              | 4,81             |                                                                           |
| Observações                        | 6                 | 6                |                                                                           |
| Hipótese da diferença de média     | 0                 |                  |                                                                           |
| gl                                 | 6                 |                  |                                                                           |
| Stat t                             | 1,7999            |                  |                                                                           |
| P(T<=t) bi-caudal                  | 0,1220            |                  | P>0,05                                                                    |
| t crítico bi-caudal                | 2,4469            |                  | - tcrít < Stat t < tcrít                                                  |

| Compressão - Análise 7 dias    | Referência | 0,15% NTC | Análise                                                            |
|--------------------------------|------------|-----------|--------------------------------------------------------------------|
| Média                          | 45,97      | 49,12     | Hipótese nula ACEITA<br>A diferença das médias NÃO é significativa |
| Variância                      | 7,48       | 9,43      |                                                                    |
| Observações                    | 6          | 6         |                                                                    |
| Hipótese da diferença de média | 0          |           |                                                                    |
| gl                             | 10         |           |                                                                    |
| Stat t                         | -1,8722    |           |                                                                    |
| P(T<=t) bi-caudal              | 0,0907     |           | P>0,05                                                             |
| t crítico bi-caudal            | 2,2281     |           | - tcrít < Stat t < tcrít                                           |

| Compressão - Análise 7 dias    | Referência | 0,30% NTC | Análise                                                           |
|--------------------------------|------------|-----------|-------------------------------------------------------------------|
| Média                          | 45,97      | 51,66     | Hipótese nula REJEITADA<br>A diferença das médias é significativa |
| Variância                      | 7,48       | 11,02     |                                                                   |
| Observações                    | 6          | 6         |                                                                   |
| Hipótese da diferença de média | 0          |           |                                                                   |
| gl                             | 10         |           |                                                                   |
| Stat t                         | -3,2381    |           | P<0,05                                                            |
| P(T<=t) bi-caudal              | 0,0089     |           |                                                                   |
| t crítico bi-caudal            | 2,2281     |           |                                                                   |
|                                |            |           | Stat t < - tcrít < tcrít                                          |

| <i>Compressão - Análise 28 dias</i> | <i>Referência</i> | <i>0,15% NTC</i> | <i>Análise</i>                                                            |
|-------------------------------------|-------------------|------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| Média                               | 59,75             | 60,45            | Hipótese nula ACEITA<br><b>A diferença das médias NÃO é significativa</b> |
| Variância                           | 0,69              | 20,39            |                                                                           |
| Observações                         | 6                 | 6                |                                                                           |
| Hipótese da diferença de média      | 0                 |                  |                                                                           |
| gl                                  | 5                 |                  |                                                                           |
| Stat t                              | -0,3699           |                  | P>0,05                                                                    |
| P(T<=t) bi-caudal                   | 0,7266            |                  |                                                                           |
| t crítico bi-caudal                 | 2,5706            |                  |                                                                           |
|                                     |                   |                  | <- tcrít < Stat t < tcrít                                                 |

| Compressão - Análise 28 dias   | Referência | 0,30% NTC | Análise                                                           |
|--------------------------------|------------|-----------|-------------------------------------------------------------------|
| Média                          | 59,75      | 61,51     | Hipótese nula REJEITADA<br>A diferença das médias é significativa |
| Variância                      | 0,69       | 1,64      |                                                                   |
| Observações                    | 6          | 6         |                                                                   |
| Hipótese da diferença de média | 0          |           |                                                                   |
| gl                             | 9          |           |                                                                   |
| Stat t                         | -2,8076    |           | P<0,05                                                            |
| P(T<=t) bi-caudal              | 0,0205     |           |                                                                   |
| t crítico bi-caudal            | 2,2622     |           |                                                                   |
|                                |            |           | Stat t < - tcrít < tcrít                                          |

| Tração - Análise 3 dias        | Referência | 0,15% NTC | Análise                                                            |
|--------------------------------|------------|-----------|--------------------------------------------------------------------|
| Média                          | 3,14       | 3,51      | Hipótese nula ACEITA<br>A diferença das médias NÃO é significativa |
| Variância                      | 0,08       | 0,22      |                                                                    |
| Observações                    | 4          | 4         |                                                                    |
| Hipótese da diferença de média | 0          |           |                                                                    |
| gl                             | 5          |           |                                                                    |
| Stat t                         | -1,3673    |           |                                                                    |
| P(T<=t) bi-caudal              | 0,2298     |           | P>0,05                                                             |
| t crítico bi-caudal            | 2,5706     |           | <- tcrít < Stat t < tcrít                                          |

| <i>Tração - Análise 3 dias</i> | <i>Referência</i> | <i>0,30% NTC</i> | <i>Análise</i>                                                            |
|--------------------------------|-------------------|------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| Média                          | 3,14              | 3,74             | Hipótese nula ACEITA<br><b>A diferença das médias NÃO é significativa</b> |
| Variância                      | 0,08              | 0,16             |                                                                           |
| Observações                    | 4                 | 4                |                                                                           |
| Hipótese da diferença de média | 0                 |                  |                                                                           |
| gl                             | 5                 |                  |                                                                           |
| Stat t                         | -2,4673           |                  |                                                                           |
| P(T<=t) bi-caudal              | 0,0567            |                  | P>0,05                                                                    |
| t crítico bi-caudal            | 2,5706            |                  | <- tcrít < Stat t < tcrít                                                 |

| Tração - Análise 7 dias        | Referência | 0,15% NTC | Análise                                                            |
|--------------------------------|------------|-----------|--------------------------------------------------------------------|
| Média                          | 3,41       | 3,76      | Hipótese nula ACEITA<br>A diferença das médias NÃO é significativa |
| Variância                      | 0,03       | 0,07      |                                                                    |
| Observações                    | 4          | 4         |                                                                    |
| Hipótese da diferença de média | 0          |           |                                                                    |
| gl                             | 5          |           |                                                                    |
| Stat t                         | -2,1550    |           |                                                                    |
| P(T<=t) bi-caudal              | 0,0837     |           | P>0,05                                                             |
| t crítico bi-caudal            | 2,5706     |           | <- tcrít < Stat t < tcrít                                          |

| <i>Tração - Análise 7 dias</i> | <i>Referência</i> | <i>0,30% NTC</i> | <i>Análise</i>                                                           |
|--------------------------------|-------------------|------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| Média                          | 3,41              | 4,17             | Hipótese nula REJEITADA<br><b>A diferença das médias é significativa</b> |
| Variância                      | 0,03              | 0,18             |                                                                          |
| Observações                    | 4                 | 4                |                                                                          |
| Hipótese da diferença de média | 0                 |                  |                                                                          |
| gl                             | 4                 |                  |                                                                          |
| Stat t                         | -3,2788           |                  |                                                                          |
| P(T<=t) bi-caudal              | 0,0305            |                  | P<0,05                                                                   |
| t crítico bi-caudal            | 2,7764            |                  | Stat t < - tcrít < tcrít                                                 |

| Tração - Análise 28 dias       | Referência | 0,15% NTC | Análise                                                            |
|--------------------------------|------------|-----------|--------------------------------------------------------------------|
| Média                          | 4,24       | 4,50      | Hipótese nula ACEITA<br>A diferença das médias NÃO é significativa |
| Variância                      | 0,12       | 0,08      |                                                                    |
| Observações                    | 4          | 4         |                                                                    |
| Hipótese da diferença de média | 0          |           |                                                                    |
| gl                             | 6          |           |                                                                    |
| Stat t                         | -1,1564    |           |                                                                    |
| P(T<=t) bi-caudal              | 0,2915     |           | P>0,05                                                             |
| t crítico bi-caudal            | 2,4469     |           | - tcrít < Stat t < tcrít                                           |

| <i>Tração - Análise 28 dias</i> | <i>Referência</i> | <i>0,30% NTC</i> | <i>Análise</i>                                                            |
|---------------------------------|-------------------|------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| Média                           | 4,24              | 5,16             | Hipótese nula ACEITA<br><b>A diferença das médias NÃO é significativa</b> |
| Variância                       | 0,12              | 0,83             |                                                                           |
| Observações                     | 4                 | 4                |                                                                           |
| Hipótese da diferença de média  | 0                 |                  |                                                                           |
| gl                              | 4                 |                  |                                                                           |
| Stat t                          | -1,8770           |                  | P>0,05<br><br>- tcrít < Stat t < tcrít                                    |
| P(T<=t) bi-caudal               | 0,1337            |                  |                                                                           |
| t crítico bi-caudal             | 2,7764            |                  |                                                                           |

| Módulo - Análise 3 dias        | Referência | 0,15% NTC | Análise                                                            |
|--------------------------------|------------|-----------|--------------------------------------------------------------------|
| Média                          | 26,09      | 27,06     | Hipótese nula ACEITA<br>A diferença das médias NÃO é significativa |
| Variância                      | 0,33       | 0,61      |                                                                    |
| Observações                    | 3          | 3         |                                                                    |
| Hipótese da diferença de média | 0          |           |                                                                    |
| gl                             | 4          |           |                                                                    |
| Stat t                         | -1,7378    |           |                                                                    |
| P(T<=t) bi-caudal              | 0,1572     |           | P>0,05                                                             |
| t crítico bi-caudal            | 2,7764     |           | <- tcrít < Stat t < tcrít                                          |

| Módulo - Análise 3 dias        | Referência | 0,30% NTC | Análise                                                               |
|--------------------------------|------------|-----------|-----------------------------------------------------------------------|
| Média                          | 26,09      | 25,11     | Hipótese nula ACEITA<br>A diferença das médias<br>NÃO é significativa |
| Variância                      | 0,33       | 0,03      |                                                                       |
| Observações                    | 3          | 3         |                                                                       |
| Hipótese da diferença de média | 0          |           |                                                                       |
| gl                             | 2          |           |                                                                       |
| Stat t                         | 2,8410     |           | P>0,05<br><br><- tcrít < Stat t < tcrít                               |
| P(T<=t) bi-caudal              | 0,1048     |           |                                                                       |
| t crítico bi-caudal            | 4,3027     |           |                                                                       |

| Módulo - Análise 7 dias        | Referência | 0,15% NTC | Análise                                                            |
|--------------------------------|------------|-----------|--------------------------------------------------------------------|
| Média                          | 28,25      | 30,92     | Hipótese nula ACEITA<br>A diferença das médias NÃO é significativa |
| Variância                      | 0,09       | 1,91      |                                                                    |
| Observações                    | 3          | 3         |                                                                    |
| Hipótese da diferença de média | 0          |           |                                                                    |
| gl                             | 2          |           |                                                                    |
| Stat t                         | -3,2753    |           |                                                                    |
| P(T<=t) bi-caudal              | 0,0819     |           | P>0,05                                                             |
| t crítico bi-caudal            | 4,3027     |           | <- tcrít < Stat t < tcrít                                          |

| Módulo - Análise 7 dias        | Referência | 0,30% NTC | Análise                                                               |
|--------------------------------|------------|-----------|-----------------------------------------------------------------------|
| Média                          | 28,25      | 27,59     | Hipótese nula ACEITA<br>A diferença das médias<br>NÃO é significativa |
| Variância                      | 0,09       | 1,99      |                                                                       |
| Observações                    | 3          | 3         |                                                                       |
| Hipótese da diferença de média | 0          |           |                                                                       |
| gl                             | 2          |           |                                                                       |
| Stat t                         | 0,7875     |           |                                                                       |
| P(T<=t) bi-caudal              | 0,5135     |           | P>0,05                                                                |
| t crítico bi-caudal            | 4,3027     |           | <- tcrít < Stat t < tcrít                                             |

| Módulo - Análise 28 dias       | Referência | 0,15% NTC | Análise                                                           |
|--------------------------------|------------|-----------|-------------------------------------------------------------------|
| Média                          | 32,97      | 34,66     | Hipótese nula REJEITADA<br>A diferença das médias é significativa |
| Variância                      | 0,18       | 0,15      |                                                                   |
| Observações                    | 3          | 3         |                                                                   |
| Hipótese da diferença de média | 0          |           |                                                                   |
| gl                             | 4          |           |                                                                   |
| Stat t                         | -5,0299    |           |                                                                   |
| P(T<=t) bi-caudal              | 0,0073     |           | P<0,05                                                            |
| t crítico bi-caudal            | 2,7764     |           | Stat t <- tcrít < tcrít                                           |

| Módulo - Análise 28 dias       | Referência | 0,30% NTC | Análise                                                               |
|--------------------------------|------------|-----------|-----------------------------------------------------------------------|
| Média                          | 32,97      | 30,92     | Hipótese nula ACEITA<br>A diferença das médias<br>NÃO é significativa |
| Variância                      | 0,18       | 0,96      |                                                                       |
| Observações                    | 3          | 3         |                                                                       |
| Hipótese da diferença de média | 0          |           |                                                                       |
| gl                             | 3          |           |                                                                       |
| Stat t                         | 3,3170     |           |                                                                       |
| P(T<=t) bi-caudal              | 0,0500     |           | P>0,05                                                                |
| t crítico bi-caudal            | 3,1824     |           | tcrít < Stat t < tcrít                                                |