



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CAMPUS FLORIANÓPOLIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

André Valmir Saugo Ribeiro

**ALTERNATIVA PARA DIMINUIÇÃO DO CONSUMO DE CIMENTO PORTLAND  
EM CONCRETOS: UTILIZAÇÃO DE NANOTUBOS DE CARBONO DE PAREDES  
MÚLTIPLAS**

Florianópolis

2023

André Valmir Saugo Ribeiro

**ALTERNATIVA PARA DIMINUIÇÃO DO CONSUMO DE CIMENTO PORTLAND  
EM CONCRETOS: UTILIZAÇÃO DE NANOTUBOS DE CARBONO**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Civil – PPGEC da Universidade  
Federal de Santa Catarina como requisito parcial à  
obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Philippe Jean Paul Gleize

Florianópolis

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Saugo Ribeiro, André Valmir

ALTERNATIVA PARA DIMINUIÇÃO DO CONSUMO DE CIMENTO  
PORTLAND EM CONCRETOS: UTILIZAÇÃO DE NANOTUBOS DE CARBONO  
/ André Valmir Saugo Ribeiro ; orientador, Philippe Jean  
Paul Gleize, 2023.

145 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Engenharia Civil. 3. Nanotubos  
de carbono. 4. Concreto. I. Gleize, Philippe Jean Paul.  
II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós  
Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

André Valmir Saugo Ribeiro

**Alternativa para diminuição do consumo de cimento Portland em concretos:  
utilização de nanotubos de carbono de paredes múltiplas**

O presente trabalho em nível de Doutorado foi avaliado e aprovado, em 20 de dezembro de 2022, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Marcelo Henrique Farias de Medeiros  
Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Prof. Dr. Peter Ludvig  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET – MG)

Prof Dr. Luiz Roberto Prudêncio Jr.

Prof. Dr. Fernando Pelisser  
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil

---

Prof. Dr. Philippe Jean Paul Gleize  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação

---

Prof. Dr. Philippe Jean Paul Gleize  
Orientador

Florianópolis, 2023.



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço inicialmente aos meus pais, minha família e a minha esposa por todo o suporte e incentivo ao longo de toda minha vida pessoal e profissional. Vocês me inspiram e me fortalecem todos os dias nessa caminhada. Amo vocês!

Em especial a você, Ana Paula Schervinski Villwock, por compartilhar todos os momentos dessa jornada comigo. Todo seu apoio sempre me deu forças para continuar em frente, sem você nada disso seria possível. Você me inspira a cada dia que passo ao seu lado. Obrigado por me fazer uma pessoa e profissional melhor. Te amo meu amor!

Obrigado a todos os professores do programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC-UFSC) pelo conhecimento. Em especial, ao meu orientador, professor Philippe Jean Paul Gleize, pela oportunidade e confiança para realizar essa etapa da minha vida profissional. Obrigado por sua compreensão nos momentos mais difíceis da minha caminhada e pelas palavras em cada conversa que ajudaram a me tornar uma pessoa melhor. Você é uma pessoa e um profissional que faz com que seus orientados se espelhem. Vou levar você sempre em meu coração.

A colega, amiga, comadre e irmã, Jéssyca Mendes da Silva, por toda parceria, amizade e companheirismo. Você é uma pessoa que levarei comigo sempre em meu coração. Obrigado minha irmã de coração.

Aos colegas de trabalho do laboratório Laboratório de Aplicações de Nanotecnologia em Construção Civil (NANOTEC – UFSC), todos vocês foram de extrema importância em minha vida. Lucas Onghero, Lucas Quintanilha, Ariane Rubin, Jéssyca Mendes, Laura Silvestro, Artur Ruviano, Alex Taira, Manuela Menger, Paulo Matos, Rafael Sakata, Francine Padilha, Madeleine Barraza, Nágilla Azevedo, Vanessa Cesari, Valkiria Padilha, Giovanny Ramos. Desejo todo o sucesso do mundo para cada um de vocês. Obrigado por tudo.

Ao programa de pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC-UFSC) pela oportunidade de estudar em uma das melhores Universidades do país. Obrigado a todas as pessoas que estão por trás do programa por dar todo suporte para nós estudantes. Em especial, a Priscila e ao Wagner que sempre que preciso me auxiliaram tirando quaisquer dúvidas que tive. Vocês são de extrema importância ao programa, obrigado por tudo.

Ao Laboratório de Aplicações de Nanotecnologia em Construção Civil (NANOTEC – UFSC) por proporcionar aos seus alunos uma das melhores estruturas e condições para o desenvolvimento das pesquisas acadêmicas.

Ao Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC – UFSC) e aos professores que fazem parte, por toda estrutura para desenvolver minhas pesquisas. Em especial, aos técnicos administrativos que estão presentes todos os dias no laboratório. Luiz, Renato e Nivaldo. Obrigado pela troca de experiências e pela disposição a auxiliar no prosseguimento das pesquisas que são executadas no laboratório.

Ao Laboratório de Solos e Tecnologia de Materiais – IFSC e aos professores Alexandre de Oliveira e Andrea Betioli pelo suporte e disponibilização do laboratório para realizar os ensaios de reologia em concreto. Vocês são pessoas incríveis, obrigado pela receptividade e pelo auxílio em todas as etapas referentes a esse ensaio.

Por fim, à CAPES, CNPQ e FAPESC pelo apoio financeiro.

## RESUMO

A utilização da nanotecnologia em compósitos cimentícios vem sendo amplamente estudada nos últimos anos. Dentro desse contexto, existem vários tipos de nanomateriais que podem aprimorar as características de compósitos cimentícios, como o nanotubo de carbono (NTC). Os nanotubos de carbono podem ser de paredes simples (NTCPS) ou múltiplas (NTCPM), sendo estes últimos o produto mais encontrado no mercado. Portanto, é de suma importância entender seu comportamento quando inserido em compósitos cimentícios. Muitos trabalhos vêm relatando a utilização desse nanoproduto principalmente em pastas de cimento Portland e argamassas. Contudo, ainda são poucos os trabalhos encontrados na literatura que estudam a utilização desse nanomaterial em concreto de cimento Portland. Com isso em mente, o presente estudo teve como objetivo utilizar o NTCPM para produção de concretos com diminuição do consumo de cimento Portland sem alterar sua resistência à compressão aos 28 dias. Para isso, foram produzidas argamassas para determinar o método de dispersão e inserção na mistura cimentícia e o grau de redução ideal do consumo de cimento Portland que acarretasse resistência semelhante entre a mistura de referência e aquela com a inserção de MWCNT. Foi encontrado que o teor ideal de diminuição do consumo de cimento Portland foi de 10%, com o qual foram produzidos concretos com três relações a/c diferentes para analisar melhor seu comportamento. Ainda, além do concreto referência (REF) e do concreto com NTCPM com diminuição do consumo de 10% de cimento Portland (S10), foram produzidos concretos com NTCPM sem aplicar diminuição do consumo de cimento Portland (MWCNT) e com diminuição do consumo de cimento Portland com teor ideal de diminuição do consumo de cimento Portland sem o NTCPM (SW10). As propriedades reológicas dos concretos foram alteradas pela utilização do NTCPM, portanto, houve aumento dos parâmetros reológicos tensão de escoamento e viscosidade dos concretos produzidos com o nanomaterial, independentemente da relação a/c utilizada. Além disso, o ensaio de retração e de módulo de elasticidade mostrou que concretos com a inserção do NTCPM resultaram em melhoramentos nesses dois quesitos. O ensaio de absorção por imersão indicou que a inserção do nanomaterial não fez alterar a porosidade aberta do compósito, ou seja, o índice de vazios não sofreu alteração significativa pela inserção do nanomaterial. Foram também realizadas análises de microestrutura e cinética de hidratação de pastas produzidas com o NTCPM, com e sem o teor ideal de diminuição do consumo de cimento Portland. Para isso, foram realizados os ensaios de calorimetria isotérmica, difratometria em raios-x (DRX) e Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR). Os resultados desses ensaios mostraram que não houve formação de novas fases/compostos resultados do processo de hidratação das partículas de cimento Portland pela inserção do NTCPM. Assim, os aprimoramentos das propriedades mecânicas e retração por secagem dos concretos com a presença do NTCPM foram atribuídos a seu efeito físico de preenchimento e de ponte de ligação. Foi observado que se conseguiu produzir concreto com diminuição do consumo de cimento Portland com o teor ideal de 10% com o NTCPM (S10) com mesma resistência do concreto de referência (REF), demonstra, portanto, que a utilização de NTCPM pode ser uma ferramenta sustentável na indústria da construção civil, diminuindo o consumo de cimento Portland em concretos.

Palavras-chave: nanotubos de carbono, concretos de cimento Portland, consumo de cimento Portland, resistência à compressão.

## ABSTRACT

The use of nanotechnology in cementitious composites has been widely studied in recent years. Within this context, there are several types of nanomaterials that can improve the characteristics of cement composites, such as carbon nanotubes (NTC). Carbon nanotubes can be single-walled (NTCPS) or multiple-walled (NTCPM), the most commonly found product on the market is NTCPM. Therefore, it is extremely important to understand its behavior when inserted in cementitious composites. Many works have been reporting the use of this nano product mainly in Portland cement pastes and mortars, there are still few works found in the literature that study the use of this nanomaterial in Portland cement concrete. With that in mind, the present study aimed to use NTCPM for the production of concrete with reduced consumption of Portland cement without changing its compressive strength at 28 days. For this, mortars were produced to determine the method of dispersion and insertion in the cement mixture and what would be the ideal reduction in the consumption of Portland cement that would cause similar resistance between the reference mixture and the one with the insertion of MWCNT. It was found that the ideal content to decrease the consumption of Portland cement was 10%, with this ideal content, concretes were produced with three different w/c ratios to better analyze their behavior. Also, in addition to reference concrete (REF) and concrete with NTCPM with a 10% reduction in the consumption of Portland cement (S10), concretes with NTCPM were produced without applying a reduction in the consumption of Portland cement (MWCNT) and with a reduction in the consumption of Portland cement with ideal content to reduce the consumption of Portland cement without NTCPM (SW10). The rheological properties of the concrete were altered by the use of NTPCM, therefore, there was an increase in the rheological parameters yield stress and viscosity of the concrete produced with the nanomaterial, regardless of the w/c ratio used. In addition, the shrinkage and elastic modulus test showed that concretes with the insertion of NTCPM resulted in improvements in terms of drying shrinkage and elastic modulus. The immersion absorption test indicated that the insertion of the nanomaterial did not change the open porosity of the composite, that is, the void index did not change significantly by the insertion of the nanomaterial. Analyzes of microstructure and hydration kinetics of pastes produced with NTCPM were also carried out, with and without the ideal content to decrease the consumption of Portland cement. For this, tests of isothermal calorimetry, x-ray diffraction (XRD) and Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) were performed. The results of these tests showed that there was no formation of new phases/compounds resulting from the hydration process of Portland cement particles by the insertion of NTCPM. Thus, the improvements in the mechanical properties and drying shrinkage of concrete with the presence of NTCPM were attributed to its physical effect of filling and bonding bridge. It was reported that it was possible to produce concrete with reduced consumption of Portland cement with the ideal content of 10% with NTCPM (S10) with the same strength as the reference concrete (REF), so this demonstrates that the use of NTCPM can be a tool in the construction industry, reducing the consumption of Portland cement in concrete.

Keywords: carbon nanotubes, cement Portland concrete, Portland cement consumption, compressive strength.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Cinética da hidratação do cimento	27
Figura 2 – Representação dos tipos de nanotubo de carbono: (a) nanotubo de carbono de parede simples (b) nanotubo de carbono de paredes múltiplas	34
Figura 3 – Esquematização da camada de grafeno se enrolando e formando nanotubo de carbono.	36
Figura 4 – Diferentes disposições geométricas que o nanotubo de carbono pode apresentar	37
Figura 5 – Resultados da viscosidade plástica em argamassa com a adição de nanotubo de carbono	40
Figura 6 – Abatimento de concretos produzidos com diferentes modos de dispersões de nanotubos de carbono: (AQUA) dispersão do fabricante; (CD) dispersão realizada pelo autor; (SD) misturado à seco.	41
Figura 7 - Resultados de ensaios reológicos em concreto de ultra alto desempenho com Nanofibras de carbono (NFC)	42
Figura 8 – NTC na região de fissura da matriz cimentícia	43
Figura 9 – NTC auxiliando na zona de fissura da pasta de cimento Portland	44
Figura 10 – Resultados de resistência à compressão de pastas de cimento Portland com e sem adição de nanotubos de carbono	46
Figura 11 - Distribuição do tamanho de partículas do cimento Portland	57
Figura 12 - Granulometria dos agregados	58
Figura 13 – Preparo das soluções aquosas com NTCPM	63
Figura 14 – Argamassa produzida com NTCPM	63
Figura 15 - Equipamento para ensaio reológico de concreto	70
Figura 16 – Equipamentos utilizados no ensaio de retração de concreto	72
Figura 17 – Equipamento utilizado para realizar o ensaio de calorimetria isotérmica das amostras	74
Figura 18 - Reômetro Haake Mars III	75
Figura 19 - Equipamentos para realizar os ensaios de FTIR e DRX	76
Figura 20 – Resultados do índice e espalhamento das argamassas	78
Figura 21 - Resistência à compressão das argamassas	79
Figura 22 – Resultados de resistência à compressão das argamassas com diminuição do consumo de cimento Portland e com inserção de NTCPM	80
Figura 23 - Teor de ar incorporado e espalhamento das argamassas com teor de aditivo pré-fixado	81
Figura 24 - Teor de ar incorporado e quantidade de aditivo necessário para atingir o espalhamento pré-fixado	81
Figura 25 - Módulo de elasticidade dinâmico das argamassas com aditivo fixo	83
Figura 26 - Resistência à flexão das argamassas com aditivo fixo	84
Figura 27 - Resistência à compressão das argamassas com aditivo fixo	84
Figura 28 - Módulo de Elasticidade dinâmico das argamassas com espalhamento fixo	85
Figura 29 - Resistência à flexão das argamassas com espalhamento fixo	85
Figura 30 - Resistência à compressão das argamassas com espalhamento fixo	86

Figura 31 - Fotos dos concretos produzidos REF, MWCNT, SW10 e S10	89
Figura 32 – Ensaio de abatimento de tronco de cone dos concretos produzidos	89
Figura 33 – Resultado de teor de ar incorporado no estado fresco dos concretos	91
Figura 34 - Resultados do ensaio de reometria dos concretos, curvas torque vs velocidade	93
Figura 35 – Resultado de resistência à compressão aos 3 dias dos concretos	95
Figura 36 – Resultado de resistência à compressão aos 28 dias dos concretos	95
Figura 37 – Resultado de módulo de elasticidade aos 3 dias dos concretos	100
Figura 38 – Resultado de módulo de elasticidade aos 28 dias dos concretos	100
Figura 39 – Resultados do ensaio de retração por secagem dos concretos com relação a/c 0,48	103
Figura 40 - Resultados do ensaio de retração por secagem dos concretos com relação a/c 0,53	104
Figura 41 - Resultados do ensaio de retração por secagem dos concretos com relação a/c 0,58	104
Figura 42 – Resultado de absorção de água dos concretos aos 28 dias	106
Figura 43 – Resultado do índice de vazios dos concretos aos 28 dias	107
Figura 44 – Resultado do ensaio de mini <i>slump</i> das pastas	111
Figura 45 – Resultado do ensaio reológico em pastas (curvas de fluxo)	112
Figura 46 – Resultados referente ao ensaio de calorimetria isotérmica das pastas	116
Figura 47 – Resultados do ensaio de DRX nas pastas de cimento Portland	119
Figura 48 - Resultados do ensaio de FTIR para as pastas com e sem NTCPM para todas as relações a/c utilizadas aos 3 dias	122

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Cimentos Portland produzidos no Brasil	29
Tabela 2 – Caracterização física e química do cimento	57
Tabela 3 – Caracterizações do aditivo dispersante utilizado	59
Tabela 4 – Características do NTCPM	60
Tabela 5 - Quantitativos das argamassas produzidas para determinação do índice de argamassa	61
Tabela 6 - Quantitativos dos insumos referentes a argamassa produzidas com e sem as soluções aquosas	63
Tabela 7 – Quantitativos dos insumos referente as argamassas produzidas com e sem diminuição do consumo de cimento Portland	64
Tabela 8 - Quantitativos dos insumos para produção das argamassas com aditivo e espalhamento fixo	66
Tabela 9 – Quantitativos dos insumos referentes aos concretos produzidos	67
Tabela 10 - Composição das pastas	73
Tabela 11 - Propriedades dos concretos no estado fresco e seus respectivos parâmetros reológicos	93
Tabela 12 – Comparação entre as médias de resistência à compressão dos concretos REF e S10	99
Tabela 13 - Comparação entre as médias de módulo de elasticidade dos concretos REF e S10	103
Tabela 14 - Resultados do ensaio de absorção de água por imersão em concreto	108
Tabela 15 – Dados determinados dos coeficientes pelo modelo de Herschel-Bulkley	113
Tabela 16 – Parâmetros calorimétricos das pastas de cimento Portland analisadas	118

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/agl – relação água/aglomerante

a/c – relação água/cimento

DRX – difratometria de raios-x

FTIR – espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier

FRX – fluorescência de raios-x

MET – microscopia eletrônica de transmissão

MEV – microscopia eletrônica de varredura

NANOTEC – laboratório de aplicações de nanotecnologia em construção civil

NTC – nanotubo de carbono

NTCPM – nanotubo de carbono de paredes múltiplas

NTCPS - Nanotubo de carbono de parede simples

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
1.1 JUSTIFICATIVA E INEDITISMO .....	16
1.2 OBJETIVO GERAL.....	17
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	17
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>18</b>
2.1 CONCRETO.....	18
2.1.1 Cimento Portland .....	21
2.1.2 Agregados.....	25
2.1.3 Aditivo dispersante .....	26
2.2 ESTADO FRESCO DO CONCRETO .....	27
2.3 NANOTUBOS DE CARBONO.....	29
2.4 APLICAÇÃO DE NANOTUBOS DE CARBONO EM MATRIZES CIMENTÍCIAS .....	33
2.4.1 Estado Fresco .....	33
2.4.2 Estado Endurecido .....	38
2.5 SUBSTITUIÇÃO DE CIMENTO PORTLAND POR NTCPM E A IMPORTÂNCIA AMBIENTAL .....	46
2.6 SÍNTESE DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	48
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>50</b>
3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS INSUMOS.....	50
3.1.1 Cimento Portland .....	50
3.1.2 Agregados miúdos e graúdos .....	52
3.1.3 Aditivo .....	53

3.1.4	NTCPM .....	53
3.1.5	Água.....	54
3.2	PRODUÇÃO DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS .....	54
3.2.1	Determinação dos parâmetros a serem utilizados .....	54
3.2.2	Concretos.....	61
3.2.3	Pastas .....	66
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>71</b>
4.1	DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS A SEREM UTILIZADOS.....	71
4.1.1	Composição ideal dos agregados miúdos.....	71
4.1.2	Solução aquosa ideal para produção dos concretos.....	73
4.1.3	Diminuição do consumo de cimento Portland .....	74
4.1.4	Influência dos parâmetros fixos.....	74
4.2	CONCRETOS .....	83
4.2.1	Estado fresco .....	83
4.2.2	Estado endurecido .....	90
4.2.3	Síntese dos resultados em concreto .....	105
4.3	PASTAS .....	105
4.3.1	Estado Fresco .....	106
4.3.2	Hidratação e microestrutura das pastas.....	110
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>119</b>
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	119
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>122</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>123</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A utilização de nanomateriais em misturas à base de cimento Portland tem sido amplamente estudada, uma vez que ela pode ajudar a aprimorar características de misturas cimentícias, tais como propriedades mecânicas em geral e sua capacidade de absorver deformações.

Portanto, sabe-se que a utilização de materiais em escala nanométrica pode trazer benefícios para a mistura cimentícia na escala macrométrica. Isso ocorre, geralmente, devido à sua elevada área superficial específica, morfologia, alta reatividade e elevadas propriedades mecânicas (ELKASHEF; WANG; ABOU-ZEID, 2016; MA; QIAN; KAWASHIMA, 2018). Entretanto, os nanomateriais tendem a sofrer com o fenômeno de aglomeração, devido à alta força de atração entre as nanopartículas, chamada de força de van der Waals (REALES et al., 2016; RASHAD, 2017). Ou seja, a aglomeração faz com que os nanomateriais não desempenhem seu papel da forma mais eficaz no compósito cimentício pela dificuldade de dispersão. Verificaram-se na literatura trabalhos indicando que, sem uma boa qualidade na dispersão do nanomaterial, sua utilização não traz benefícios para as propriedades mecânicas em pasta de cimento Portland (KUMAR *et al.*, 2012; AYDIN *et al.*, 2018).

Assim, verifica-se que a dispersão uniforme dos nanomateriais é de suma importância para que sua função seja desempenhada de maneira adequada (KONSTA-GDOUTOS; METAXA; SHAH, 2010). Dentre as técnicas mais utilizadas para a sua dispersão, destacam-se o método químico – funcionalização do nanomaterial através do enxerto de grupos químicos funcionais – e o método físico – que atua por meio de sua dispersão em meio aquoso (com ou sem aditivo dispersante) a partir da aplicação de ondas ultrassônicas (LI; WANG; ZHAO, 2005; SINGH et al., 2013).

Inúmeros nanomateriais podem ser utilizados na área da construção civil, tal como o nanotubo de carbono (NTC). O NTC pode ser descrito como um agrupamento de átomos de carbono em formato cilíndrico em ligações hexagonais, e distribuídos em uma rede bidimensional, a qual é chamada de grafeno (LUSHNIKOVA; ZAOU, 2013).

2018). Pode-se dizer que o NTC é uma forma alótropa<sup>1</sup> de carbono, e geralmente é classificado conforme o número de camadas de grafeno que têm, sendo o nanotubo de carbono de paredes simples (NTCPS) ou nanotubo de carbono de paredes múltiplas (NTCPM), (IIJIMA, 1991) .

Esse nanomaterial é caracterizado por ter notáveis propriedades mecânicas e termoelétricas, com ligações químicas dos átomos de carbono inteiramente  $Sp^2$ , caracterizando um elevado módulo de elasticidade que pode atingir o valor de até 950 GPa (YU et al., 2000). Esses fatos fazem com que os NTCs sejam um dos materiais mais resistentes e rígidos encontrados (MA *et al.*, 2010). Em vista disso, os NTCs têm sido estudados e aplicados em diversos campos da ciência, como em misturas cimentícias na área da construção civil.

A adição de NTC em pastas, argamassas e concretos faz com que suas propriedades no estado fresco e endurecido sejam modificadas. Na maioria das vezes, quando há uma dispersão de boa qualidade na matriz cimentícia, os resultados de resistência mecânica são aprimorados (LUDVIG et al., 2009; NASIBULIN et al., 2009; CHAIPANICH et al., 2010; MANZUR; YAZDANI, 2014; KANG; SEO; PARK, 2015; BALOCH; KHUSHNOOD; KHALIQ, 2018). Esse aprimoramento ocorre pelo efeito ocasionado pelos NTCs, que criam pontes de ligação com a matriz, fazendo com que haja uma melhor distribuição de tensões, bem como a diminuição ou até mesmo a mitigação da propagação de microfissuras e a redução da porosidade (CHOWDHURY et al., 2012; ZOU et al., 2015; HAWREEN; BOGAS; DIAS, 2018; HAWREEN; BOGAS, 2019).

Em relação à cinética de hidratação de compósitos cimentícios com NTC, salienta-se que a utilização do NTC em pastas e argamassas pode modificar a cinética de hidratação das partículas de cimento devido à criação de pontos de nucleação, provocando uma densificação da matriz e, desse modo, fornecendo mais espaços para a hidratação das partículas de cimento (MAKAR; MARGESON; LUH, 2005; SINGH et al., 2013; PARVEEN et al., 2015). Porém, alguns trabalhos relatam que a utilização de NTC pode gerar aglomerados do nanomaterial que acarreta retardo no processo de hidratação das partículas de cimento Portland (ISFAHANI *et al.*, 2016; SIKORA *et al.*, 2019). Outros estudos indicam ainda que a inserção de NTC não

---

<sup>1</sup> Alotropia é uma propriedade em que um mesmo elemento químico pode originar duas ou mais substâncias simples diferentes.

alteraria a cinética de hidratação, e que os aprimoramentos relacionados à utilização de NTC são essencialmente ocasionados por efeito de preenchimento de vazios e por ligação de fissuras (AMIN et al., 2015; TAFESSE; KIM, 2019; ANDRADE NETO et al., 2021; SILVESTRO, 2022). Entretanto, segundo Rashad (2017), a maioria dos relatos encontrados na literatura é de que o NTC promove o efeito de aceleração no processo de hidratação. Assim, verifica-se que a influência do nanomaterial sobre a cinética de hidratação das partículas de cimento Portland não é um consenso.

Para a análise da influência do NTC sobre os parâmetros reológicos de compósitos cimentícios, verificou-se que há uma gama de estudos relatando que o NTC promove aumento da tensão de escoamento e viscosidade (FAROOQ *et al.* 2020; ANDRADE NETO *et al.* 2021; SILVESTRO, 2022). Em relação a isso, a adição de NTC em pasta de cimento Portland faz com que ocorra a modificação de seus parâmetros reológicos, aumentando, geralmente, a viscosidade plástica devido ao aumento da concentração de partículas sólidas, bem como a tensão de escoamento, correspondente ao aumento do atrito entre as partículas (KONSTA-GDOUTOS; METAXA; SHAH, 2010).

Em relação ao fenômeno de retração autógena dos compósitos de cimento Portland, a inserção de NTC faz com que esse fenômeno seja diminuído devido aos efeitos que esse nanomaterial produz, sendo eles: efeito de preenchimento de vazios, promovendo a diminuição da quantidade de poros finos entre os produtos de hidratação, e acarretando diminuição das tensões capilares; aceleração no processo da hidratação das partículas de cimento; e efeito de ponte de ligação, que restringe a deformação por contração (HAWREEN et al., 2018).

Com os indicativos de que o NTC pode promover aprimoramento das propriedades mecânicas de compósitos cimentícios, verifica-se que há uma possibilidade de diminuir o consumo de cimento Portland de compósitos cimentícios pela inserção do nanomaterial sem acarretar perda de resistência à compressão. Portanto, em misturas cimentícias, a diminuição do consumo de cimento Portland é desejada e de grande relevância no que se refere à preocupação com a poluição do meio ambiente, uma vez que a diminuição do consumo de cimento acarreta a redução do impacto ambiental negativo causado pela produção deste ligante.

Segundo Meyer (2009), para cada tonelada de cimento Portland produzida, libera-se cerca de uma tonelada de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), e ainda há uma

estimativa de que até 2030 a produção de cimento Portland terá atingido a quantidade de 4 bilhões de toneladas por ano (KLEE, 2004). Segundo Andrew (2019), a indústria de cimento contribui com cerca de 8% das emissões de CO<sub>2</sub> totais globais. Levantamentos recentes indicam que a produção global de cimento Portland atingiu o valor de  $4,1 \times 10^{12}$  Kg em 2020 (HATFIELD,2021). Sabendo que a emissão de CO<sub>2</sub> para produção de cimento atinge valores entre 0,5 kg e 0,7 kg de CO<sub>2</sub> por kg de cimento, os valores dessa emissão podem estar entre  $2,05 \times 10^{12}$  e  $2,87 \times 10^{12}$  kg de CO<sub>2</sub> por ano. Além disso, a produção de cimento Portland representa 90% da emissão de CO<sub>2</sub> emitido pela indústria do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Cabe ressaltar ainda que, segundo Licht (2017), há um grande potencial de produção de NTC a partir da captura do carbono presentes nos gases poluentes emitidos por meio da produção de cimento Portland. Assim, além de diminuir os gases poluentes emitidos pela produção do cimento Portland, agregaria-se valor por meio da produção de um material relativamente caro no mercado (NTC).

Em todos os trabalhos levantados sobre NTC em matrizes cimentícias, os autores inserem o NTC e avaliam o desempenho do compósito cimentício. Nesta proposta, a abordagem é diferente: propõe-se retirar cimento da matriz, compensando a sua perda de resistência mecânica pela utilização de NTC. Além disso, foi proposto no presente estudo que nanotubos já funcionalizados não necessariamente dependam de métodos de dispersão de grande dificuldade de aplicação na área da construção civil, como a dispersão por ondas ultrassônicas.

## 1.1 JUSTIFICATIVA E INEDITISMO

É relevante compreender os efeitos da utilização de NTCPM em matrizes cimentícias para que sua aplicação na prática seja feita de forma eficaz. Se não há clareza dos benefícios do material e do motivo de sua aplicação na prática, esta fica sem sentido e até fadada ao fracasso.

Assim, para o presente estudo, adotou-se utilizar o NTCPM para produção de concreto com mesma resistência do que o concreto sem NTCPM, com diminuição do consumo de cimento Portland e com mesma relação a/c. E, com isso, foi analisada a influência da utilização do nanomaterial nas propriedades nos estados fresco e endurecido dos concretos com e sem a utilização do NTCPM. Vale ressaltar que não há estudos que fazem essa comparação em concreto de cimento Portland, e que não foram encontrados estudos que utilizam o nanomaterial com este objetivo em concreto. Ademais, a utilização de NTCPM no presente estudo não contou com o método de dispersão por ondas ultrassônicas, o que facilita seu uso no mercado da construção civil. Ainda, o tipo de concreto escolhido foi do Grupo I da NBR 8953 (2015), pois este grupo compreende a classe de resistência de concretos entre 20 MPa e 55 MPa, que é a classe de resistência à compressão mais utilizada em obras do cotidiano da construção civil.

Com a diminuição do consumo de cimento Portland para produzir um concreto de mesma resistência com a incorporação de NTCPM, o estudo estará contribuindo para a redução do impacto ambiental negativo descontrolado causado pela emissão de gases poluentes ao meio ambiente por meio da produção do cimento Portland.

## 1.2 OBJETIVO GERAL

Diminuir o consumo de cimento Portland de concreto sem alterar sua resistência à compressão aos 28 dias pela inserção de NTCPM.

## 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar estudo em argamassa para encontrar teor ótimo de redução do consumo de cimento Portland pela inserção de NTCPM em argamassa;
- Utilizar NTCPM para produzir concretos com mesma resistência à compressão aos 28 dias do concreto de referência com menores consumos de cimento Portland;
- Analisar a influência do nanomaterial nas propriedades mecânicas, reológicas e microestruturais dos compósitos cimentícios produzidos.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 CONCRETO

Sabe-se que o conceito clássico de concreto de cimento Portland é: produto originado a partir de material com características ligantes (cimento Portland e materiais cimentícios suplementares) em conjunto de partículas ou fragmentos de agregados (agregado graúdo e agregado miúdo), água e aditivo. Para se obter um concreto em que suas características não sejam prejudicadas devido aos insumos utilizados, deve-se escolhê-los cuidadosamente, já que estes têm influência direta nas suas propriedades tanto no estado endurecido como no estado fresco do concreto.

As propriedades que quantificam a resistência e a deformação do concreto são a resistência mecânica e o módulo de elasticidade. Ainda, deve-se garantir que a durabilidade da estrutura mantenha o seu desempenho ao longo da vida útil que foi idealizada. Para garantia desse desempenho devem ser analisadas propriedades como a porosidade e a permeabilidade de água e íons.

A formação de vazios e a possível segregação e/ou exsudação no concreto também afetam as propriedades do concreto no estado endurecido. Segundo Neville (2016), a porosidade é uma propriedade que tem grande relevância no comportamento da pasta, já que sua durabilidade e seu desempenho mecânico estão atrelados ao volume de vazios contidos nela.

Além disso, pode-se dizer que além das diferentes composições dos concretos, os processos de lançamento e adensamento influenciam nas suas propriedades, uma vez que esses processos podem contribuir para aumentar ou diminuir o volume de vazios do concreto.

A resistência mecânica do concreto, de grande relevância para sua aplicação, é normalmente relacionada pela relação água/cimento da mistura. Sua especificação em projetos normalmente é feita pela relação água/cimento utilizada e a idade idealizada pelo projetista.

Porém, há fatores microestruturais, tais como a porosidade do concreto e o grau de hidratação do cimento, que interferem diretamente na resistência à compressão do produto. Além disso, a quantidade e a qualidade dos agregados que são empregados na produção do concreto também podem ter influência na sua

resistência à compressão. Assim, pode-se dizer que essa característica do concreto pode ser uma ferramenta de grande relevância no que se refere à qualidade da mistura cimentícia.

Uma maneira que se tornou de fácil aplicação em concretos é a utilização de adições minerais. Esta aplicação se torna viável devido aos efeitos que normalmente apresenta, sendo eles um melhor empacotamento da matriz e da mistura, através do efeito *filler*; a atividade pozolânica; e a criação de novos pontos de nucleação heterogênea, aprimorando a sua microestrutura e conseqüentemente as suas propriedades no estado endurecido.

Materiais cimentícios suplementares ou adições minerais são geralmente materiais silicosos normalmente finamente divididos, e, quando em contato com o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) em um meio úmido, reagem formando silicato de cálcio hidratado (C-S-H) (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Esses materiais são utilizados geralmente em quantidades que variam entre 6% até 70% em relação à massa do cimento Portland.

Segundo Mehta e Monteiro (2014), o hidróxido de cálcio ou Portlandita ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) é um produto resultante da hidratação das partículas de cimento que tem como característica baixa resistência em relação ao C-S-H. Este produto geralmente fica alocado na região de transição entre pasta<sup>2</sup>/agregado. Quanto maior a quantidade desse produto na zona de transição, maior será a sua influência. A partir dessa afirmação, verifica-se que a inclusão de material cimentício suplementar em um concreto deve promover melhoras em suas propriedades mecânicas e durabilidade.

Nesse contexto, pode-se ressaltar que muitos estudos atualmente têm tratado da utilização de materiais em escala nanométrica para se obter melhoras nas propriedades mecânicas e na durabilidade de concretos. Podemos citar aqui como exemplos a nanosílica e os nanotubos de carbono (que é o objeto de estudo do presente trabalho). É importante comentar que, embora tenham sido citados apenas dois exemplos de nanomateriais utilizados em misturas cimentícias, existem outros nanomateriais que também são empregados.

Os nanomateriais têm como características principais suas elevadas áreas superficiais e seu tamanho menor do que os materiais comumente utilizados. Essas características promovem aos compósitos cimentícios maior compacidade das

---

<sup>2</sup> Mistura entre o ligante hidráulico com a água.

matrizes cimentícias, efeito de preenchimento, diminuição da porosidade, modificação da cinética de hidratação das partículas de cimento Portland, entre outras. Portanto, a inserção de nanomateriais em compósitos cimentícios tem como objetivo produzir concretos com melhores propriedades mecânicas e mais duráveis. A proposta deste trabalho é outra: manter as características mecânicas, reduzindo o consumo de cimento. Além das propriedades mecânicas e da durabilidade, a adição de nanomateriais pode atribuir novas propriedades ao concreto, possibilitando novas aplicabilidades. Entretanto, há um grande desafio na inserção desses nanomateriais em compósitos cimentícios: esses insumos tendem a sofrer com o fenômeno de aglomeração, o que prejudica a função do nanomaterial no compósito cimentício. Muitos trabalhos na literatura indicam que a aglomeração do nanomaterial compromete o desempenho mecânico do compósito cimentício (MENDOZA-REALES, et al., 2016; ZHOU et al., 2017; DAHLAN, 2021).

Ainda sobre os insumos do concreto é importante falar sobre os agregados miúdo e graúdo. Os fragmentos de agregados geralmente utilizados para um concreto convencional<sup>3</sup> são a brita e a areia. Agregados podem ser definidos como materiais granulares normalmente inertes, sem forma e volume definidos, e com dimensões e propriedades adequadas para a utilização em obras da construção civil. Geralmente o concreto convencional é produzido com dois tipos de agregados: o miúdo e o graúdo – a caracterização de um ou outro se dá por suas dimensões.

O agregado graúdo é caracterizado por ter uma dimensão mínima característica de 4,75mm. Já o agregado miúdo é caracterizado por possuir dimensão máxima característica de 4,75mm. Os agregados podem ser rochas britadas, fragmentos rolados no leito dos cursos d'água e materiais encontrados em jazidas, provenientes de alterações de rochas.

Por fim, segundo a ABNT NBR 11768 (2011), aditivos químicos são produtos que, quando implementados em concretos à base de cimento Portland, modificam algumas de suas propriedades, com o intuito de melhor adequá-las às condições requisitadas ou desejadas. Há vários tipos de aditivos no mercado da construção civil, porém, o aditivo mais utilizado em obras é o aditivo dispersante, mais conhecido como aditivo redutor de água ou superplastificante.

---

<sup>3</sup> Concreto convencional é a mistura de cimento Portland, agregados, água e aditivo normalmente produzida em obras do dia a dia no âmbito da construção civil

Esse aditivo é o mais utilizado devido à grande demanda atual de obras que tem como pré-requisito misturas cimentícias de elevada resistência e conseqüentemente baixa relação água/aglomerantes. Seu efeito é garantir a repulsão entre as partículas de cimento. Essa repulsão confere à mistura uma maior fluidez, ou seja, promove maior abatimento para uma mistura cimentícia (RIXOM; MAILVAGANAM, 2002).

Neste estudo será adotado o termo “concreto padrão”, que compreenderá os concretos correspondentes à classe de resistência do Grupo 1, cuja resistência à compressão varia de 20 a 55 MPa, conforme a NBR 8953 (2015), bem como os concretos que atinjam o abatimento entre  $190 \text{ mm} \pm 30 \text{ mm}$ .

Essa classe de resistência e esse abatimento foram escolhidos devido à sua grande aplicação no cotidiano da construção civil. Assim, pode-se verificar a aplicação deste estudo no mercado da construção civil.

### 2.1.1 Cimento Portland

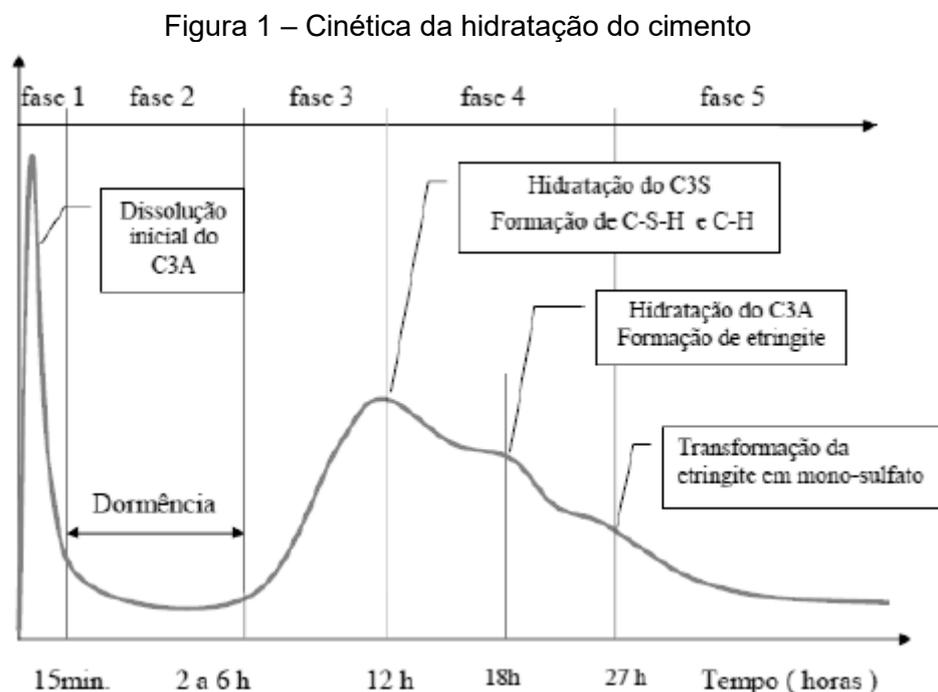
A reação de hidratação do cimento Portland inicia quando há o contato entre o ligante e a água. Esse contato faz com que ocorram reações químicas, resultando em propriedade adesiva do cimento Portland. Segundo Mehta e Monteiro (2014), com a hidratação das partículas de cimento Portland ocorrem dois mecanismos. O primeiro é o de hidratação por dissolução-precipitação. Esse mecanismo ocorre pela dissolução dos compostos anidros em constituintes iônicos. Desse modo, formam-se hidratos em solução e, devido à baixa solubilidade destes hidratos, ocorre uma eventual precipitação, resultante da supersaturação da solução. O segundo mecanismo ocorre pela hidratação no estado sólido ou topo químico do cimento, o que faz com que transcorram reações diretamente na superfície do cimento anidro sem que os compostos entrem em solução. Nota-se que o primeiro mecanismo ocorre nos estágios iniciais da hidratação do cimento, enquanto o segundo ocorre em estágios posteriores, quando a mobilidade dos íons na solução se torna restrita.

- A hidratação das partículas de cimento acarreta a liberação de energia em forma de calor. Tal liberação de calor pela hidratação das partículas é influenciada pelo consumo de cimento empregado na mistura, pela proporção dos componentes do cimento (quantidade de  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  e  $C_4AF$ ), pela

adição mineral (quando utilizada) e pela maneira que é realizada a cura do concreto

Cimentos com maiores teores dos compostos anidros  $C_3S$  e  $C_3A$  liberam maior calor de hidratação nas primeiras idades, pois esses são os compostos que hidratam com maior rapidez devido à sua alta reatividade. Assim, quanto maior a porcentagem destes compostos no cimento, maior será a tendência de se obter resistência inicial com maior rapidez (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

O gráfico da liberação de calor devido à hidratação das partículas de cimento é apresentado na Figura 1.



Fonte: HEWLETT, adaptado por THOMAZ (2008)

Verifica-se que o gráfico é dividido em 5 fases ou etapas:

- A primeira etapa é responsável pela hidratação inicial da partícula de cimento, que acarreta a formação de uma camada superficial na partícula de cimento ocasionada pela formação de etringita. Essa camada dificulta a continuação da hidratação da partícula de cimento, isto é, provoca uma pausa na hidratação da partícula. Esse período da pausa da hidratação é chamado de período de dormência ou de indução;
- A segunda etapa consiste no período de dormência. Muitas teorias foram propostas para essa fase, entretanto, a mais aceita relata que a cinética

da reação sofre a influência da diminuição da taxa de dissolução, a qual é dependente da solução em relação à fase em dissolução (SCRIVENER; JUILLAND; MONTEIRO, 2015). Pode-se dizer que a reação é controlada pela concentração de íons na solução: quando atingem uma determinada concentração, os íons fazem com que a reação da cinética seja retomada;

- A terceira etapa é conhecida pela formação da portlandita (C-H) e o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que são formados devido à retomada do processo de hidratação das partículas de cimento;
- Na quarta etapa, ocorre a redução da taxa de produção de C-H e C-S-H, período de desaceleração;
- Na quinta e última etapa, ocorre a menor taxa de produção de C-H e C-S-H, e a transformação de etringita em monosulfoaluminato.

Os fatores físicos do cimento influenciam na cinética da sua hidratação, por exemplo, o grau de moagem influencia na hidratação das partículas de cimento. Portanto, quanto maior o grau de moagem do cimento (cimento mais fino), mais reativo ele é, acarretando aceleração do processo de hidratação devido à sua alta superfície específica.

Neville (2016) relata que existem várias formas de medir o grau de hidratação do cimento, sendo eles:

- Quantidade de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  na pasta;
- Calor desenvolvido na hidratação;
- Massa específica da pasta;
- Quantidade de água quimicamente combinada;
- Quantidade de cimento não hidratado.

Além disso, vale assinalar que a medição da resistência da pasta hidratada também pode ser um modo, ainda que indireto, de medir o grau de hidratação do cimento.

Sabe-se que cada cimento tem um tipo de comportamento, e, nessa lógica, é importante conhecer o tipo de cimento que irá ser utilizado para cada finalidade. Em tese, cimentos com maior pureza, maior grau de moagem e maior quantidade de

compostos C<sub>3</sub>A e C<sub>3</sub>S geralmente liberam maior calor de hidratação nas primeiras idades, fazendo com que o pico de temperatura seja maior e que se tenha uma maior resistência à compressão com menor tempo.

Segundo Mehta e Monteiro (2014), diferentes compostos liberam diferentes teores de calor nos diferentes dias, e há uma tendência dos cimentos com adições minerais liberarem menor quantidade de calor nas primeiras idades e obterem mais lentamente o ganho de resistência.

Ressalta-se que os cimentos produzidos no Brasil normalmente têm adições de *filler* calcário, escória de alto forno ou material pozolânico (este normalmente é a cinza volante), e todos devem ser enquadrados nas normas brasileiras que indicam a composição química e física a ser respeitada. Na Tabela 1, verifica-se os tipos de cimento conforme a norma brasileira ABNT NBR 16697 (2018), a classe de resistência e o tipo de adição.

Tabela 1 – Cimentos Portland produzidos no Brasil

<b>Tipo</b>	<b>Sigla</b>	<b>Classe de resistência (Mpa)</b>	<b>Escória granulada alto-forno (%)</b>	<b>Material Pozolânico (%)</b>	<b>Material Carbonático (%)</b>
<b>Cimento Portland comum</b>	Sem adição	25, 32 ou 40	0-5	0-5	0-5
	Com adição	25, 32 ou 40	0	0	6-10
<b>Cimento Portland composto</b>	CP II - E	25, 32 ou 40	6-34	0	0-15
	CP I - Z	25, 32 ou 40	0	6-14	0-15
	CP II - F	25, 32 ou 40	0	0	11 - 25
<b>Cimento Portland de alto-forno</b>	CP III	25, 32 ou 40	35-75	0	0-10
<b>Cimento Portland pozolânico</b>	CP IV	25, 32 ou 40	0	15-50	0-10
<b>Cimento Portland de alta resistência inicial</b>	CP V-ARI <sup>a</sup>	-	0	0	0-10
<b>Cimento Portland Branco</b>	Estrutural	25, 32 ou 40	-	-	0 - 25
	Não estrutural	-	-	-	26 - 50

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 16697 (2018).

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

Como já comentado anteriormente, o tipo de cimento a ser utilizado em um concreto deve ser escolhido conforme as exigências de projeto, como a resistência à compressão e a idade em que a mistura deverá atingir esta resistência. Assim, ressalta-se a importância da escolha do tipo de cimento, segundo suas características físicas e químicas, para a produção do concreto.

### 2.1.2 Agregados

Os agregados são constituintes do concreto que podem influenciar nas propriedades do seu estado fresco e endurecido. Assim, devem ser levadas em conta algumas características para garantir que sua utilização não interfira de forma prejudicial no desempenho do concreto. As principais características que devem ser levadas em conta são a forma, a textura, a distribuição do tamanho das partículas e a resistência mecânica. A otimização dessas características pode resultar em melhor fluidez da mistura e conseqüentemente na redução da demanda de água de amassamento, que acarreta diminuição de aditivo e ligante (KOEHLER, 2007).

A fluidez de um concreto e o teor de argamassa são influenciados diretamente pela distribuição das partículas conforme seu tamanho e pelo formato do agregado graúdo (principalmente). O grau de esfericidade dos agregados é indiretamente proporcional à chance de intertravamento e à fricção interna, e, conseqüentemente, ao consumo de argamassa (HU; WANG, 2011), uma vez que menos fricção acarreta menos consumo.

Romano, Cardoso e Pileggi (2011) afirmam que as propriedades no estado endurecido do concreto são influenciadas indiretamente e diretamente pelas suas propriedades no estado fresco. Os autores comentam que a formação de vazios devido à trabalhabilidade inadequada da mistura, bem como a possível não uniformidade na distribuição das fases (segregação) são os fatores que interferem nas propriedades do estado endurecido.

A utilização da composição de agregados naturais e dos chamados agregados industriais, como a areia de britagem e a areia natural, está cada vez mais presente em concretos. Além da diminuição do custo em relação ao agregado natural, há uma preocupação ambiental devido à extração da areia natural do leito de curso dos rios.

Assim, dá-se um destino para o resíduo de britagem e evita-se a extração da areia dos rios.

Ressalta-se assim a importância da utilização da composição de agregados naturais e industriais para produção de concretos. No presente estudo, adotou-se, para a produção do concreto, a composição de areias, combinado a areia natural com a areia de britagem.

### 2.1.3 Aditivo dispersante

Segundo Ramachandran (1996), as interações químicas e físicas das partículas de cimento, em uma mistura de água e cimento, ocasionam uma tendência à floculação. Quando ocorre a floculação destas partículas, formam-se aglomerados, os quais aprisionam parte da água, que, portanto, não fica disponível para a hidratação e a lubrificação da mistura cimentícia. Assim, são utilizados aditivos dispersantes, que atuam por sua adsorção na superfície das partículas e provocam repulsão entre elas, liberando assim a água que estava aprisionada.

Hoje em dia é quase impossível produzir concretos sem a incorporação de aditivos. Os aditivos mais utilizados no mercado da construção civil são os dispersantes, com ênfase no de terceira geração (possui molécula polimérica).

Os aditivos dispersantes têm a função de aprimorar a dispersão das partículas de cimento Portland, aumentando a trabalhabilidade e reduzindo a quantidade de partículas de cimento aglomeradas, o que acarreta melhora na qualidade da hidratação das partículas de cimento em baixas relações água/cimento (CHEUNG *et al.* 2011), bem como, para as mesmas relações água/cimento, melhora nas propriedades mecânicas e de permeabilidade.

A ação dos aditivos dispersantes está relacionada ao fenômeno de adsorção, que gera simultaneamente um ou dois efeitos opostos, a saber: a redução da interação entre partículas e/ou a estabilização da interface devido à formação da camada interfacial (RIXOM; MAILVAGANAM, 2002).

Os aditivos dispersantes de terceira geração são compostos por molécula polimérica que tem efeito de repulsão estérica e tem maior eficácia quando comparados com os dispersantes de segunda geração produzidos à base de

melamina e naftaleno, que têm efeito de repulsão eletrostática (RIXOM; MAILVAGANAM, 2002).

Os aditivos à base de poliacrilatos são denominados dispersantes de terceira geração. Seu mecanismo de ação é a repulsão estérica. Esse tipo de aditivo geralmente promove uma melhor dispersão das partículas pela redução na tensão superficial da água de amassamento, que ocorre tanto pela presença de grupos funcionais como pela diminuição no atrito, o que se consegue por meio do alinhamento de polímeros lineares ao longo da direção do fluxo de misturas cimentícias, e das propriedades de lubrificação que são produzidas por polímeros de baixa massa molecular (LAZNIEWSKA-LIEKARCZYK, 2018).

O efeito de repulsão estérica ocorre da seguinte maneira: a molécula de aditivo é adsorvida pela partícula de cimento e, devido às características da molécula do polímero, cria-se uma barreira física impedindo que as partículas de cimento se aglomerem pela força de van der Waals (RIXOM; MAILVAGANAM, 2002). Assim, características como a quantidade e comprimento de cadeias laterais, massa molecular e comprimento da molécula do aditivo têm influência direta no desempenho do aditivo (ZING, *et al.* 2009; HE *et al.* 2019).

## 2.2 ESTADO FRESCO DO CONCRETO

O concreto em seu estado fresco pode ser compreendido como uma suspensão bifásica onde os agregados graúdos e miúdos ficam imersos em uma matriz de partículas finas reativas (compostas pelo cimento Portland e adição mineral) e água em uma quantidade suficiente para que essas partículas sejam aplicadas no estado fluido (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

As propriedades do concreto no estado fresco têm impacto direto em suas propriedades mecânicas e em sua durabilidade. Em aspectos gerais, o concreto deve ser dosado para que preencha as formas sem deixar falhas, de modo a ser resistente à segregação e exsudação durante e após o lançamento. Ademais, deve atender os objetivos específicos de cada projeto, devendo ter maior ou menor fluidez conforme determinado para o fim desejado. O principal ensaio utilizado para determinar a trabalhabilidade de um concreto convencional é o abatimento do tronco de cone.

Pode se dizer que, normalmente, as propriedades no estado fresco de um concreto são determinadas por meio do ensaio empírico de abatimento do tronco de cone. Entretanto, esse ensaio somente indica a tensão de escoamento de um

concreto, já que o ensaio mede diretamente o deslocamento vertical do topo do cone de concreto após a retirada do molde. O ensaio é utilizado para controle e aceitação do concreto nas obras, conforme a norma ABNT NBR 12655 (2022). Porém, esse ensaio não engloba outras propriedades reológicas do concreto, que são de suma importância para a caracterização no estado fresco do concreto.

Segundo Ferraris, de Larrard (1998), Botella (2005) e Pileggi *et al.* (2000), reologia é a ciência que estuda o fluxo e a deformação dos materiais quando estes são submetidos a determinadas tensões ou solicitações mecânicas externas, sendo usualmente empregada na análise do comportamento de fluidos homogêneos, como os líquidos, emulsões e suspensões de partículas. Essa ciência define os fluidos a partir de duas grandezas básicas: a viscosidade plástica e a tensão de escoamento. A viscosidade relaciona a taxa de cisalhamento com a tensão de cisalhamento, enquanto a tensão de escoamento indica a tensão mínima necessária para iniciar o escoamento.

A grandeza viscosidade plástica é diretamente influenciada pela concentração de sólidos em uma mistura. Assim, quando é diminuída a quantidade de água, eleva-se a concentração de sólidos, aumentando a viscosidade plástica. Já a tensão de escoamento é diretamente influenciada pelo tamanho das partículas e por seu devido empacotamento. Assim, ela infere medidas sobre o atrito entre partículas (DE LARRARD; SEDRAN, 2002).

Portanto, o parâmetro “tensão de escoamento” (seja ela estática ou dinâmica) não determina a trabalhabilidade de uma mistura cimentícia, uma vez que se pode produzir dois concretos com tensão de escoamento iguais, mas com viscosidade plástica totalmente diferente. Logo, verifica-se que é de suma importância estudar a reologia em misturas cimentícias.

Por essa razão, a reometria está sendo cada vez mais aplicada e estudada em misturas cimentícias para determinação dessas grandezas reológicas. Há vários modelos para descrever o comportamento reológico de misturas cimentícias. Contudo, o modelo mais utilizado para descrição de pastas e concretos convencionais é o modelo de Bingham.

É consenso na literatura que o modelo de Bingham descreve bem o fluxo na maioria dos casos, além de ter a possibilidade de medir os parâmetros  $T_0$  (tensão de escoamento) e  $\mu$  (viscosidade) de forma independente (HU; DE LARRARD, 1996;

SCHWARTZENTRUBER et al., 2004; BANFILL, 2011). Segundo Nehdi e Rahman (2004), neste modelo é estabelecida uma viscosidade generalizada (constante) para um certo intervalo de taxa de cisalhamento.

Entretanto, o modelo de Hershel-Bulkley tem a vantagem de descrever a curva de tensão de escoamento, bem como um eventual comportamento não linear (WALLEWICK *et al.*, 2015). Este modelo não adota um valor para a viscosidade. Desse modo, é calculada uma viscosidade aparente. Além disso, calcula-se o comportamento tixotrópico da mistura por meio da área de histerese da curva de fluxo, que fica entre as partes crescentes e decrescentes.

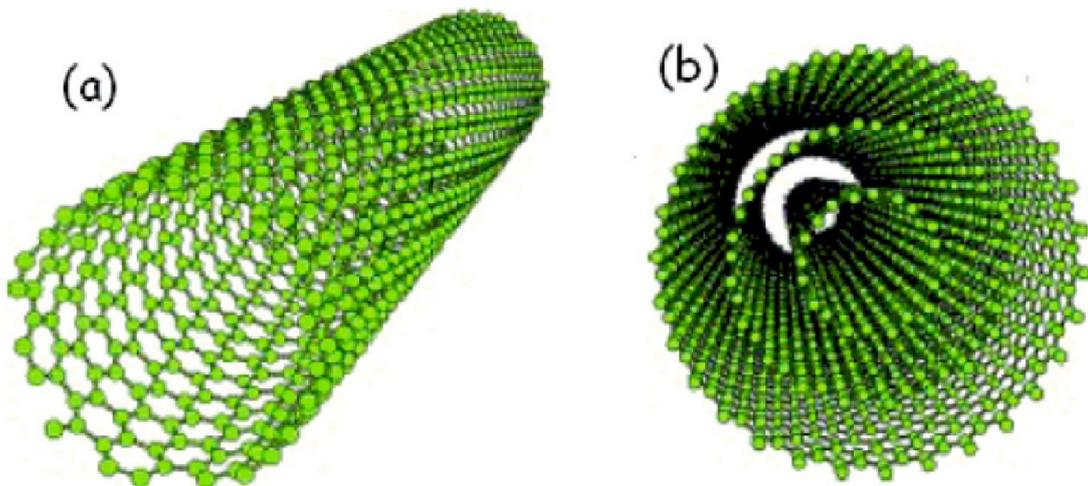
### 2.3 NANOTUBOS DE CARBONO

Atualmente a nanotecnologia tem sido fortemente aplicada e estudada na área da construção civil. A utilização de nanopartículas em matrizes cimentícias já comprovou seu bom desempenho quando incorporadas em misturas cimentícias. Uma de suas principais contribuições para a melhoria das propriedades de concretos, argamassas e pastas é, em virtude de seu tamanho nanométrico, o preenchimento de vazios que normalmente não são preenchidos.

Gleize (2011) explica que a utilização de nanomateriais em compostos à base de cimento Portland tem como principal objetivo aprimorar as características mecânicas, aumentar a coesão da mistura e a durabilidade, e reduzir a fluência, bem como reduzir/mitigar as fissurações em idades iniciais.

Dentre os nanomateriais mais estudados e aplicados em matrizes cimentícias, destacam-se os nanotubos de carbono. Os nanotubos de carbono geralmente são de paredes simples (NTCPS) ou de paredes múltiplas (NTCPM). A Figura 2 mostra o NTCPS e um NTCPM.

Figura 2 – Representação dos tipos de nanotubo de carbono: (a) nanotubo de carbono de parede simples; (b) nanotubo de carbono de paredes múltiplas



Fonte: ZARBIN (2007)

A dificuldade da incorporação de nanomateriais em matrizes cimentícias é o alto grau de dificuldade de sua dispersão. Se o nanomaterial não se encontra disperso para a sua aplicação, o resultado é comprometido, podendo não haver melhorias nas propriedades da mistura e até mesmo prejudicar essas propriedades (AJAYAN; SCHADLER; BRAUN, 2003).

Com base nisso, vários métodos de dispersão de nanomateriais foram e são estudados. Podem-se citar alguns métodos que são aplicados com maior frequência e que apresentam melhores resultados: (1) dispersão em meio aquoso (com ou sem aditivo dispersante) a partir de ondas sônicas; (2) funcionalização (tratamento químico); (3) sintetização do nanomaterial no clínquer.

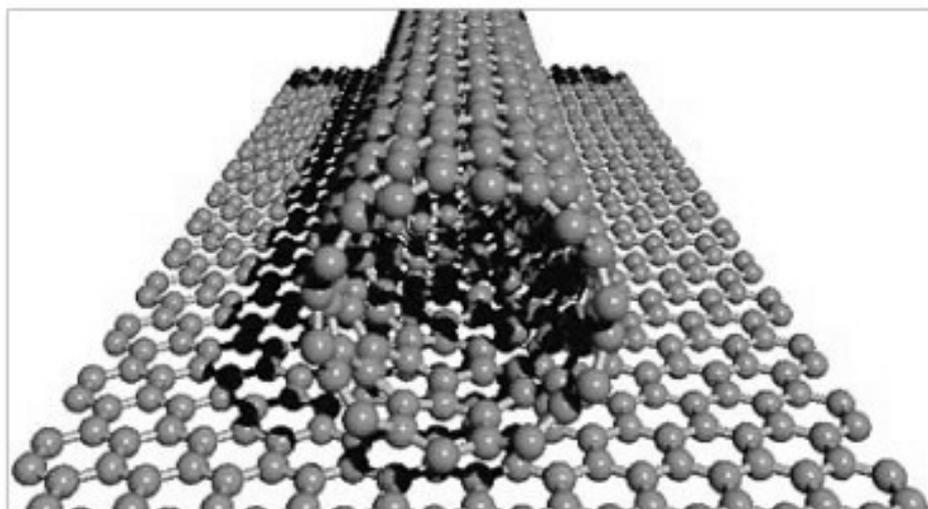
Para Kim *et al.* (2012), a funcionalização de nanomateriais, mais voltado para o NTC, é o processo no qual são enxertados grupos funcionais químicos na superfície do material. Esse processo não preserva a superfície do NTC, ou seja, cria imperfeições na superfície do nanomaterial. Essas imperfeições podem acarretar benefícios, tais como uma maior dificuldade de se arrancá-lo da matriz quando se aplica uma força.

Dentre as diferentes formas alotrópicas do carbono, o NTC é a configuração que se destaca na comunidade científica e na indústria, contextos em que este é um possível material futuro em escala nanométrica. NTC são folhas de átomos de carbono ordenadas de modo a formarem um tubo em um arranjo paralelo e hexagonal, e que têm como característica elevada força de atração de van der Waals (LI; LIU; XU, 2015).

Segundo Hu *et al.* (2006), existem vários métodos para a produção de NTCs, entretanto, o método que proporciona uma qualidade maior do produto é o método da ablação a laser. Esse método consiste na vaporização do grafeno<sup>4</sup> por meio de irradiação a laser. Esse processo é realizado em uma atmosfera com um gás que se encontra inerte e em um forno que atinge a temperatura aproximada de 1200°C (FELIPE, 2015).

Segundo Lee (2008), a formação acontece quando há uma instabilidade do grafeno gerando uma força motriz, que é provocada por ligações erráticas em átomos periféricos. Eliminando-se essas ligações, a estrutura do grafeno enrola-se, e o NTC é formado. Essa afirmação pode ser visualizada na Figura 3.

Figura 3 – Esquematização da camada de grafeno se enrolando e formando nanotubo de carbono.



Fonte: Lee (2008)

Os NTCs podem ser descritos como folhas de grafeno laminadas. O número de folhas define se os NTCs possuem paredes simples (NTCPS) ou paredes múltiplas (NTCPM). Em estudos como o de Batiston (2007), o aumento dos diâmetros externos dos NTCs promoveu um aumento significativo na resistência à compressão em argamassas à base de cimento Portland.

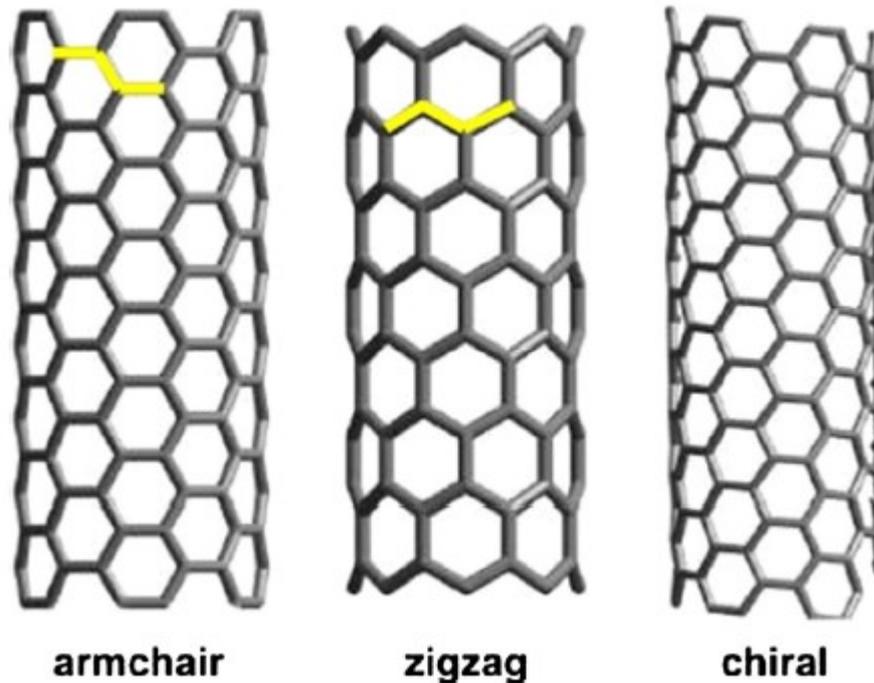
O número de paredes pode chegar a 40 ou 50. A geometria em que a folha de grafeno está enrolada é uma característica de cada parede do NTC. Diferentes geometrias podem resultar em diferentes comportamentos ou características na

---

<sup>4</sup> É uma das formas cristalinas do carbono, consiste em uma folha de átomos de carbono densamente compactados.

aplicação dos NTCs. Assim, nota-se que um controle da geometria seria fundamental para a aplicação desse nanomaterial, o que, porém, ainda permanece como um desafio para a ciência. Podem ser verificadas na Figura 4 as diferentes disposições geométricas que o NTC pode apresentar.

Figura 4 – Diferentes disposições geométricas que o nanotubo de carbono pode apresentar



Fonte: Rashad (2017)

A grande demanda por estudos sobre o NTC deu-se por meio do trabalho publicado pelo físico japonês Iijima (1991). Nesse estudo, o autor descobriu os NTC durante uma análise de uma massa de carbono formado no cátodo de grafite usando o método de descarga elétrica.

A partir deste estudo, diversos outros foram desencadeados para que fosse possível aprofundar o conhecimento desse nanomaterial no que diz respeito, por exemplo, às suas características físicas e químicas e aos seus benefícios para aplicação nas mais variadas áreas de estudos, já que os NTCs apresentam propriedades mecânicas, térmicas, ópticas e químicas que podem ser aplicadas a diferentes funções.

Segundo Araújo (2016), o NTCPM é um material extremamente forte, flexível e resistente, que pode resistir a tensões cerca de 100 vezes maiores do que as tensões suportadas pelo aço. A mesma autora cita ainda que os NTCPMs podem ser aplicados

em diversas áreas com muitas funcionalidades diferentes, por exemplo, nas áreas de eletrônica, de construção civil, e de armazenamento de energia, entre outras.

Nesta última década, os NTCs em geral têm sido muito estudados como um material de reforço para compósitos à base de cimento Portland. O interesse é modificar a matriz de cimento na escala dos seus principais compostos. Pode-se dizer que estes nanomateriais provaram melhorar as propriedades da fratura de matrizes cimentícias, reduzindo ou até impedindo a fissuração (JAYAKUMARI; SWAMINATHAN; PARTHEEBAN, 2023).

## 2.4 APLICAÇÃO DE NANOTUBOS DE CARBONO EM MATRIZES CIMENTÍCIAS

Neste tópico serão abordados os estudos produzidos com a inserção do nanotubo de carbono em matrizes cimentícias, e sua consequente influência no estado fresco e endurecido dessas matrizes. Este tópico foi dividido em dois subtópicos: (I) Estado fresco; e (II) Estado endurecido.

Como será demonstrado, não há muitos estudos com a aplicação de NTC em concreto estrutural, e, além disso, não há estudos relacionados à aplicação de NTC em concreto objetivando a diminuição do consumo de cimento Portland proporcional ao ganho de resistência devido à inserção de NTC.

Dentre as diferentes funções de sua aplicação, eles podem ser empregados em misturas cimentícias e, dessa maneira, é extremamente importante entender a sua influência nas propriedades mecânicas no estado fresco dessas misturas, as quais serão abordadas no presente estudo. Primeiramente serão comentados os estudos que mostram a tendência do comportamento do nanomaterial no estado fresco dessas matrizes.

### 2.4.1 Estado Fresco

Comenta-se que a utilização de nanomateriais pode alterar ou não as grandezas reológicas de uma mistura cimentícia, o que dependerá de fatores físicos e químicos do insumo que será inserido na mistura. Pensando no objeto de estudo do presente trabalho, a inserção de NTCPM em misturas cimentícias pode modificar suas propriedades reológicas devido às suas características físicas. Alguns estudos serão

apresentados a seguir indicando a influência do nanomaterial no estado fresco de matrizes cimentícias.

Segundo Souza *et al.* (2017), a utilização de NTCPM em argamassa com teor de 0,3% em relação à massa de cimento acarretou aumento da tensão de escoamento e de viscosidade em relação à argamassa de referência. A inserção de NTCPM fez com que o espalhamento das argamassas fosse reduzido em até 42% em relação ao espalhamento das argamassas de referência. Além disso, a viscosidade das argamassas com NTCPM atingiram um valor de 1,8 MPa.s, enquanto a argamassa de referência atingiu o valor de 0,37 MPa.s.

Os autores atribuíram os resultados obtidos ao aumento da fricção entre as partículas, o que ocorre devido ao aumento do volume de partículas sólidas na solução. Além disso, eles comentam que ocorreu um maior ganho de temperatura na mistura com NTCPM, e explicam o fato indicando que a presença de NTCPM resultou na aceleração do processo de hidratação das partículas de cimento. A relação água/cimento utilizada foi de 0,6.

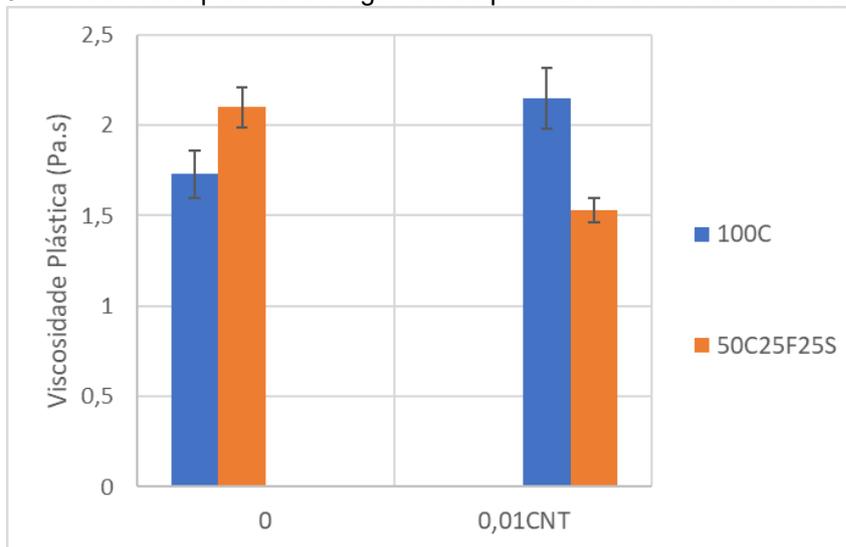
Em outro estudo, de Reales *et al.* (2018), foram analisadas as características reológicas da pasta cimentícia com incorporação de NTCPM no teor de 0,15% em relação à massa de cimento Portland. Os resultados indicaram que a adição de NTCPM acarretou um maior valor para a tensão de escoamento. Os autores apontam que, devido à utilização de aditivos que têm uma parte hidrofóbica, pode haver interações entre as moléculas de água e os NTCPMs, dependendo do tipo de aditivo utilizado. Essa interação faz com que a água que está interagindo com o nanomaterial não seja utilizada para a lubrificação das partículas e conseqüentemente gere um aumento na tensão de escoamento da pasta.

Além disso, os autores inferem que o aumento da superfície específica das partículas por ocasião da adição do NTCPM é de fundamental relevância para o aumento do valor da tensão de escoamento, uma vez que, além de haver maior superfície específica para ser lubrificada, há também interação entre o nanomaterial e as moléculas de água.

Ma, Qian e Kawashima (2018) relatam que a adição do teor de 0,01% – em relação à massa do cimento – de NTCPM em argamassa de cimento Portland faz com que ocorra um aumento na tensão de escoamento, na viscosidade plástica e na coesão estática da mistura cimentícia. Os autores demonstram ainda que o NTCPM

tem diferentes efeitos nas propriedades reológicas das argamassas quando o tipo de ligante da mistura é modificado, mostrando que a interação entre o NTC com o ligante é muito relevante, conforme pode ser verificado na Figura 5.

Figura 5 – Viscosidade plástica de argamassas produzidas com e sem a utilização de NTCPM



Fonte: adaptado de Ma, Qian e Kawashima, 2018.

Na Figura 5 são ilustradas as argamassas produzidas com e sem NTC. A barra azul indica os resultados de viscosidade plástica para a argamassa com cimento Portland Puro (100C) sem materiais cimentícios suplementares, com e sem NTC. Já a barra laranja representa a medida de viscosidade plástica para a argamassa com utilização de materiais cimentícios suplementares com e sem NTC. O teor utilizado de NTC para cada argamassa é indicado no eixo X do gráfico, o valor 0 significa o teor de 0% de NTC nas argamassas, e o valor 0,01CNT significa o teor de 0,01% de NTC. O teor utilizado de NTC é dado em relação à massa de cimento Portland total.

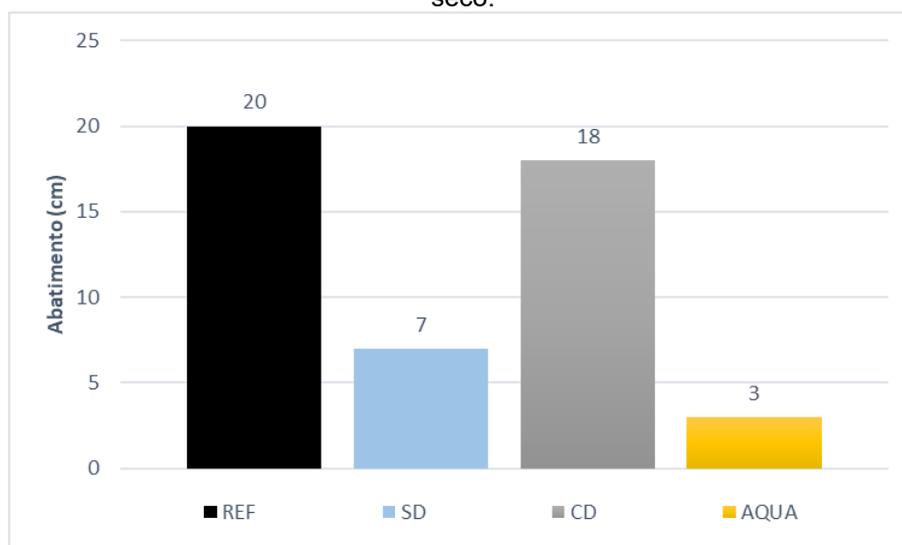
Assim, verifica-se que a argamassa feita com o cimento Portland puro (100C) resulta em menor viscosidade plástica quando comparado com mistura produzida com cimento, cinza volante e escória (50C25F25S). Entretanto, a adição de NTCPM nas misturas (0,01NTC) resultou em comportamentos completamente opostos: para a mistura com cimento puro, o NTCPM fez com que o valor da viscosidade plástica fosse maior; já para a mistura com cinza volante e escória, a adição de NTCPM fez com que o valor da viscosidade plástica caísse.

Em relação ao efeito de diminuição da viscosidade aparente na argamassa 50C25F25S pela inserção de NTCPM, esse fato pode ser relacionado à interação entre o NTCPM e o aglomerante, ou ainda, pode ser inferido que a inserção do

nanomaterial na mistura fez com que a estrutura granulométrica das partículas se compactasse, de forma que a inserção do NTCPM possa ter feito com que a água que poderia estar aprisionada entre as partículas sólidas pudesse ser reutilizada para lubrificar a mistura, e assim diminuir a tensão de escoamento da mistura.

Ainda, Marcondes (2012) verificou que a eficiência da dispersão dos NTCPMs adicionados ao concreto tem influência direta na sua consistência. Foram realizados três tipos diferentes de dispersão do nanomaterial, e o teor de NTC adicionado ao concreto foi de 0,30% em relação à massa do cimento Portland, com uma relação água/cimento de 0,55 e a utilização de 1% de aditivo dispersante de terceira geração à base de éter policarboxilato. Os resultados para o teste de abatimento dos concretos são ilustrados pela Figura 6.

Figura 6 – Abatimento de concretos produzidos com diferentes modos de dispersões de nanotubos de carbono: (AQUA) dispersão do fabricante; (CD) dispersão realizada pelo autor; (SD) misturado a seco.

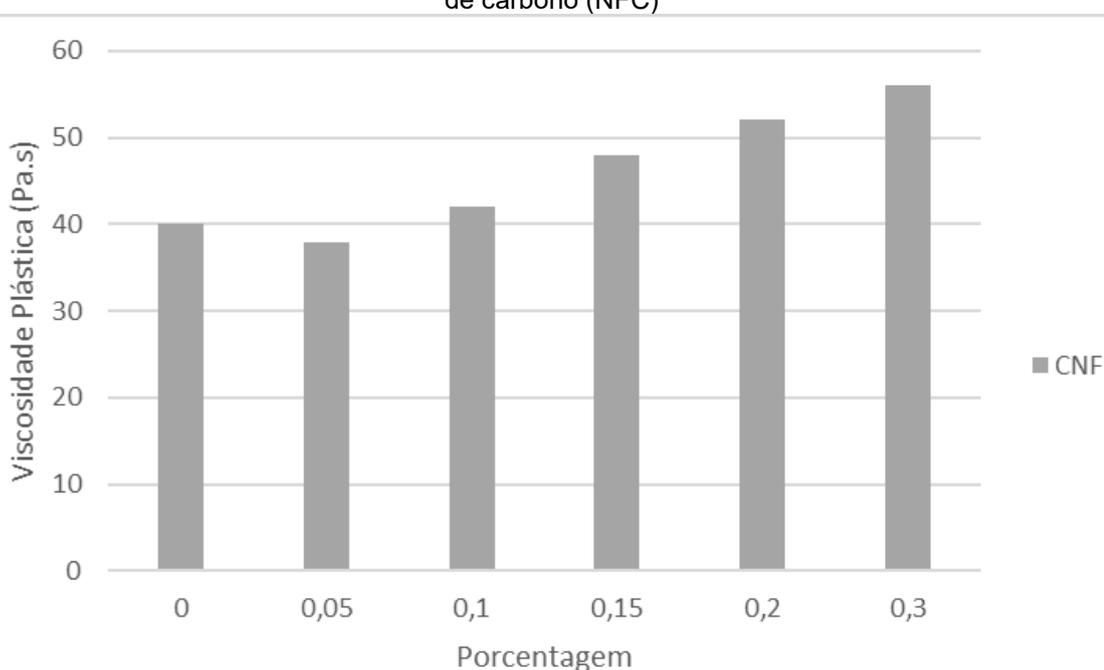


Fonte: adaptado de Marcondes, 2012.

O autor verificou que o concreto produzido com os NTCs sonicados em solução de água e aditivo dispersante (CD) apresentou maior abatimento do que os demais concretos produzidos com os NTCs sem o processo de sonicação (AQUA e SD). O autor comenta que a dispersão AQUA consiste nos NTCs dispersos em um surfactante iônico que confere a dispersão e estabilidade em meio aquoso. Portanto, ele infere que a sonicação se mostrou eficiente no quesito de garantir a molhagem prévia e eficiente da área de superfície específica dos NTCs, colaborando com a diminuição do efeito travamento da massa fluida.

Ainda comentando sobre a reologia em concretos com nanomateriais, verificou-se que a utilização de maiores teores de nanofibras de carbono promoveu o aumento da viscosidade plástica do concreto de ultra-alto desempenho quando se aumentou o teor de 0,05% para 0,3% (MENGA; KHAYAT, 2018). As propriedades reológicas foram medidas por meio do viscosímetro coaxial ConTech 5 utilizando o modelo de Bingham. As amostras foram submetidas a um pré-cisalhamento em velocidade de rotação de 0,5 rps durante 25 segundos, seguida de uma redução gradual em velocidade rotacional até zero. O concreto analisado tinha uma relação água/cimento de 0,20. Esses resultados podem ser verificados na Figura 7.

Figura 7 – Resultados de ensaios reológicos em concreto de ultra-alto desempenho com nanofibras de carbono (NFC)



Fonte: adaptado de Menga e Khayat (2018).

Os autores comentam que o aumento do teor de nanofibras fez com que elas ficassem adsorvidas na superfície das partículas de cimento e enfraquecessem parcialmente a repulsão eletrostática entre as partículas, provocando uma aglomeração e assim aumentando a viscosidade da mistura.

Assim, pode-se concluir que as características no estado fresco de misturas cimentícias são determinadas pela atuação em conjunto do cimento Portland e do NTCPM, e que as principais características para a aplicação de um concreto são a

consistência e a coesão, que podem ser quantificados através dos parâmetros reológicos (tensão de escoamento e viscosidade).

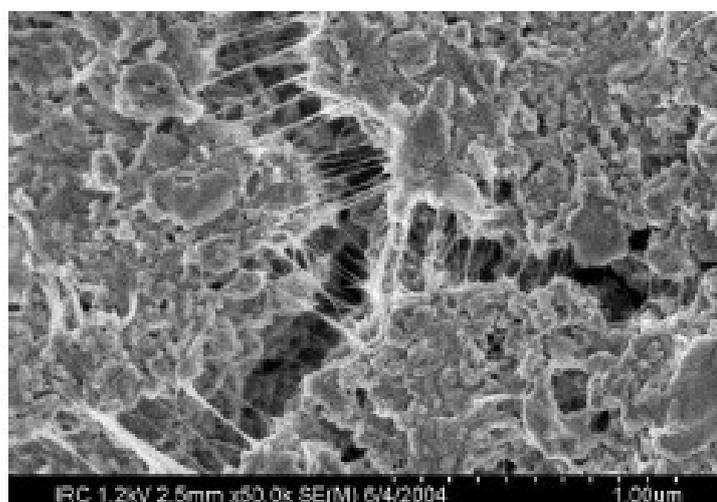
#### 2.4.2 Estado Endurecido

Além da modificação de propriedades reológicas, os NTCs têm influência nas propriedades mecânicas de misturas cimentícias. Os materiais que são utilizados na produção de um compósito cimentício influenciam diretamente nas propriedades do seu estado endurecido, como a resistência e as deformações que serão suportadas pela estrutura.

Os efeitos do NTCPM que podem ser ressaltados são: 1) a criação de novos pontos de nucleação heterogênea; 2) a atuação como ponte na matriz cimentícia, distribuindo melhor as tensões que nela são aplicadas; 3) a prevenção da propagação de fissuras. Assim, a incorporação de NTC em compósitos cimentícios, quando dispersos uniformemente na matriz, acarreta um aprimoramento nas propriedades mecânicas (resistência à tração, compressão e módulo de elasticidade) em comparação com materiais cimentícios puros.

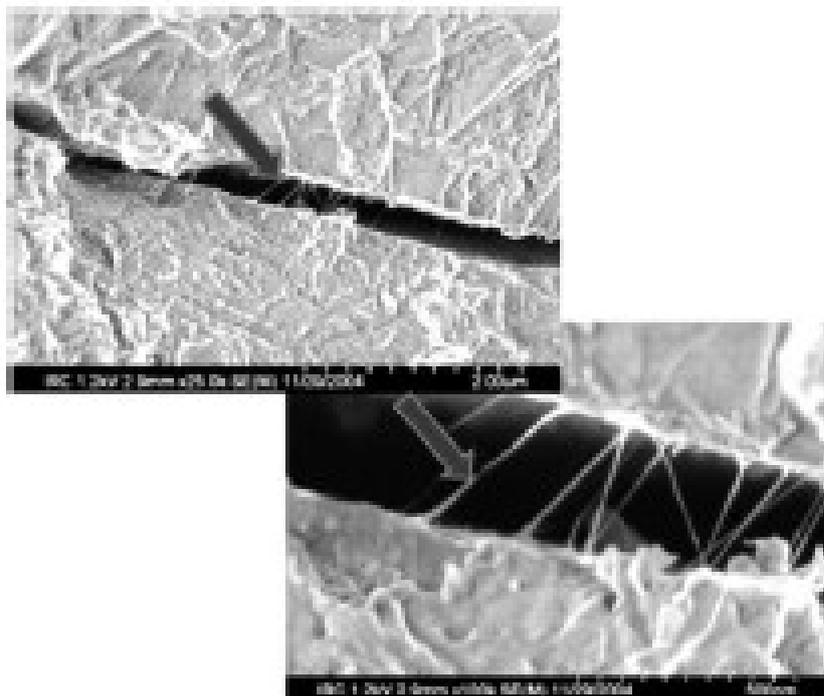
Raki *et al.*, (2010) verificaram por meio do ensaio de MEV (microscopia eletrônica de varredura) como os NTCs dispersos na matriz cimentícia podem atuar como agentes que diminuam ou mitiguem a propagação de fissuras, o que pode ser verificado nas Figuras 8 e 9.

Figura 8 – NTC na região de fissura da matriz cimentícia



Fonte: Fonte: RAKI et. al. (2010).

Figura 9 – NTC auxiliando na zona de fissura da pasta de cimento Portland



Fonte: MAKAR et. al. (2005).

Acredita-se que os NTCs atuem como pontes de ligações na matriz cimentícia, bem como tenham efeito *filler*, além da criação de novos pontos de nucleação heterogênea. Defeitos na estrutura dos NTCs promovem pontos de nucleação para o processo de hidratação das partículas de cimento (LIEW; KAI; ZHANG, 2016).

A utilização de NTC em misturas cimentícias acelera o processo de hidratação do cimento e também promove uma melhora na hidratação das partículas pelo auxílio do NTC com a criação de novos pontos de nucleação, auxiliando o processo de hidratação das partículas de cimento e promovendo uma melhora na densificação da matriz.

Musso *et al.* (2009) relataram que a adição de NTCPM – no teor de 0,5% em relação à massa de cimento Portland, – em argamassa fez com que o processo de hidratação do cimento acelerasse em até três horas o seu tempo de hidratação original. Da mesma forma, Makar, Margeson e Luh (2005) afirmam que a adição de NTCPS no teor de 0,02% em pasta de cimento Portland faz com que o processo de hidratação do cimento seja acelerado, produzindo maior taxa de hidratação do que a mistura de referência.

Markar e Chan (2009) adicionaram o teor de 1% de NTCPS em pasta de cimento Portland e relataram que essa adição do nanomaterial acelerou a reação de

hidratação do  $C_3S$ . Os autores comentam que o NTCPs parecia atuar como ponto de nucleação dos produtos de hidratação de  $C_3S$ . Além disso, houve uma alteração na morfologia dos produtos de hidratação do  $C_3A$  e  $C_3S$  e uma maior formação de portlandita nas primeiras 24 horas de hidratação, em relação à mistura de referência.

Os efeitos de densificação da matriz cimentícia diminuem a porosidade e aprimoram a qualidade da matriz, acelerando a hidratação das partículas de cimento e a melhoria da distribuição de tensões, proporcionando redução das fissuras (HAWREEN; BOGAS, 2018; MENDOZA-REALES; SIERRA GALLEGO; TOBÓN, 2016). Porém, como já supracitado, fatores como a dispersão dos NTCs, sua morfologia, e a interação entre os NTCs e a matriz cimentícia podem afetar o comportamento deste nanomaterial (SOBOLKINA *et al.* 2012; XU; LIU; LI, 2015; ISFAHANI; LI; REDAELLI, 2016). A baixa qualidade da dispersão de NTC na matriz cimentícia leva seu desempenho nas propriedades mecânicas da mistura a ser ineficaz (CWIRZEN; HABERMEHL-CWIRZEN; PENTTALA, 2008; MORSY; ALSAYED; AQEL, 2011; TAMIMI *et al.* 2016).

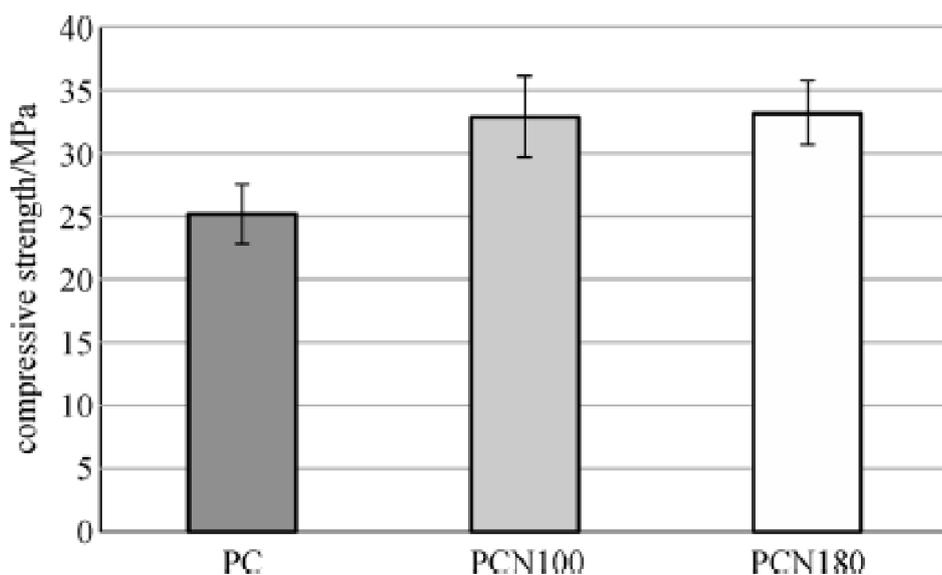
Assim, verifica-se que, além da sua caracterização física e química, uma padronização na sua dispersão e a consequente garantia (estabilidade) desta são de suma importância para o desempenho do nanomaterial. Ainda, fatores como o tipo de dispersante utilizado (compatibilização entre o aditivo e o nanomaterial), o teor de NTCPM presente na solução (quanto maior a concentração de NTCPM em uma solução, maior será a força de atração entre as partículas, e assim maior a tendência à aglomeração) e o tipo de mistura cimentícia em que irá ser inserido o nanomaterial têm influência no seu desempenho final.

Li *et al.* (2005) utilizaram o teor de adição de 0,5% de NTCPM em relação à massa de cimento e obteve ganho de resistência à compressão de até 19% em relação à argamassa de referência para a idade de 28 dias. Batiston (2007) utilizou a adição de NTCPM no teor de 0,5% em relação à massa de cimento Portland e obteve ganho de resistência de até 22% em relação à mistura de referência para a idade de sete dias. Melo (2009) indicou que a adição de NTCPM no teor de 0,3% em relação à massa de cimento promoveu um ganho de resistência de até 5% em relação à argamassa de referência para a idade de sete dias e um ganho de 3% aos 28 dias com a adição de 0,5% de NTCPM.

Nasiibulin *et al.* (2009) verificaram que o teor máximo de NTC que pode ser adicionado a pastas de cimento, trazendo benefícios para a resistência mecânica, foi de 0,30% em relação à massa de cimento. Porém, esse teor varia de acordo com o tipo de NTC empregado na mistura cimentícia, o aditivo dispersante, o tipo de ligante utilizado, entre outros.

Elkashaf, Wang e Abou-Zeid (2016) relataram em seu estudo que pastas produzidas com a adição de 0,2% de NTCPM em relação à massa de cimento resultaram em maiores resistências à compressão em relação às pastas de referência. Os NTCPMs utilizados no estudo passaram por um tratamento com ácido, e se utilizou a ultrassonicação na solução de NTCPM, água e aditivo dispersante. Os resultados da adição desses NTCPMs à pasta cimentícia são mostrados na Figura 10.

Figura 10 – Resultados de resistência à compressão de pastas de cimento Portland com e sem adição de nanotubos de carbono



Fonte: Elkashaf, Wang e Abou-Zeid, 2016.

Pode ser verificado que, na pasta de referência (PC), obteve-se a menor resistência à compressão aos 28 dias. Além disso, os autores relatam que o maior tempo de tratamento dos NTCPMs não resultou em maior resistência à compressão na pasta (PCN180) quando comparada com a pasta com adição de NTCPM com menor tempo de tratamento (PCN100). Eles comentam que isso se deve ao fato de que o tratamento melhora a dispersão dos NTCPMs na matriz, porém, um maior tempo

de tratamento em ácido resulta em maiores defeitos nos NTCPMs, comprometendo assim seu melhor desempenho mecânico.

Rhee e Roh (2013) utilizaram a adição de NTCPM em relação à massa de cimento Portland nos teores de 0%; 0,25%; 0,50%; 0,75%; 1,0% e 1,5%. Os autores começaram a dispersão dos NTCPMs com um moinho de bolas durante sete horas, e depois foram preparadas soluções com água, aditivo superplastificante e sódio naftaleno sulfonato formaldeído (SNSF) com os teores de adição de NTCPM. O SNSF foi adicionado à solução como agente ativador de repulsão das nanopartículas, bloqueando a ligação (aglomeração) entre os NTCPMs. As soluções foram sonicadas durante 20 minutos por meio de banho ultrassônico. Os concretos foram dosados para uma resistência de 24 MPa.

As misturas foram feitas sem sonicação (colocando o NTCPM diretamente no concreto) e com sonicação (solução de água + superplastificante + sódio naftaleno sulfonato formaldeído + sonicação). Os resultados de resistência à compressão mostraram que há uma tendência de ganho de resistência à compressão de concretos com a adição de NTCPM quando comparados com o concreto de referência, podendo chegar a uma resistência 70% maior, e ainda, que a sonicação dos NTCPMs promove maior resistência do que o concreto com adição de NTCPM sem sonicação.

Segundo Aydin, Nasl e Kotan, (2018), a utilização da substituição de nanotubos de carbono de múltiplas camadas ao cimento Portland em concreto autoadensável, no teor de 0,08% em relação à massa de cimento, resultou em um aprimoramento da resistência à compressão em até 5% com o passar do tempo em relação ao concreto de referência. Entretanto, esse aprimoramento na resistência à compressão foi muito sutil. Além disso, a tenacidade à flexão desse concreto foi aprimorada em cerca de 20% em relação ao concreto de referência.

Os autores comentam que os NTCPMs têm uma contribuição maior na tenacidade à flexão, uma vez que eles atuam resistindo à propagação das fissuras devido ao seu formato, bem como melhorando a zona de transição e aprimorando a microestrutura do concreto. Ressalta-se que, apesar da pequena quantidade utilizada desse material, foi evidente a melhora das propriedades mecânicas do concreto. Entretanto é válido ressaltar que não há muitas informações sobre como foi feita a dispersão dos NTCs, sobre a qual foi apenas descrito que os NTCs foram misturados

suficientemente com metade da água de amassamento antes de serem adicionados ao concreto.

Segundo Hawreen e Bogas (2019), a funcionalização do nanotubo de carbono de paredes múltiplas influencia no ganho de resistência do concreto em que este será inserido. Os autores trabalharam com cinco tipos diferentes de funcionalização de NTCPM: (1) *NTCSS*; (2) *NTCSL*; (3) *NTCPL*; (4) *NTCCOOH*; (5) *NTCOH*.

Para este estudo, verificou-se que a dispersão dos NTCs foi feita em 40% da água de amassamento com aditivo surfactante aniônico, e que a solução foi agitada magneticamente durante quatro horas e sonicada durante 30 minutos. Porém, a solução de CNTSS foi sonicada por 45 minutos. Os autores relatam que houve um aumento em geral na resistência à compressão dos concretos com NTCPM em relação ao concreto de referência, concordando com os resultados do trabalho de (XU; LIU; LI, 2015).

Entretanto, o aumento foi diferenciado para os diferentes NTCPM, demonstrando assim que a funcionalização interfere no desempenho dos NTCPMs em matrizes cimentícias. Além disso, o tipo do aditivo dispersante utilizado pode ter influenciado o seu desempenho. Como os autores utilizaram apenas um aditivo, este pode ter influenciado de maneira positiva a dispersão de um tipo de NTCPM, e de maneira negativa outro tipo de NTCPM. Ressaltam ainda que, como já supracitado, os NTCPMs podem ter colaborado na retenção da propagação de fissuras na zona de transição, visto que foi possível observar por meio do ensaio de MEV a dispersão adequada do nanomaterial em algumas regiões da matriz.

Em resultados de tração por compressão diametral, foi encontrado um aprimoramento de 21% em relação à mistura de referência, com uma adição de 0,5% de NTCPM em relação à massa do cimento Portland (MELO *et al.*, 2010). Os autores realizaram a funcionalização dos NTCPMs a partir de um tratamento químico de 120 ml de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) para uma amostra de 3 gramas de NTCPM. Eles fizeram a funcionalização para obter uma melhor dispersão do nanomaterial em água. Juntamente com a água, foi adicionado um aditivo dispersante à base de sulfonato de resina de melamina, com teor de 1,5% em relação à massa de cimento.

Além de aprimorar as propriedades mecânicas, quando se tem uma boa qualidade da dispersão deste nanomaterial, os nanotubos de carbono podem exercer influência sobre as propriedades reológicas de misturas cimentícias.

Além disso, os NTCs podem ter influência direta sobre a retração de misturas cimentícias devido à modificação da densificação da matriz, bem como sobre seu efeito de ponte, além de promover uma melhoria na qualidade de hidratação das partículas de cimento devido à criação de novos pontos de nucleação heterogênea.

Com relação à retração, há alguns trabalhos sobre esse fenômeno em argamassas e pastas de cimento Portland com a utilização de NTCs. Hayspark *et al.* (2005) indicam que a causa principal do fenômeno da retração é a perda de água da mistura cimentícia. Esse evento está ligado diretamente a deformações sem a presença de carregamento. Neste trabalho, será dado foco na retração por secagem, porque esse tipo específico será avaliado no presente estudo.

Diniz *et al.* (2011) afirmam que a retração por secagem é ocasionada pela perda de água adsorvida da mistura para o ambiente, fenômeno que é uma das principais causas de fissuração. A retração por secagem pode ser denominada retração plástica quando ocorre antes do início da pega do concreto. Ela ocorre quando a taxa de exsudação da mistura é menor do que a taxa de evaporação da água que está exposta na superfície (REPETTE, 2011), mas também pode ocorrer após o final de pega, quando é denominada de retração hidráulica.

Segundo Isaia (2011), quando ocorre retração por secagem, seu efeito significativo na mistura cimentícia se dá pela perda da água em poros menores do que 50 nm. Em poros maiores do que 50 nm, essa água está livre das forças de atração exercidas pela superfície sólida, ressaltando-se assim a importância da utilização dos NTCs, que podem ter o efeito de diminuir a nanoporosidade do concreto e assim diminuir o efeito da retração por secagem.

A retração por secagem ocorre devido à rápida perda de água de amassamento, seja por absorção das fôrmas, seja pelos agregados ou ainda pela evaporação para o ambiente. A perda de água não só resulta na retração, mas também, altera a velocidade da formação dos compostos cimentícios. Como a retração plástica é ocasionada pela movimentação da água da mistura para o ambiente, quanto maior é a relação água/aglomerante, mais evidenciado se torna esse efeito.

Hawreen, Bogas e Dias (2018) verificaram que a diminuição da magnitude do fenômeno da retração em argamassa, para relações água/cimento variando entre 0,35 e 0,55, foi mais evidenciado nas primeiras idades. Os autores inferem que isso pode

ter relação com os efeitos da aceleração no processo de hidratação do cimento em idades iniciais causados pela adição do NTCPM. Os autores utilizaram a adição de NTC entre 0,05% e 0,1% em relação à massa de cimento Portland.

Os nanotubos de carbono foram dispersos em solução aquosa, juntamente com o aditivo dispersante. A água utilizada para a dispersão dos NTCs correspondeu a 70% da água de amassamento. Os NTC foram agitados magneticamente durante o período de 4 horas e sonicados por 30 minutos. Foi feita a mistura da solução de NTC com 70% de água e aditivo com o cimento Portland, e, em outro recipiente, foram misturados os agregados miúdos com o restante da água de amassamento. Após, foi adicionada a pasta de cimento com NTC à outra mistura (agregado miúdo + 30% da água de amassamento).

Segundo Szlag (2017), as pastas produzidas com nanotubos de carbono utilizados em adição no teor de 0,1% em relação à massa de cimento Portland apresentaram maior retração do que as pastas com apenas cimento Portland. O autor relata que esse resultado se deve ao fato de as pastas produzidas com NTC terem uma maior porosidade, e infere que isso pode ter ocorrido por uma maior incorporação de ar durante o processo de produção. A maior porosidade dessas pastas permite maior deformação da matriz devido à remoção da água livre da mistura. O autor trabalhou com pastas de cimento Portland com relações água/cimento de 0,4; 0,5 e 0,6.

Em um outro estudo, Konsta-Gdoutos, Metaxa e Shah (2010), os autores utilizaram o NTC como adição à pasta de cimento Portland nos teores de 0,048%, 0,08% e 0,10%. Os NTCs foram dispersos com sonicador em solução aquosa com aditivo superplastificante e depois misturados ao cimento Portland. As pastas produzidas tiveram a relação água/cimento de 0,3. Os autores indicam que há uma tendência de pastas produzidas com NTCs sonicados resultarem em menor retração autógena.

Os autores comentam que devido à inserção de NTCs na pasta, a fração dos poros menores que 20nm é diminuída, e assim ocasiona uma menor retração autógena em idades até 96 horas, uma vez que quanto maior a fração de poros pequenos (poros <20nm), maior será a retração em idades precoces.

Segundo Hawreen e Bogas (2019), foi possível verificar a redução do efeito da retração com a inserção de NTCPM nos concretos. Ressalta-se assim o efeito

benéfico dos NTCPMs em relação ao fenômeno da retração. Para esse estudo, foram analisados concretos com diferentes NTCPM, e o efeito da retração nestes para as idades de 2 dias, 7 dias, 27 dias, 90 dias, 180 dias e 360 dias.

Song *et al.* (2019) relataram que a incorporação de fibras de carbono em concreto no teor de 0,7% e 0,3% em relação à massa de cimento resultou em menor retração por secagem durante o período de 175 dias. Os autores atribuem esse efeito à restrição da fibra devido à formação de uma rede por sua dispersão na matriz cimentícia. No trabalho de Silvestro e Gleize (2020), foi demonstrado que a maior parte dos estudos utilizando nanotubos em matrizes cimentícias que obtiveram aprimoramento na resistência à compressão utilizaram teores menores que 0,2% em relação à massa de cimento Portland, e que, ainda, a maior concentração desses estudos foram em teores próximos ou iguais a 0,1%. Esse fato tem relevância para o presente estudo, já que se deseja utilizar o nanomaterial compensando a perda de resistência à compressão pela diminuição do consumo de cimento Portland.

## 2.5 SUBSTITUIÇÃO DE CIMENTO PORTLAND POR NTCPM E A IMPORTÂNCIA AMBIENTAL

Sabe-se que a produção de cimento Portland gera muitos gases poluentes, causando elevado impacto ambiental negativo. Estima-se que a quantidade de gases poluentes emitidos para fabricação do cimento Portland é de uma tonelada para cada tonelada de cimento produzida, e que de 5% a 6% da emissão total dos gases que causam o efeito estufa são provenientes da produção do cimento (KLEE, 2004; MEYER, 2009; SALAS *et al.* 2016).

Portanto, produzir compósitos cimentícios com menor consumo de cimento Portland sem que haja perda de suas propriedades mecânicas e durabilidade tende a ser uma ferramenta sustentável de grande valia. Assim, além de auxiliar na diminuição do consumo de cimento Portland como forma de preservação ambiental, a produção de NTC tem sido voltada para auxiliar na diminuição de gases poluentes gerados pela produção do cimento, utilizando os gases emitidos por essa produção como base para produção de NTC.

Estudos recentes têm apresentado modelos de produção de NTC e liberação do gás oxigênio por meio da separação do átomo de carbono e do oxigênio do gás

dióxido de carbono (REN *et al.*, 2015; WU, *et al.* 2016). Esse fato demonstra a importância de se utilizar o NTC em concreto como uma alternativa para diminuir o consumo de cimento Portland, acarretando uma alternativa ambientalmente correta.

Segundo Licht (2017), esse modelo é capaz de realizar a separação e eliminação da emissão do CO<sub>2</sub> gerado pela produção do cimento Portland. Nesse processo, a tensão é aplicada para quebrar o CO<sub>2</sub> em uma câmara de eletrólise entre um ânodo de níquel e um cátodo de aço galvanizado, resultando em oxigênio puro e em um produto de carbono sólido. Este procedimento exige baixa energia e tem alta eficiência. Basicamente o gás CO<sub>2</sub> passa por um processo de dissolução, onde é combinado com um solúvel Li<sub>2</sub>O, resultando em Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. Essa combinação passa pelo processo de eletrólise, onde irá gerar C (CNT), Li<sub>2</sub>O e O<sub>2</sub>.

Ainda é relatado que há liberação de gases poluentes devido à combustão do processo. Entretanto, esse volume de gases é menor, e esses gases não são gases antropogênicos. Além disso, no modelo ilustrado pelo autor, o oxigênio extraído pelo processo volta como combustível para a linha de produção, melhorando a eficiência da combustão e diminuindo o volume de gases produzidos pelo processo.

Verifica-se que, além de diminuir a emissão dos gases poluentes pela diminuição do consumo de cimento de concretos com a utilização de NTCPM, o processo de produção desse nanomaterial pode diminuir indiretamente a emissão de gases poluentes da produção do cimento Portland, ressaltando-se assim a importância de sua aplicação no campo da construção civil.

## 2.6 SÍNTESE DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A utilização dos NTCs na área da construção civil é de grande relevância porque as propriedades mecânicas desse nanomaterial são muito vantajosas, com elevado módulo de elasticidade e resistência à tração. A partir disso, verificou-se que muitos estudos foram realizados para analisar a influência de NTC em matrizes cimentícias.

Entretanto, sua efetiva dispersão é fundamental para que esse material cumpra seu papel na mistura. Sua tendência à aglomeração é alta devido à alta força de atração entre as nanopartículas – força de van der Waals –, provindas de sua alta superfície específica.

Uma boa qualidade na dispersão dos NTCPMs pode modificar as propriedades reológicas de misturas cimentícias. Os estudos encontrados e descritos aqui indicam que a tendência da utilização de NTCPM em pastas e argamassas é fazer com que a magnitude das grandezas – tensão de escoamento e viscosidade plásticas – sejam aumentadas. Isso se deve principalmente ao fato de que esse nanomaterial tem elevada superfície específica.

Além disso, os estudos comentam que os NTCPMs são de grande auxílio na diminuição e até na mitigação da propagação de fissuras em matrizes cimentícias, bem como funcionam como pontes de ligação, colaborando para a melhor distribuição das tensões e para o preenchimento de vazios pelo efeito *filler*. Ainda, foi mostrado que a utilização desse nanomaterial pode promover a aceleração do processo de hidratação do cimento, além de melhorar a hidratação das partículas de cimento, já que criam novos pontos de nucleação.

Como foi verificado na revisão da literatura, constata-se que há diferentes maneiras de dispersar este material para aplicação em matrizes cimentícias. Entre elas, pode-se citar a funcionalização covalente (adição de grupos funcionais no NTC, como por exemplo, a hidroxila); e a solução de água e NTC, com ou sem aditivo dispersante, aplicando pulsos de ondas ultrassônicas. Acredita-se que, devido à utilização do método de funcionalização do NTC, teoricamente não será preciso utilizar outro método de dispersão para esse nanomaterial para sua inserção em misturas cimentícias, uma vez que o grupo funcional adicionado fará o papel de promover a repulsão química entre as nanopartículas.

Verificou-se em vários estudos que a boa dispersão do NTCPM em matrizes cimentícias acarreta aprimoramento de suas propriedades mecânicas e durabilidade. Os teores mais utilizados de NTCPM que mostraram resultados benéficos para as propriedades de misturas cimentícias nos estudos relatados no presente trabalho variaram entre 0,05% e 0,5% em relação à massa de cimento Portland.

Porém, verifica-se que, em geral, na literatura atual, o teor ideal de utilização de NTCPM que resultou no aprimoramento das propriedades mecânicas de matrizes cimentícias foi o teor de 0,1%, o qual será adotado como teor utilizável para este trabalho. Ao encontro disso, nos estudos de Silvestro e Gleize (2020) e Silvestro (2022), foi verificado que o teor de 0,1% de NTCPM foi o teor que resultou em maior quantidade de estudos que relataram aprimoramentos nas propriedades mecânicas dos compósitos.

Em estudos recentes, Hawreen e Bogas (2019) empregaram o NTC em uma parte da água de amassamento antes de misturar com os demais insumos do concreto e obtiveram melhorias nas propriedades mecânicas da matriz. Dessa maneira, escolheu-se fazer o mesmo para o presente estudo.

A grande parte dos estudos que utilizam NTC em misturas cimentícias utilizam o nanomaterial como adição na mistura, e essas misturas são argamassas ou pastas. Há poucos trabalhos utilizando o NTCPM em concreto de cimento Portland, e não há estudos que façam a comparação das propriedades nos estados fresco e endurecido de concretos com mesmas resistências à compressão com e sem a utilização de NTCPM. Ressalta-se ainda que não há trabalhos publicados referentes à influência do nanomaterial nas propriedades reológicas de concretos como o presente estudo se propõe a investigar.

Vale ressaltar que, com a utilização do NTCPM, espera-se que a resistência à compressão do concreto seja aprimorada, acarretando diminuição no consumo de cimento Portland. Consequentemente será feita a retirada da quantidade necessária de cimento Portland até atingir a mesma classe de resistência que o concreto de referência, e então as propriedades desses concretos de mesma resistência (com e sem NTC) serão analisadas.

Assim, este estudo objetiva analisar as propriedades de concretos produzidos com a substituição de cimento Portland por NTCPM, mantendo fixo o parâmetro da resistência à compressão.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico serão descritos os procedimentos para a confecção das misturas cimentícias, bem como o processo de escolha e a caracterização dos materiais (insumos) empregados na confecção das pastas, argamassas e concretos.

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS INSUMOS

Neste tópico serão dispostas as caracterizações físicas e químicas dos materiais/insumos que foram utilizados no estudo, além de descritos os procedimentos para obtenção desses resultados.

##### 3.1.1 Cimento Portland

O ligante hidráulico utilizado foi o CP V – ARI. Esse cimento foi escolhido por ter a característica de ganho rápido de suas propriedades mecânicas, bem como por possuir a maior pureza entre os cimentos comercializados no Brasil. Assim, o efeito da utilização de nanomateriais, nesse caso, o NTCPM, não será mascarado por outras reações que podem ocorrer devido à presença de materiais não inertes, como é o caso de outros cimentos.

Para a caracterização deste material, foi realizado o ensaio de granulometria a laser, e as demais características foram fornecidas pelo fabricante. A caracterização química, física e mecânica do cimento que o fabricante fornece está na Tabela 2.

Figura 11 – Distribuição do tamanho de partículas do cimento Portland

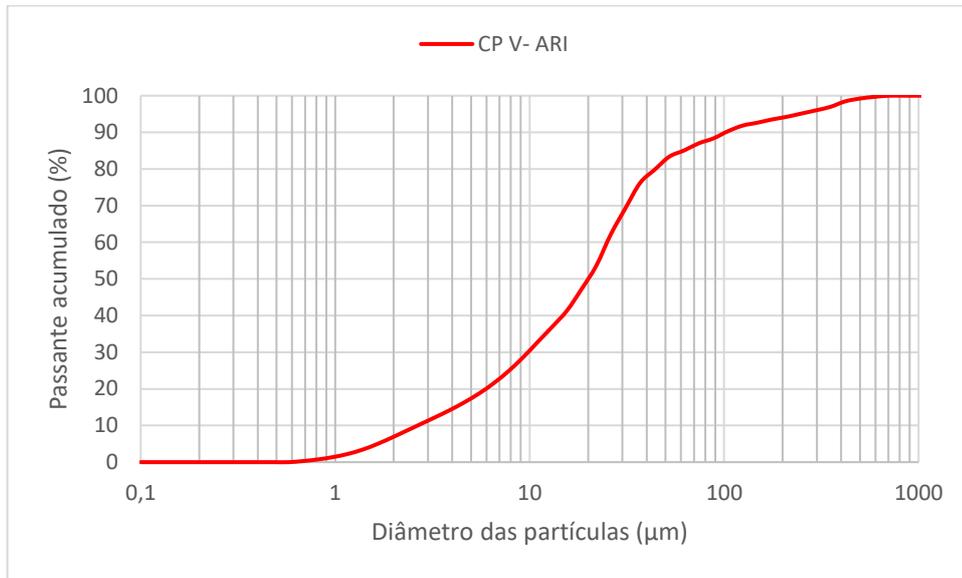


Tabela 2 – Caracterização física e química do cimento

<b>CPV – ARI</b>		
<b>Ensaio Físico</b>		
<b>Blaine (cm<sup>2</sup>/g)</b>	Média	4911
<b>Resistência à compressão 1 dia (MPa)</b>	Média	24,7
<b>Resistência à compressão 7 dias (MPa)</b>	Média	42,1
<b>Resistência à compressão 28 dias (MPa)</b>	Média	50,2
<b>Análise Química (%)</b>		
<b>CaO</b>	NBR 14656	59,2
<b>C3S</b>	DRX	56,50
<b>SiO</b>	NBR 14656	18,3
<b>C4AF</b>	DRX	9,26
<b>C2S</b>	DRX	7,03
<b>MgO</b>	NBR 14656	5,8
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	NBR 14656	4,3
<b>CO<sub>2</sub></b>	NBR NM 20	4,1
<b>C<sub>3</sub>A (Teórico)</b>	DRX	3,11
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	NBR 14656	3,0
<b>SO<sub>3</sub></b>	NBR 14656	2,4

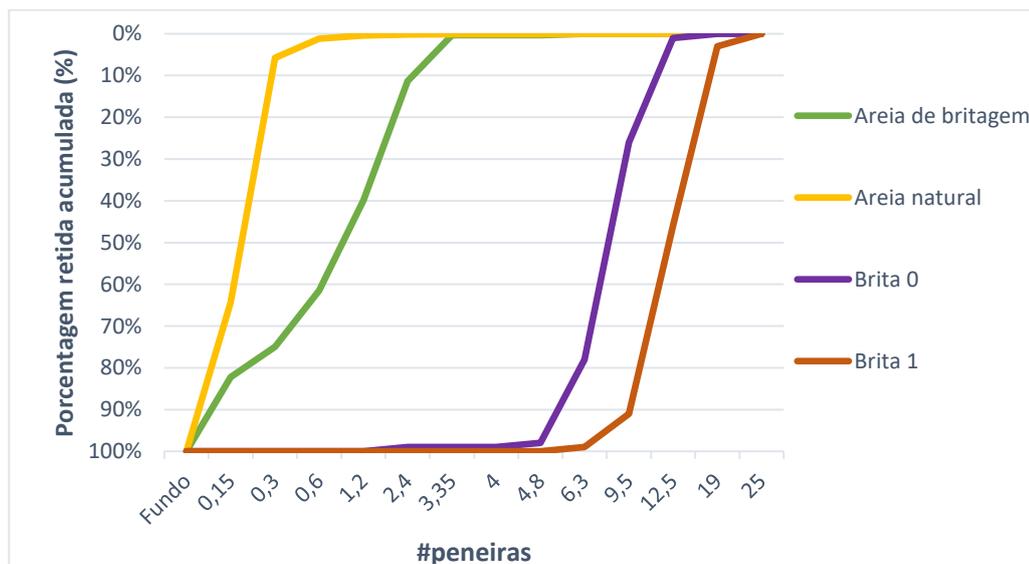
<b>R.I.</b>	NBR NM 15	2,5
<b>PF 1000°C</b>	NBR NM 18	5,4

Fonte: Supremo, 2018.

### 3.1.2 Agregados miúdos e graúdos

Para a caracterização dos agregados miúdos, foram realizados os ensaios de massa específica, granulometria e módulo de finura, conforme as NBR NM 52 (2009), NBR NM 248 (2003) e NBR NM 46 (2003). Para a caracterização dos agregados graúdos, foram realizados os ensaios de massa específica e granulometria, conforme as NBR NM 53 (2009) e NBR NM 248 (2003). As curvas granulométricas dos agregados estão dispostas na Figura 12.

Figura 12 – Granulometria dos agregados



Conforme pode-se verificar, a areia natural possui um grau de finura maior do que a areia de britagem. Com o ensaio granulométrico realizado, pôde-se encontrar os módulos de finura das areias, sendo eles de 3,03 para a areia de britagem, e de 1,04 para a areia natural. A areia de britagem resultou em massa específica igual a 2,83 kg/dm<sup>3</sup>, e a areia natural teve uma massa específica igual a 2,62 kg/dm<sup>3</sup>. Já para os agregados graúdos (brita 0 e 1), observa-se que o diâmetro máximo dos agregados foi de 12,5 mm para a brita 0, e 19,5 mm para a brita 1. Suas massas específicas resultaram em valores de 2,82 kg/dm<sup>3</sup> para ambas as britas.

### 3.1.3 Aditivo

O aditivo utilizado no estudo foi o aditivo dispersante de terceira geração MC *Powerflow* 4001, da empresa MC Bauchemie. Esse aditivo foi escolhido por conta da sua alta utilização em obras com o concreto padrão. A caracterização deste aditivo foi obtida através do fabricante e é ilustrada na Tabela 3.

Tabela 3 – Caracterização do aditivo dispersante utilizado

<b>Aditivo</b>	<b>MC POWERFLOW 4001</b>
<b>Tipo</b>	Dispersante à base de PCE
<b>Densidade (kg/L)</b>	1,12
<b>Dosagem recomendada (%)</b>	0,2 a 5,0

Fonte: MC Bauchemie, 2022.

### 3.1.4 NTCPM

Os nanotubos de carbono de paredes múltiplas utilizados no estudo foram adquiridos da empresa *Nanostructured & Amorphous Materials* – Inc. Segundo dados da empresa, os NTCPMs possuem diâmetro interno de 2-5 nm, e diâmetro externo de 5 e 15 nm, com comprimento de 1030  $\mu\text{m}$ , e funcionalizados com carboxila. Conforme a empresa fornece, o nanomaterial recebeu um tratamento ácido para obtenção de grupos carboxila em sua superfície. As características desse material foram dispostas pelo fabricante e são mostradas na Tabela 4.

Tabela 4 – Características do NTCPM

<b>NTCPM - COOH</b>	
<b>Quantidade do grupo funcionalizante (%)</b>	3,86
<b>Pureza</b>	>98%
<b>Diâmetro Interno (nm)</b>	2 - 5
<b>Diâmetro externo (nm)</b>	5 - 15
<b>Comprimento (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	10-30
<b>Área Superficial específica (<math>\text{m}^2/\text{g}</math>)</b>	220 - 300

Fonte: Nanoamor (2019)

Conforme descrito anteriormente, o percentual de utilização do NTCPM adotado para este estudo foi de 0,1% em relação à massa de cimento Portland do compósito de referência. Em grande parte dos trabalhos estudados, foram identificados teores ótimos de NTCPM em torno de 0,1%, quando analisado o aprimoramento das propriedades mecânicas de matrizes estudadas.

### 3.1.5 Água

A água utilizada é da própria rede de abastecimento do laboratório de materiais de construção civil da Universidade Federal de Santa Catarina (LMCC – UFSC), fornecida pela Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (CASAN).

## 3.2 PRODUÇÃO DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS

### 3.2.1 Determinação dos parâmetros a serem utilizados

A primeira etapa após a caracterização dos materiais consistiu em produzir argamassas visando a encontrar a composição ideal dos agregados miúdos para que se obtenha menor consumo de cimento Portland com mesmo abatimento em concreto do mesmo cimento. Para isso, foi realizada a composição das duas areias, conforme o índice de argamassas produzido pelo grupo GETEC – Grupo de Estudos e Tecnologia em Compostos de Cimento Portland da Universidade Federal de Santa Catarina (WEIDMANN, 2008). O autor verificou que a correlação do índice obtido com a demanda de água do concreto foi significativa. Ainda, indicou que a composição de areias que proporcionam o maior índice de fluidez em argamassa apresentará maior potencial para uso em concreto. Portanto, maior índice de fluidez na argamassa resultará em menor consumo de cimento Portland em concreto para uma mesma relação a/c, já que o consumo de água é diminuído para um mesmo abatimento.

Esse índice de argamassas relaciona o espalhamento das argamassas pelo módulo de finura do conjunto de agregados miúdos utilizados. Os agregados miúdos estudados foram: uma areia de duna (areia fina) e uma areia industrial ou areia de britagem. Essa escolha foi feita pelo fato de que a empresa fornecedora dos agregados emprega esses dois tipos de areias para confecção de concretos com as resistências que serão abordadas no presente estudo.

Foram realizados estudos da composição das areias de britagem (AB) e natural (NA) nas proporções volumétricas de: (i) 30% / 70% (AB/NA); (ii) 40% / 60% (AB/NA); (iii) 50% / 50% (AB/NA); (iv) 60% / 40% (AB/NA); (v) 70% / 30% (AB/NA). As argamassas produzidas tiveram como parâmetros a relação cimento Portland/agregado miúdo volumétrico de 1:3, a relação água/cimento de 0,5, e o teor de 0,2% de aditivo dispersante em relação à massa de cimento Portland. Assim, foram produzidas 5 argamassas para verificar o seu índice de espalhamento e assim poder determinar a melhor composição das areias. Os traços dessas argamassas são mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 – Quantitativos das argamassas produzidas para determinação do índice de argamassa

Insumos	Argamassas				
	(AN50/AB50)	(AN60/AB40)	(AN70/AB30)	(AN40/AB60)	(AN30/AB70)
<b>Cimento (g)</b>	556,76	556,76	556,76	556,76	556,76
<b>Areia natural (g)</b>	708,65	850,38	992,11	566,92	425,19
<b>Areia de britagem (g)</b>	763,78	611,03	458,27	916,54	1069,30
<b>Água (g)</b>	279,28	279,28	279,28	279,28	279,28
<b>Aditivo (g)</b>	1,114	1,114	1,114	1,114	1,114

O procedimento geral de mistura para todas as argamassas foi determinado da seguinte forma: (i) Mistura dos materiais secos durante 1 minuto (cimento Portland, areia natural e areia de britagem); (ii) Adição de água – cerca de 5/6 do total –, procedendo-se a mistura durante o período de 6 minutos; (iii) Após o primeiro minuto de mistura, adição da quantidade de aditivo adotada (pré-fixada ou até atingir o espalhamento desejado, conforme verificação visual) até atingir no máximo dois minutos de mistura. Vale assinalar que se utilizou a quantidade de 1/6 da água total para limpar o recipiente do aditivo e então inserir essa água com aditivo na mistura cimentícia. Conforme verificado, o tempo de mistura total foi fixado em 7 minutos  $\pm$  30 segundos.

Após essa etapa, fez-se a determinação do método de escolha para inserção do nanomaterial na mistura cimentícia. Para isso foi replicada a argamassa com a composição ideal dos agregados miúdos para que nela fosse inserida o NTCPM. O nanomaterial foi introduzido na mistura por meio de solução aquosa, podendo conter ou não aditivo superplastificante. As soluções aquosas foram agitadas manualmente ou com agitador magnético para verificar se algum desses métodos poderia resultar em melhor dispersão dos nanomateriais através dos resultados de ensaios

mecânicos. Conforme Hawreen e Bogas (2019), a quantidade de água da solução aquosa foi fixada em 40% do total da água de amassamento de cada mistura cimentícia.

As soluções aquosas foram produzidas com e sem aditivo superplastificante, nas proporções de 1:0 em massa (NTCPM: aditivo superplastificante), 1:1, 1:2 e 1:4. A quantidade de NTCPM, conforme já descrito anteriormente, foi de 0,1% em relação à massa de cimento Portland. As soluções aquosas agitadas manualmente foram misturadas durante o período de um minuto. Esse tempo foi adotado após testes prévios, em que foram agitadas manualmente soluções com relação de 1:0 durante os tempos de um minuto, dois minutos, três minutos, quatro minutos e cinco minutos. A solução agitada durante o tempo de um minuto apresentou visualmente a mesma condição de dispersão do que as demais. Assim, adotou-se a agitação manual no tempo de um minuto. A relação de 1:0 foi adotada por ser teoricamente a solução de mais difícil dispersão dos NTCPMs. Para a agitação magnética foi utilizada apenas uma relação NTCPM: aditivo (1:2) para verificar se haveria diferença no tipo de agitação na resistência à compressão da argamassa. A agitação magnética foi realizada em um agitador magnético, que é um equipamento de laboratório utilizado para realizar misturas. O agitador magnético funciona como um ímã que gira acoplado a um motor elétrico, a força magnética do ímã faz girar uma barra magnética colocada dentro da amostra e assim promove a mistura da amostra. Com isso, foram produzidas cinco soluções aquosas para produção das argamassas. Para melhor ilustrar o procedimento de agitação das soluções aquosas, foi produzida a Figura 13, onde é ilustrada a composição das soluções e o procedimento das mesmas.

Figura 13 – Preparo das soluções aquosas com NTCPM



Após o preparo de cada solução aquosa com seu determinado teor de aditivo dispersante e tipo de agitação (manual ou magnética), cada solução foi adicionada na argamassa determinada. As argamassas produzidas tiveram a relação a/c fixada em 0,50, e espalhamento controlado entre 200 mm  $\pm$  20 mm. As quantidades dos insumos para produção das argamassas são mostradas na Tabela 6.

Tabela 6 - Quantitativos dos insumos referentes a argamassa produzidas com e sem as soluções aquosas

Quantitativos	
Cimento (g)	557,42
Areia natural (g)	990,95
Areia de britagem (g)	458,18
Água (g)	279,54

Com a solução aquosa sendo inserida na argamassa, o teor de aditivo e o tipo de agitação necessária foram determinados por meio de sua resistência à compressão aos 28 dias. Foram feitos três corpos de prova para realizar o ensaio de resistência à compressão aos 28 dias de cada argamassa produzida.

Após a determinação da solução aquosa ideal, foram produzidas argamassas com a solução aquosa ideal com menores consumos de cimento Portland. Esse procedimento foi feito com o objetivo de encontrar o teor ideal de diminuição no consumo de cimento Portland para utilização do nanomaterial, para que assim fosse utilizado para produção das argamassas e concretos. O teor ideal de diminuição do consumo de cimento Portland seria a argamassa com o nanomaterial com menor consumo de cimento que apresentasse a mesma resistência à compressão aos 28

dias da argamassa de referência. Assim, o teor ideal de diminuição de consumo de cimento foi determinado por meio de ensaio de resistência à compressão das argamassas aos 28 dias.

Para isso, foram produzidas argamassas com diminuição do consumo de cimento Portland nos teores de 5%, 10% e 15%, com e sem NTCPM. Conforme descrito anteriormente, essa diminuição do consumo de cimento Portland foi feita objetivando alcançar a mesma resistência à compressão aos 28 dias da argamassa de referência, uma vez que a utilização de NTCPM na argamassa poderia promover um aumento na sua resistência à compressão.

Ressalta-se que a quantidade retirada de cimento foi feita em volume e substituída pela quantidade volumétrica da composição das areias para não alterar o volume de mistura. Além disso, foi retirada a quantidade necessária de água para que a relação água/cimento Portland não fosse alterada, e essa quantidade volumétrica de água também foi substituída por volume de areia.

Além das argamassas com menor consumo de cimento Portland com utilização de NTCPM, foram produzidas essas mesmas argamassas com diminuição de cimento Portland sem o nanomaterial. Isso foi feito para analisar as argamassas sem o nanomaterial para compará-las com a argamassa de referência e as demais argamassas. Os traços produzidos constam na Tabela 7.

Tabela 7 – Quantitativos dos insumos referente às argamassas produzidas com e sem diminuição do consumo de cimento Portland

Quantitativos								
Insumos	REF	MWCNT	SW5	S5	SW10	S10	SW15	S15
cimento (g)	557,42	557,42	529,55	529,55	501,68	501,68	473,81	473,81
areia natural (g)	990,95	990,95	1031,52	1031,52	1073,63	1073,63	1115,77	1115,77
areia de britagem (g)	458,18	458,18	476,94	476,94	496,42	496,42	515,89	515,89
água (g)	279,54	279,54	264,77	264,77	250,84	250,84	236,9	236,9
NTC(g)	-	0,56	-	0,56	-	0,56	-	0,56

O significado das siglas na Tabela são: (1) REF: argamassa de referência; (2) MWCNT: argamassa com adição de 0,1% de nanotubo de carbono de paredes múltiplas; (3) S5: argamassa com consumo de cimento 5% menor do que a argamassa de referência e com nanotubo de carbono no teor de 0,1% em relação ao traço de referência; (4) S10: argamassa com consumo de cimento 10% menor do que a argamassa de referência e com nanotubo de carbono no teor de 0,1% em relação ao

traço de referência; (5) S15: argamassa com consumo de cimento 15% menor do que a argamassa de referência e com nanotubo de carbono no teor de 0,1% em relação ao traço de referência.

As argamassas foram produzidas em argamassadeira de bancada eletromecânica de movimento planetário. Os insumos das argamassas foram misturados da seguinte maneira: (1) foram misturados em conjunto o aglomerante e o agregado miúdo durante 1 minuto; (2) adicionou-se à mistura a água de amassamento (com os NTCPMs e sem os NTCPMs), e então misturaram-se durante 2 minutos; (3) foi inserido o aditivo dispersante para que o espalhamento da argamassa atingisse o valor de  $20 \text{ cm} \pm 2 \text{ cm}$ ; (4) a mistura foi agitada pelo tempo de 3 minutos, e então foi realizado o teste de espalhamento na mesa de espalhamento de argamassa. Para essas argamassas foi realizado o ensaio de resistência à compressão aos 28 dias (três corpos de prova para cada mistura) para encontrar o teor ideal de diminuição do consumo de cimento Portland a ser utilizado com a inserção do nanomaterial (equivalência de resistência entre a argamassa REF e aquela com menor consumo de cimento com a utilização do NTCPM).

Por fim, foi utilizado o teor ideal de diminuição de consumo de cimento Portland com a utilização do nanomaterial para verificar se haveria diferença nas propriedades mecânicas das argamassas, produzindo-as com espalhamento fixo e com teor de aditivo “fixo” em relação ao consumo de cimento Portland. Para isso, foram produzidas argamassas com o teor ideal de diminuição do consumo de cimento Portland com a relação  $a/c$  de 0,50, com o teor de aditivo fixado e com espalhamento fixo. O espalhamento fixo adotado foi de  $220 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm}$ .

O teor de aditivo “fixo” foi feito da seguinte forma: (1) determinou-se que os traços deveriam ter um espalhamento adequado para que não houvesse dificuldades na moldagem dos corpos de prova (espalhamento maior que 180 mm); (2) Produção dos traços principais de cada consumo de cimento Portland (REF, SW5 e SW10); (3) As mesmas quantidades de aditivo utilizadas nos traços principais foram adotadas para produção dos traços com o nanomaterial (MWCNT, S5 e S10). Assim, foi fixado o teor de aditivo em relação a cada traço principal. O aditivo não pôde ser fixado para todos os traços, pois haveria traços em que não haveria possibilidade de moldagem por não ter fluidez suficiente ou por outros traços exsudarem. Os traços utilizados são mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 – Quantitativos dos insumos para produção das argamassas com aditivo e espalhamento fixo

Materiais	Argamassa com espalhamento fixo (220 ± 20 mm)					
	REF	MWCNT	SW5	S5	SW10	S10
Cimento (g)	557,42	557,42	529,55	529,55	501,68	501,68
Areia natural (g)	990,95	990,95	1031,52	1031,52	1073,63	1073,63
Areia de britagem (g)	458,18	458,18	476,94	476,94	496,42	496,42
Água (g)	279,54	279,54	264,77	264,77	250,84	250,84
NTCPM (g)	-	0,57	-	0,57	-	0,57
Aditivo (g)	1,5	2,12	1,82	1,92	3,02	3,12
Materiais	Argamassa com teor de aditivo fixo					
	REF	MWCNT	SW5	S5	SW10	S10
Cimento (g)	557,42	557,42	529,55	529,55	501,68	501,68
Areia natural (g)	990,95	990,95	1031,52	1031,52	1073,63	1073,63
Areia de britagem (g)	458,18	458,18	476,94	476,94	496,42	496,42
Água (g)	279,54	279,54	264,77	264,77	250,84	250,84
NTCPM (g)	-	0,57	-	0,57	-	0,57
Aditivo (g)	1,67	1,67	2,10	2,10	2,51	2,51

O significado das siglas na Tabela são: (1) REF: argamassa de referência; (2) MWCNT: argamassa com adição de 0,1% de nanotubo de carbono de paredes múltiplas; (3) SW5: argamassa com consumo de cimento 5% menor do que a argamassa de referência; (4) S5: argamassa com consumo de cimento 5% menor do que a argamassa de referência e com nanotubo de carbono no teor de 0,1% em relação ao traço de referência; (5) SW10: argamassa com consumo de cimento 10% menor do que a argamassa de referência; (6) S10: argamassa com consumo de cimento 10% menor do que a argamassa de referência e com nanotubo de carbono no teor de 0,1% em relação ao traço de referência.

Para analisar a influência do teor fixo de aditivo e do espalhamento fixo das argamassas, foram realizados os ensaios de resistência à compressão (três corpos de prova para cada argamassa produzida), resistência de tração na flexão (três corpos de prova para cada argamassa) e módulo de elasticidade dinâmico. Todos os ensaios foram realizados para a idade de 28 dias. Além disso, foram coletados os resultados no estado fresco dessas argamassas com os ensaios de espalhamento e massa específica.

### 3.2.2 Concretos

Após a etapa de determinação de parâmetros para a produção das argamassas, foram utilizados esses parâmetros para produção dos concretos. Nesta etapa, foram produzidos os concretos com três relações água/cimento Portland distintas (0,48; 0,53; e 0,58), para cada relação água/cimento Portland, foi produzido um concreto referência, com e sem adição de NTCPM, e com diminuição de consumo de cimento Portland em 10%, com e sem NTCPM. Ressalta-se que a diminuição do consumo de cimento Portland foi compensada pelo aumento da quantidade de agregados proporcionalmente. Foram determinadas essas relações a/c para que os concretos produzidos se encaixassem em classes de resistências que são corriqueiramente utilizadas pelas empresas/concreteiras (concreto padrão). Assim, essas relações água/cimento tem como objetivo manter os concretos no Grupo de resistência 1, que engloba as resistências entre 20 MPa e 55 MPa, conforme a ABNT NBR 8953 (2015). Os concretos foram produzidos com os parâmetros fixos de relação a/c, o consumo de água por m<sup>3</sup> de concreto (180 litros/m<sup>3</sup>), e o teor volumétrico de argamassa.

Foram produzidos 12 concretos, e, para cada concreto, foram realizados os ensaios no estado fresco do abatimento de tronco de cone conforme a ABNT NBR 16889 (2020), massa específica conforme a ABNT NBR 9833 (2008), e reologia. Já para o estado endurecido, foram realizados os ensaios de resistência à compressão (seis corpos de prova) conforme a ABNT NBR 5739 (2018), de retração por secagem (três corpos de prova) conforme a ASTM C 157 (2016), de módulo de elasticidade *sonelástico* (mesmos corpos de prova da resistência à compressão), e de absorção de água por imersão (três corpos de prova) conforme a ABNT NBR 9778 (2005). Assim, foram produzidos nove corpos de prova cilíndricos e três prismáticos para cada traço de concreto, totalizando 144 corpos de prova no total, sendo 108 corpos de prova cilíndricos, e 36 corpos de prova prismáticos. Os traços dos concretos produzidos estão dispostos na Tabela 9.

Tabela 9 – Quantitativos dos insumos referentes aos concretos produzidos

Materiais	Relação a/c 0,48			
	REF	MWCNT	SW10	S10
Cimento (Kg)	9,500	9,500	8,550	8,550
Areia natural (Kg)	13,749	13,749	14,567	14,567

Areia de britagem (Kg)	6,381	6,381	6,972	6,972
Brita 0 (Kg)	12,581	12,581	12,914	12,914
Brita 1 (Kg)	12,581	12,581	12,914	12,914
NTCPM (g)	-	4,560	-	4,104
Aditivo (g)	40,85	40,85	59,85	59,85
<b>Materiais</b>	<b>Relação a/c 0,53</b>			
	<b>REF</b>	<b>MWCNT</b>	<b>SW10</b>	<b>S10</b>
Cimento (Kg)	8,604	8,604	7,743	7,743
Areia natural (Kg)	14,242	14,242	14,989	14,989
Areia de britagem (Kg)	6,610	6,610	7,150	7,150
Brita 0 (Kg)	12,602	12,602	12,928	12,928
Brita 1 (Kg)	12,602	12,602	12,928	12,928
NTCPM (g)	-	4,560	-	4,104
Aditivo (g)	31,84	31,84	46,46	46,46
<b>Materiais</b>	<b>Relação a/c 0,58</b>			
	<b>REF</b>	<b>MWCNT</b>	<b>SW10</b>	<b>S10</b>
Cimento (Kg)	7,862	7,862	7,076	7,076
Areia natural (Kg)	14,648	14,648	15,412	15,412
Areia de britagem (Kg)	6,798	6,798	7,328	7,328
Brita 0 (Kg)	12,622	12,622	12,941	12,941
Brita 1 (Kg)	12,622	12,622	12,942	12,942
NTCPM (g)	-	4,560	-	4,104
Aditivo (g)	23,58	23,58	37,50	37,50

Os concretos foram produzidos em betoneira com capacidade máxima de 120 litros e com o mesmo volume de mistura para que não houvesse diferença entre as energias de mistura. A mistura foi feita da seguinte maneira: colocou-se todo agregado graúdo na betoneira juntamente com a solução de água (água + NTCPM + aditivo) ou um terço da água para os concretos sem NTCPM, aditivo dispersante de terceira geração e NTCPM. Em seguida, foi realizada a mistura durante 1 minuto. Após isso, foi adicionado o cimento Portland, e misturou-se por mais 1 minuto. Por fim, foram adicionados o agregado miúdo e o restante da água, misturando por mais 5 minutos. A solução com NTCPM foi produzida conforme descrito na primeira etapa.

Após esse processo de misturas, adicionou-se o aditivo para que o concreto tivesse um abatimento entre 190 mm  $\pm$  30 mm. Durante a incorporação do aditivo, foi realizado o teste do abatimento do tronco de cone para a verificação do abatimento da mistura. Ainda, foram descartados os concretos que não obtiveram o abatimento desejado até o terceiro teste de abatimento de tronco de cone. É importante ressaltar que apenas os concretos principais foram ajustados com aditivo (REF e SW10). A quantidade de aditivo utilizado para os concretos MWCNT e S10 foi a mesma

quantidade que foi utilizada para obtenção do abatimento desejado do seu concreto original, ou seja, ajustaram-se os abatimentos dos concretos REF e SW10 para cada relação a/c com uma determinada quantidade de aditivo, e essa mesma quantidade de aditivo foi utilizada para os concretos MWCNT e S10.

Além do teste do abatimento do tronco de cone, foi realizado o ensaio de massa específica de cada mistura cimentícia, com a finalidade de verificar a incorporação de ar de cada mistura, a qual pode afetar as propriedades mecânicas no estado endurecido do concreto. O ensaio de massa específica foi realizado em um recipiente no qual eram conhecidos sua massa e seu volume. O molde foi preenchido com duas camadas semelhantes do concreto produzido, adensando-as em duas camadas com 25 golpes cada, com a mesma haste utilizada para realizar o teste do abatimento do tronco de cone. Após o processo de preenchimento e adensamento do concreto no recipiente, foi realizada a pesagem do conjunto (concreto + recipiente).

Por fim, foram moldados os corpos de prova cilíndricos. Os moldes produzidos tinham dimensões de 10 cm x 20 cm (diâmetro x altura) e foram adensados em três camadas iguais com 12 golpes com a haste metálica utilizada no ensaio de abatimento de tronco de cone. Os corpos de prova foram desformados após 24 horas e colocados em câmara úmida, submersos em água com cal, com temperatura controlada de  $23^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ . e umidade de aproximadamente 95%, até as idades de ensaio.

Ainda no estado fresco, foi realizado o ensaio de reologia no laboratório de solos e tecnologias de materiais que pertence ao Instituto Federal de Santa Catarina – Florianópolis (IFSC). O reômetro utilizado foi o de servo controlado Pheso (MATOS, 2021). Os autores comentam que este equipamento permite manter a amostra de concreto homogênea durante a realização do ensaio, o que ocorre devido à aplicação do cisalhamento de forma concêntrica e planetária. Segundo Matos (2021), a geometria evita o escorregamento da mistura, garantindo que a deformação medida seja proveniente unicamente do cisalhamento do material. O ensaio reológico foi feito de maneira a impor diferentes velocidades de rotação a uma amostra de concreto de 20 litros e avaliar o torque necessário para obter tais velocidades. A geometria adotada apresenta diâmetro de 282,8 mm e altura de 105,6 mm, enquanto o recipiente do reômetro tem 388,3 mm de diâmetro e 200,5 mm de altura (MATOS, 2021). O reômetro utilizado é ilustrado na Figura 14.

Figura 14 – Equipamento para ensaio reológico de concreto



O ensaio de resistência à compressão dos concretos e argamassas foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis (LMCC-UFSC), na prensa hidráulica modelo UH-2000 KN da marca Shimadzu. Os ensaios de resistência à compressão foram realizados para as idades de 3 e 28 dias, sendo utilizado para cada idade três corpos de prova.

O ensaio de módulo de elasticidade foi feito no Laboratório de Aplicações de Nanotecnologia em Construção Civil (NANOTEC-LAB). O módulo de elasticidade foi obtido pelo equipamento sonelastic, que foi desenvolvido e fabricado pela empresa ATP Engenharia Física. Esse ensaio consiste em gerar excitação por impulso com impacto de um determinado objeto em uma face do corpo de prova. Essa excitação provocada pelo impacto do objeto é obtida por um captador acústico que fica alocado no local determinado pelo método escolhido, que é indicado pelo programa (VASCONCELLOS, 2018). Com o impulso fornecido, o programa informará uma frequência de ressonância fundamental longitudinal (Hz). Uma vez obtida essa frequência, pode ser determinado o módulo de elasticidade por meio das equações 1 e 2.

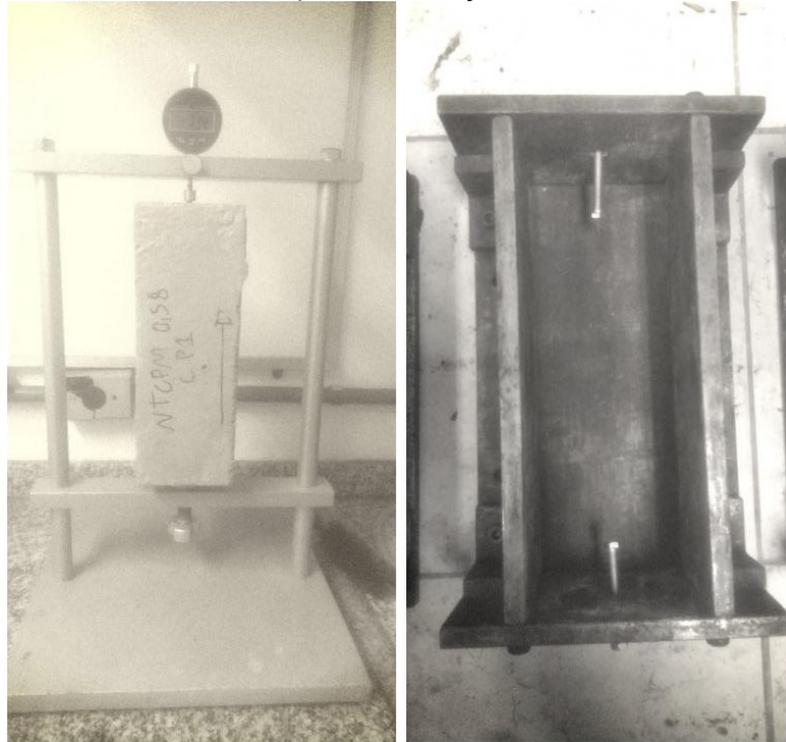
$$K = 1 - \left( \frac{\pi^2 \cdot \mu^2 \cdot D^2}{8 \cdot L^2} \right) \quad (1)$$

$$E_{d, impulso} = 16 \cdot m \cdot f^2 \cdot \left( \frac{L}{\pi \cdot D^2 \cdot K} \right) \quad (2)$$

Para o ensaio de retração, as medidas de retração por secagem foram obtidas por meio da produção de prismas conforme a ASTM C 157 (2016). Assim, moldaram-se três corpos de prova para cada relação água/cimento e para cada concreto. Cada corpo de prova foi colocado no pórtico de ensaio de retração, o qual consiste em deixar o corpo de prova em contato com o ambiente na posição vertical. Fez-se a medição da retração de cada corpo de prova por meio de relógio comparador digital. O corpo de prova foi deixado livre de restrições durante os períodos em que se fez as leituras. Para proporcionar a leitura no relógio comparador digital, foram utilizados parafusos nas extremidades do corpo de prova. Os parafusos foram dispostos no molde metálico antes da moldagem do corpo de prova. A distância entre os parafusos foi medida para ser considerada nos cálculos como a distância livre de cada corpo de prova. Houve o cuidado de padronizar essa distância livre em 190mm, entretanto, não foi possível executar isso para todos os corpos de prova. Para esses corpos de prova com distância livre entre os pinos diferente de 190mm, foi anotada essa distância para ser considerada nos cálculos.

O ensaio de retração de secagem foi realizado durante 56 dias, período em que geralmente a curva de retração por secagem deve começar a se estabilizar conforme verificados nos trabalhos (VICH; FLÁDR; BROUKALOVÁ, 2019; SONG, *et al.* 2019; VARDHAN; SIDDIQUE; GOYAL, 2019; ABDEL-GAWWAD; MOHAMMED; ALOMAYRI, 2019). Os autores fizeram somente o controle de temperatura ambiente e umidade relativa do ambiente. Assim, nesta pesquisa foi adotado o mesmo procedimento de controle usado por eles, controlando a temperatura do ambiente e a umidade relativa do ambiente em  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  e  $60\% \pm 15\%$ , respectivamente. As leituras da retração por meio do relógio comparador foram feitas a cada 24 horas durante os três dias, e, após os três dias, foram feitas leituras nas idades de 7, 14, 28 e 56 dias, bem como o corpo de prova foi pesado antes de cada leitura de retração feita para cada idade. Ainda, teve-se o cuidado de anotar o horário de produção de cada concreto para fazer a leitura próximo ao horário de produção de cada concreto para estabelecer um padrão de leitura para todos os concretos produzidos. O pórtico e o molde prismático utilizado para fazer a leitura da retração são ilustrados na Figura 15.

Figura 15 – Equipamentos utilizados para medição de retração e molde para confecção do corpo de prova de retração



Por fim, foi realizado o ensaio de porosidade aberta para a idade de 28 dias. Nesse ensaio foram utilizados três corpos de prova, os quais foram secos em estufa em temperatura de  $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  durante 72 horas, período após o qual foram então pesados e imersos em água e mantidos por outras 72 horas. Após retirados da água, foram colocados em um recipiente cheio de água, que foi progressivamente aquecido até a ebulição, e mantidos nessa condição durante o período de cinco horas (mantendo-se o volume constante de água). Depois desse período de ebulição, os corpos de prova foram deixados dentro do recipiente com água até que a água atingisse a temperatura de  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  para que então fosse realizada a pesagem por meio de uma balança hidrostática. Por fim, os corpos de prova foram secos com pano úmido e pesados para registrar sua massa saturada. O ensaio foi realizado com base na ABNT NBR 9778 (2005).

### 3.2.3 Pastas

Após os ensaios de concretos, foram produzidas pastas para verificar a influência no calor liberado por cada mistura por meio do ensaio de calorimetria isotérmica. Ainda, para verificar se haveria diferentes compostos químicos formados em cada mistura, foram analisadas amostras de cada pasta produzida por meio dos

ensaios de DRX e FTIR. Para essas misturas, foi adicionada um pó fino e inerte para que as pastas de cimento Portland não exsudassem devido à elevada relação água/cimento utilizada no presente estudo. Também foi simulado o comportamento dos concretos, retirando-se cimento e água e aumentando-se a quantidade de agregado miúdo (pó de quartzo). A composição das pastas é mostrada na Tabela 9.

Tabela 10 – Composição das pastas

Materiais	REF			MWCNT		
	0,48	0,53	0,58	0,48	0,53	0,58
Cimento (g)	50	50	50	50	50	50
Material inerte(g)	50	50	50	50	50	50
Água (g)	24	26,5	29	24	26,5	29
Aditivo (g)	0,14	0,12	0,1	0,14	0,12	0,1
NTCPM (g)	-	-	-	0,05	0,05	0,05
Materiais	SW10			S10		
	0,48	0,53	0,58	0,48	0,53	0,58
Cimento (g)	45	45	45	45	45	45
Material inerte (g)	61	62	63	61	62	63
Água (g)	21,6	23,85	26,1	21,6	23,85	26,1
Aditivo (g)	0,2	0,17	0,14	0,2	0,17	0,14
NTCPM (g)	-	-	-	0,045	0,045	0,045

As pastas foram produzidas em misturador de alta potência, com velocidade de 1000 rpm, durante três minutos. A mistura foi feita da seguinte forma: colocou-se a água no recipiente em que se faria a mistura, adicionando-se o cimento Portland durante o primeiro minuto de mistura. Após esse primeiro minuto, o aditivo foi inserido em mesmo teor para as pastas com e sem o nanomaterial, teor que foi definido a partir de cada pasta de referência (REF e SW10). O teor foi definido a partir do espalhamento das pastas originais (REF e SW10), para as quais foram adotados os valores entre 60mm e 90mm. Com estas pastas atingindo este espalhamento, foi utilizada a mesma quantidade de aditivo para as pastas MWCNT e S10. Depois disso, com o mesmo teor de aditivo, foi analisada a influência da utilização de NTCPM na mistura, não tendo como uma variável diferentes quantidades de aditivo. Por fim, foram realizados ensaios de reologia e miniespalhamento no estado fresco de cada pasta produzida.

A utilização do ensaio de calorimetria isotérmica é de suma importância para o entendimento das reações de hidratação do cimento nas idades iniciais. A calorimetria

auxilia na determinação do início e fim do período de indução da mistura cimentícia e do pico principal de liberação de calor. Assim, pode-se determinar se a introdução de um material à mistura modifica o processo de hidratação do cimento. Na Figura 16, é mostrado o equipamento em que foi realizado o ensaio de calorimetria isotérmica. O equipamento utilizado foi o calorímetro de condução isotérmica Thermometric AB da TAM Air (TA Instruments).

Figura 16 – Equipamento utilizado para realizar o ensaio de calorimetria isotérmica das amostras



O ensaio reológico das pastas foi feito por meio do Reômetro Haake Mars III da empresa Thermo Scientific. Este reômetro tem um torque máximo de 200 N.mm, seu recipiente é cilíndrico com dimensões de 16,00 mm de altura e 22,00 mm de diâmetro, e a temperatura do ambiente foi controlada em  $23^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ . Na Figura 18 é ilustrado o reômetro utilizado para os ensaios de reologia deste estudo.

Figura 18 - Reômetro Haake Mars III



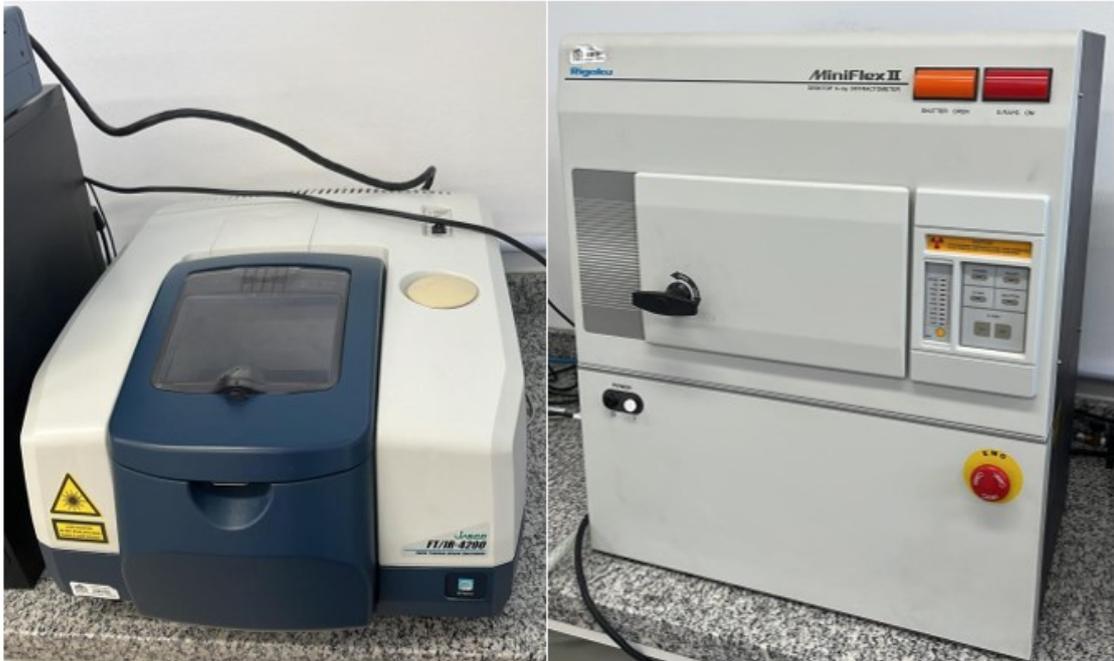
O procedimento do ensaio foi realizado da seguinte forma: (1) aplicou-se um pré-cisalhamento a  $100 \text{ s}^{-1}$  por 30 segundos; (2) após isso, a mistura repousou durante 10 segundos; (3) depois, aumentou-se a taxa de cisalhamento de  $0,1$  até  $100 \text{ s}^{-1}$  (a taxa de cisalhamento foi mantida constante por 20 segundos nos patamares de  $0,1$ ;  $0,5$ ;  $2,5$ ;  $10$ ;  $25$ ;  $40$ ;  $55$ ;  $70$ ;  $85$  e  $100 \text{ s}^{-1}$  para garantir a estabilização da leitura); (4) finalmente, foi inserido decréscimo da taxa até  $0,1 \text{ s}^{-1}$ , com paradas de 20 segundos nos mesmos patamares.

Os ensaios realizados no estado endurecido das pastas foram: espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e difração de raios-X (DRX) aos três dias. Os ensaios foram realizados em amostras em pó. As reações de hidratação das pastas de cimento Portland foram paralisadas com a troca de solvente utilizando isopropanol (SNELLINGS *et al.*, 2018). As amostras foram embebidas em álcool isopropílico pelo período de sete dias para parar as reações de hidratação. Após isso, foram filtradas em bomba a vácuo e colocadas em estufa durante 30 minutos à

temperatura de 50°C. Por fim, as amostras foram moídas manualmente em almofariz de ágata e peneiradas em peneira com abertura de 45  $\mu\text{m}$ , colocadas em tubo de ensaio devidamente fechados e alocadas dentro de um dessecador para evitar contato com o ambiente.

O ensaio de DRX foi realizado em um difratômetro miniflex da marca Rigaku no laboratório NANOTEC-LAB – UFSC, com 30 kV/15 mA, radiação  $\text{CuK}\alpha$ . O intervalo considerado para análise foi de 10° até 70° 2 $\theta$ , e passo de 0.02° 2 $\theta$ . O ensaio de FTIR foi conduzido em pellets de KBr no Espectrômetro Cary 600 series. O intervalo de análise é de 500 a 4000  $\text{cm}^{-1}$ , e resolução de 2  $\text{cm}^{-1}$ . Os pellets analisados eram compostos de aproximadamente 1 mg de pó de amostra de pasta de cimento Portland e 300 mg de KBr. Os equipamentos são ilustrados na Figura 19.

Figura 19 – Equipamentos para realizar os ensaios de FTIR e DRX



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

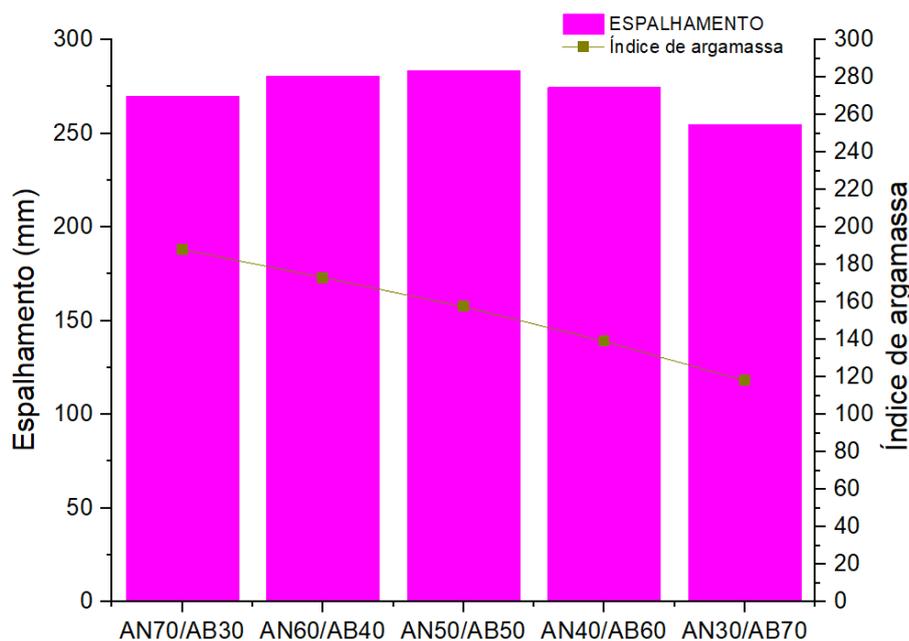
### 4.1 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS A SEREM UTILIZADOS

Conforme descrito anteriormente, nesta etapa foram determinados os parâmetros que serão utilizados para produção dos concretos. Assim, neste item serão mostrados os resultados de composição ideal dos agregados miúdos, solução aquosa ideal de utilização dos NTCPMs, quantidade ideal de diminuição do consumo de cimento Portland por meio da utilização do nanomaterial, e o comparativo das propriedades mecânicas das argamassas produzidas com espalhamento fixo e quantidade de aditivo fixa. Essa comparação foi realizada para determinar o método que foi utilizado para produção dos concretos e pastas.

#### 4.1.1 Composição ideal dos agregados miúdos

Os primeiros resultados a serem apresentados neste item são os resultados da composição ideal de agregado miúdo. Assim, são mostrados na Figura 19 os índices de argamassas e os seus respectivos espalhamentos para cada proporção utilizada. O índice de argamassa é o resultado da divisão entre o espalhamento da argamassa pelo módulo de finura do conjunto dos agregados. Os resultados mostraram que as argamassas produzidas com a proporção volumétrica de 70/30 (70% de areia de britagem ou de areia natural para 30% de areia de britagem ou natural) tiveram espalhamentos menores do que as outras argamassas. Até a substituição de 50% de areia natural por areia de britagem, os espalhamentos das argamassas tiveram um aumento, sendo que a proporção 50/50 resultou no maior espalhamento de todas as argamassas produzidas. Entretanto, seu índice de argamassa, que é resultado da divisão entre o espalhamento obtido pelo módulo de finura do conjunto, não foi o maior. O maior índice de argamassa foi obtido pela argamassa AN70/AB30.

Figura 19 – Índice e espalhamento das argamassas



Ainda, as substituições nos teores de 60% e 70% de areia natural por areia de britagem resultaram em argamassas com menores espalhamentos e menores índices do que a argamassa com substituição de 50% e com 60% de areia natural. Assim, houve um decaimento no espalhamento das argamassas produzidas com substituição de areia natural por areia de britagem para substituições maiores do que 50%. Pode-se, assim, chamar essa proporção de proporção ótima em relação ao espalhamento, na qual teores maiores do que 50% de areia de britagem acarretaram menores espalhamentos e menores índices de argamassa.

Desse modo, conforme os resultados dos índices de argamassa e dos respectivos espalhamentos, foi adotada a composição de areia de britagem (40%) /areia natural (60%), porque o espalhamento da argamassa produzida com essa proporção foi o maior, juntamente com o índice de argamassas. Conforme explicado por Weidmann (2008):

Destaca-se que o módulo de finura das composições, apesar apresentar baixa correlação com a fluidez das argamassas, apresentou correlação significativa com o teor de argamassa do concreto, sendo que, areias mais grossas (maior módulo de finura) demandaram maiores teores de argamassa para manter escoamento semelhante no ensaio de cone invertido. Diante desta observação, foi proposta uma ponderação da fluidez das argamassas pelo módulo de finura da composição para que se pudesse obter melhor correlação deste parâmetro obtido em ensaios em argamassas com a demanda de água de concretos correspondentes. A correlação do índice obtido (índice de fluidez que é a relação da fluidez da argamassa pelo módulo

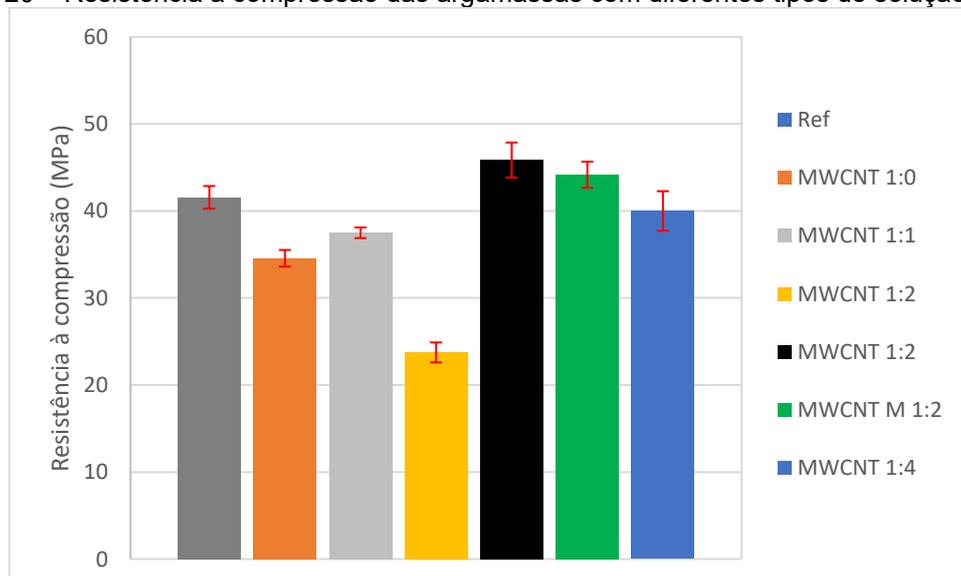
de finura do agregado) com a demanda de água do concreto foi bastante significativa para os materiais estudados (WEIDMANN, 2008, p.221).

Assim, segundo Weidmann (2008), a composição de areias adotada pelo índice de argamassa resultará em maior potencial para diminuição do consumo de cimento Portland para uma mesma classe de abatimento de concreto.

#### 4.1.2 Solução aquosa ideal para produção dos concretos

A Figura 20 contém os resultados de resistência à compressão das argamassas com diferentes soluções aquosas para a idade de 28 dias. As argamassas com utilização da solução aquosa de 1:2 (NTCPM: aditivo superplastificante) agitadas manualmente (MWCNT 1:2) e magneticamente (MWCNT M 1:2) resultaram no aumento de resistência à compressão de 10,3% e 6,3%, respectivamente, em relação à REF (argamassa produzida sem o nanomaterial). Já a argamassa com solução aquosa de 1:4 (MWCNT1:4) não resultou em aumento de resistência à compressão em relação à argamassa REF. Ainda, as argamassas produzidas com as soluções aquosas de 1:1 (MWCNT 1:1) e 1:0 (MWCNT 1:0) resultaram em resistências à compressão menores do que a argamassa REF. Isso indica que, para se produzir compósitos cimentícios com menores consumos de cimento, as soluções aquosas ideais para serem utilizadas seriam as de 1:2 com o aditivo superplastificante. Entretanto, para se facilitar a utilização desse nanomaterial, optou-se por adotar a solução aquosa que não necessitou de agitação magnética, sendo ela a argamassa MWCNT 1:2.

Figura 20 – Resistência à compressão das argamassas com diferentes tipos de solução aquosa

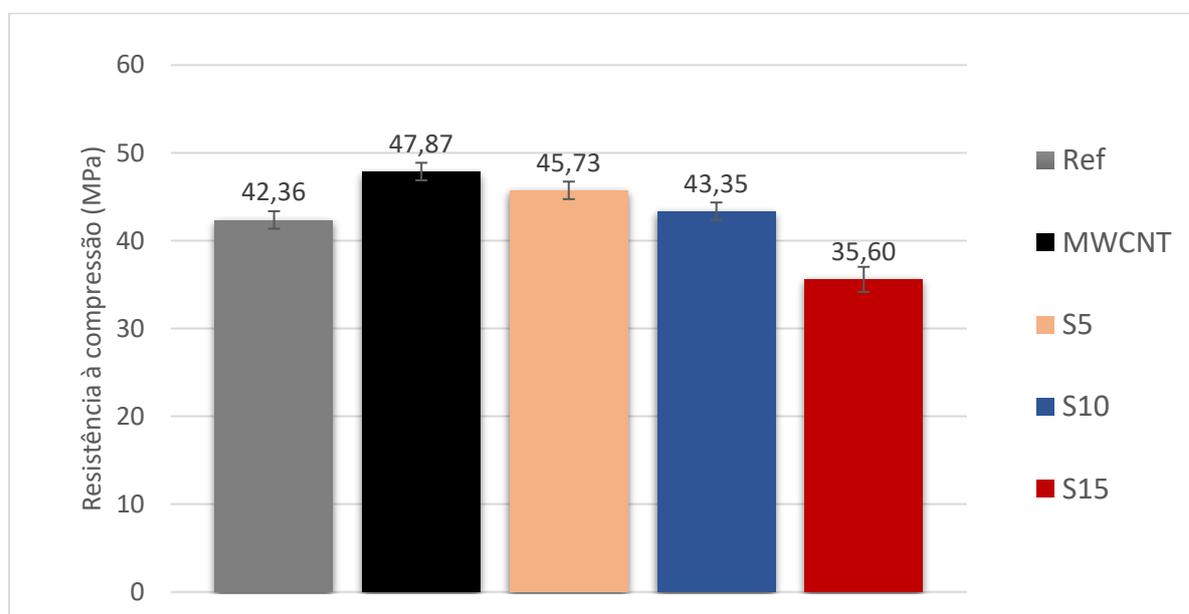


#### 4.1.3 Diminuição do consumo de cimento Portland

Conforme descrito anteriormente, neste item serão estudadas diferentes diminuições do consumo de cimento Portland em argamassas devido à inserção da solução aquosa ideal para produzir compósitos cimentícios sem que haja perda de resistência à compressão aos 28 dias.

Após a produção das argamassas, foram moldados corpos de prova para verificar seu comportamento em relação à resistência à compressão aos 28 dias. A Figura 21 mostra que as argamassas MWCNT e S5 resultaram no aumento de 13% e 8% na resistência à compressão aos 28 dias em relação à argamassa REF. Já para a argamassa S10 obteve-se resistência à compressão semelhante em relação à argamassa REF. Com a análise estatística ANOVA-two way, foi determinado que, com 95% de confiabilidade, as resistências à compressão das argamassas REF e S10 não se diferem significativamente. Por fim, a argamassa S15 resultou na diminuição em 16% na resistência à compressão em relação à argamassa REF. Portanto, a partir desses resultados, optou-se por adotar a diminuição em 10% do consumo de cimento Portland para a produção dos concretos.

Figura 21 – Resultados de resistência à compressão das argamassas com diminuição do consumo de cimento Portland e com inserção de NTCPM



#### 4.1.4 Influência dos parâmetros fixos

Conforme informado anteriormente, nesta etapa foram produzidas argamassas com espalhamento e quantidade de aditivos fixos. Para isso, foram produzidas as argamassas com e sem NTCPM, e com menores consumos de cimento Portland.

Além das argamassas REF, MWCNT, S5 e S10, foram produzidas argamassas originais SW5 e SW10, que são as argamassas produzidas com menor consumo de cimento Portland sem a utilização do NTCPM. Essas argamassas foram produzidas para mostrar que, com a diminuição do consumo de cimento Portland, ocorreu a perda de resistência em relação à argamassa REF, bem como para comparar as propriedades no estado fresco e endurecido das argamassas S5 e S10 com SW5 e SW10, devido à inserção do nanomaterial. Assim, nas Figuras 22 e 23, podem ser visualizados os resultados do estado fresco das argamassas com quantidade de aditivo “fixa” e também com o espalhamento fixo, respectivamente.

Figura 22 – Teor de ar incorporado e espalhamento das argamassas com teor de aditivo pré-fixado

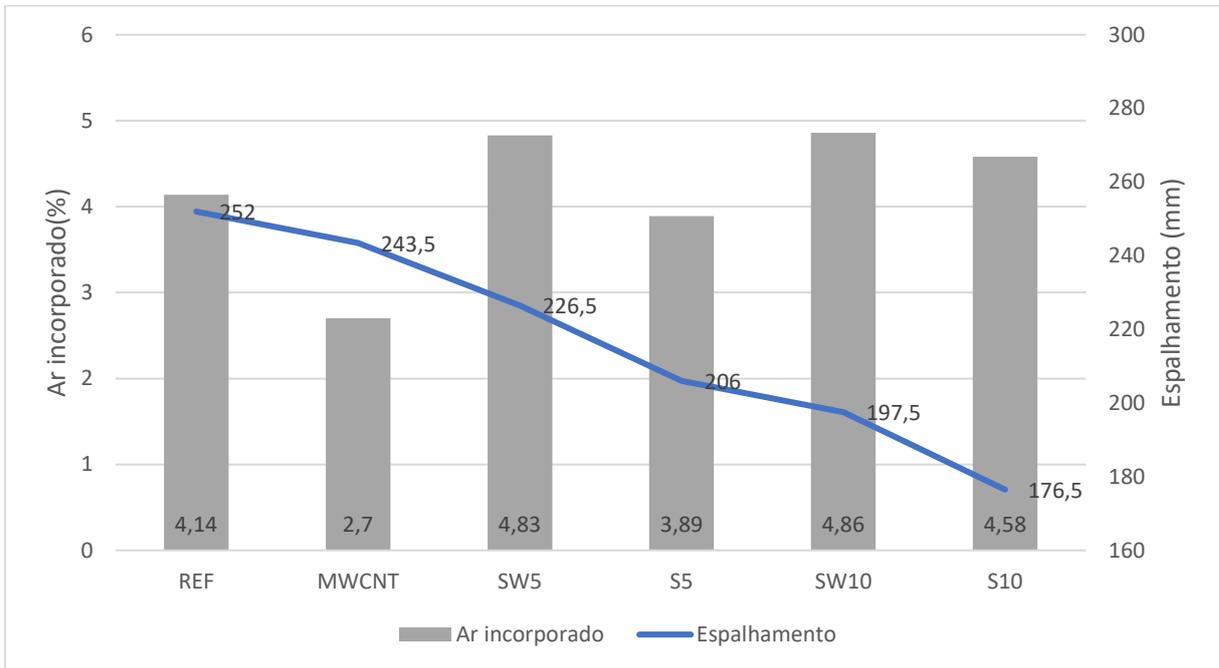
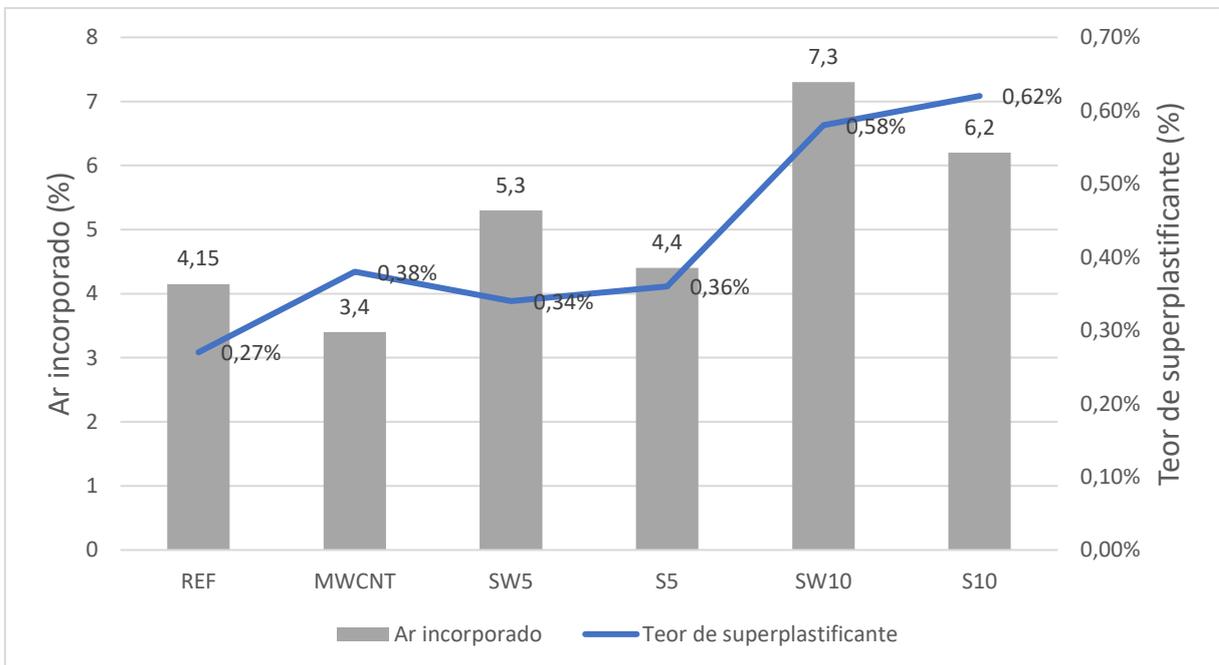


Figura 23 – Teor de ar incorporado e quantidade de aditivo necessário para atingir o espalhamento de 220mm ± 20 mm



Com os resultados da Figura 23, verifica-se que o espalhamento das argamassas foi influenciado pela inserção do nanomaterial, e que, quando há a presença do nanomaterial na mistura cimentícia, a tendência é de ocorrer diminuição no espalhamento das argamassas. Ainda, independentemente do método de produção das argamassas, as misturas sem NTCPM incorporaram maior quantidade

de ar do que as misturas com o nanomaterial. Isso pode ser explicado por duas ações. A primeira é que, segundo Matarredona et al. (2003) e Yurekli et al. (2004), além do cimento Portland, o NTCPM também interage com o aditivo dispersante, e assim se tem menor quantidade de aditivo químico para interagir com as partículas de cimento Portland, gerando menores quantidades de ar incorporado. E a segunda é que a inclusão de NTCPM promove uma densificação da matriz cimentícia, fazendo com que espaços antes não ocupados agora sejam preenchidos (MAKAR *et al.*, 2005; SINGH *et al.*, 2013; PARVEEN *et al.*, 2015).

Na Figura 23, verificou-se que houve a tendência de ocorrer um aumento na quantidade de aditivo para se obter a mesma classe de consistência das argamassas conforme foi realizada a substituição volumétrica de cimento Portland por agregado miúdo. Isso ocorreu porque, com a substituição volumétrica do cimento por agregado, obteve-se menor quantidade de água para a mistura devido à não alteração da relação a/c dessas argamassas. Portanto, quando se fez a substituição do cimento Portland pelo agregado, optou-se por manter a relação água/cimento da mistura, razão por que foi retirada a quantidade de água necessária para manter a relação água/cimento do sistema. Esse fato colabora para que ocorra um aumento na quantidade de aditivo para se obter uma mesma classe de consistência.

Notou-se ainda que, conforme se aumentava a substituição de cimento Portland, menor era o volume de pasta na argamassa, e maior era o volume de partículas sólidas. Com isso, aumenta-se o atrito entre partículas sólidas, dificultando assim a fluidez do sistema.

Em relação à quantidade de agregado presente na mistura, pode-se inferir que o agregado é um fator de grande influência nas propriedades reológicas de compósitos cimentícios. Geralmente quanto maior a quantidade de agregado, maiores serão a tensão de escoamento e a viscosidade plástica da matriz cimentícia (STRUBLE *et al.*, 1998). A reologia em pasta de cimento Portland é governada por forças coloidais, já a reologia do concreto é influenciada por processos mais complexos, tais como, o atrito entre os agregados, volume de fração do volume de sólidos e o empacotamento da estrutura granular (LECOMPTE *et al.*, 2012).

Por fim, observa-se na Figura 24 que as argamassas sem NTCPM necessitaram de menor quantidade de aditivo para obter a mesma classe de consistência das argamassas com NTCPM. A Figura 23 ajuda a confirmar esses

dados, já que as argamassas com o nanomaterial e com teor de superplastificante fixo resultaram em menores espalhamentos. Segundo Wang (2009), Sobolkina et al. (2012) e Reales et al. (2018), esse fato pode ser explicado pela elevada área superficial específica do nanomaterial e pela interação entre o aditivo, o nanomaterial e as moléculas de água.

Após os resultados no estado fresco das argamassas, são apresentados os resultados dos ensaios das argamassas em seu estado endurecido. Os resultados dos ensaios no estado endurecido das argamassas são ilustrados nas Figuras 24 a 29. Primeiramente nota-se que, comparando os dois métodos de produção das argamassas, os resultados mecânicos aos 28 dias não resultaram em diferenças significativas (resistência à compressão, resistência à flexão e módulo de elasticidade dinâmico). Portanto, escolheu-se estudar compósitos cimentícios com o teor de aditivo “fixo”, ou seja, a quantidade utilizada de aditivo para produção das misturas cimentícias com a inserção de NTCPM será igual à quantidade de aditivo utilizado para os compósitos principais (REF, SW5 e SW10). Com isso em mente, serão analisados os resultados das propriedades mecânicas das argamassas com a quantidade de aditivo fixo.

Figura 24 – Módulo de elasticidade dinâmico das argamassas com aditivo fixo

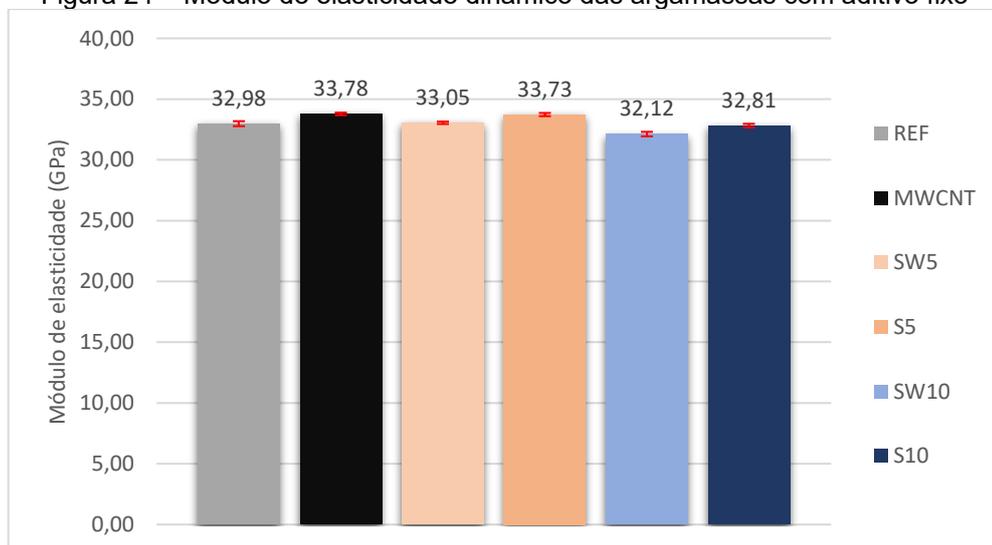


Figura 25 – Resistência à flexão das argamassas com aditivo fixo

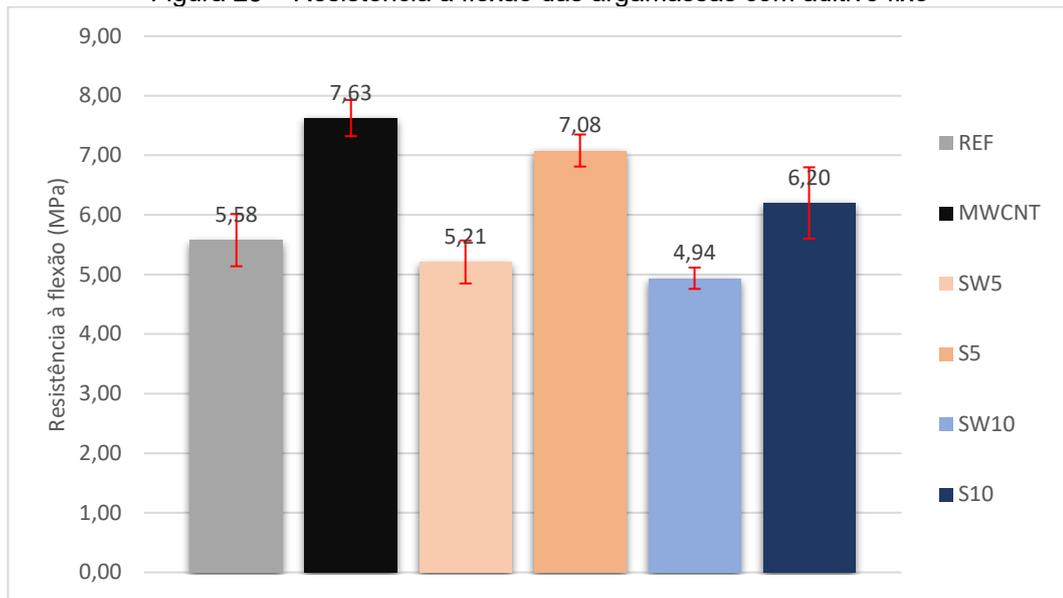


Figura 26 – Resistência à compressão das argamassas com aditivo fixo

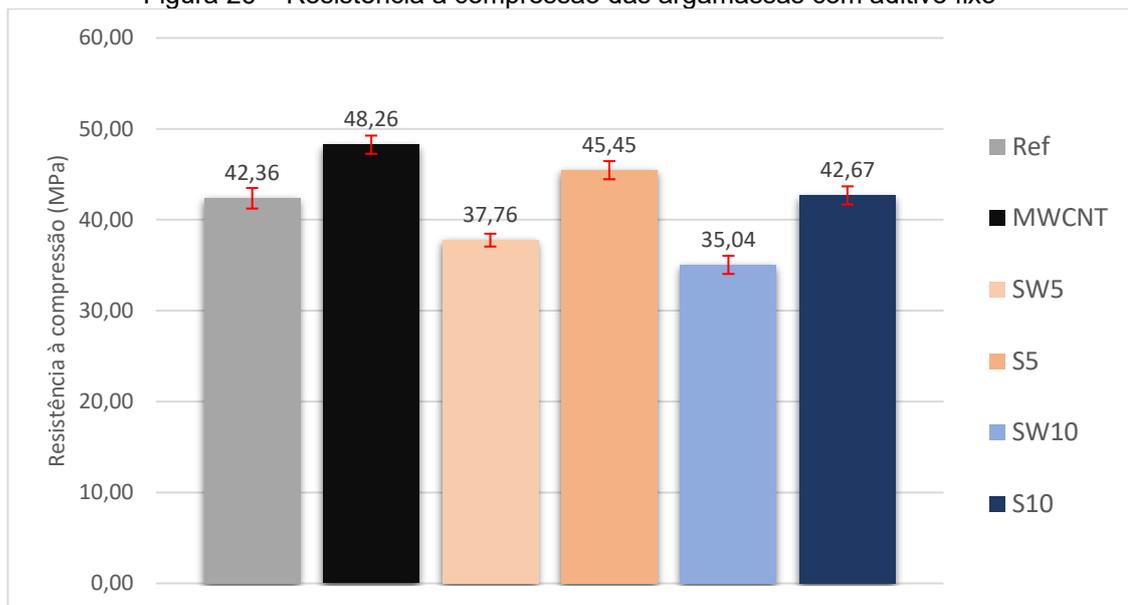


Figura 27 – Módulo de elasticidade dinâmico das argamassas com espalhamento fixo

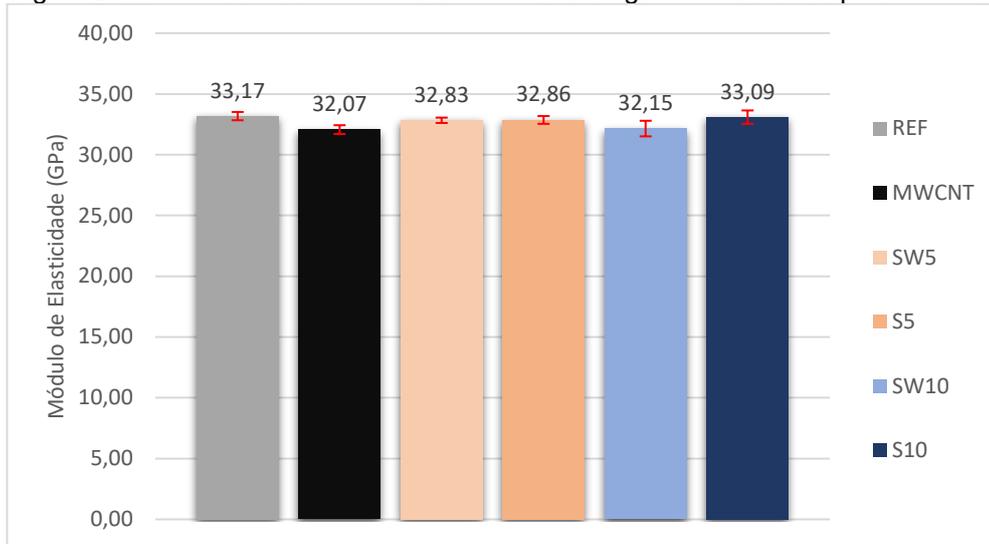


Figura 28 – Resistência à flexão das argamassas com espalhamento fixo

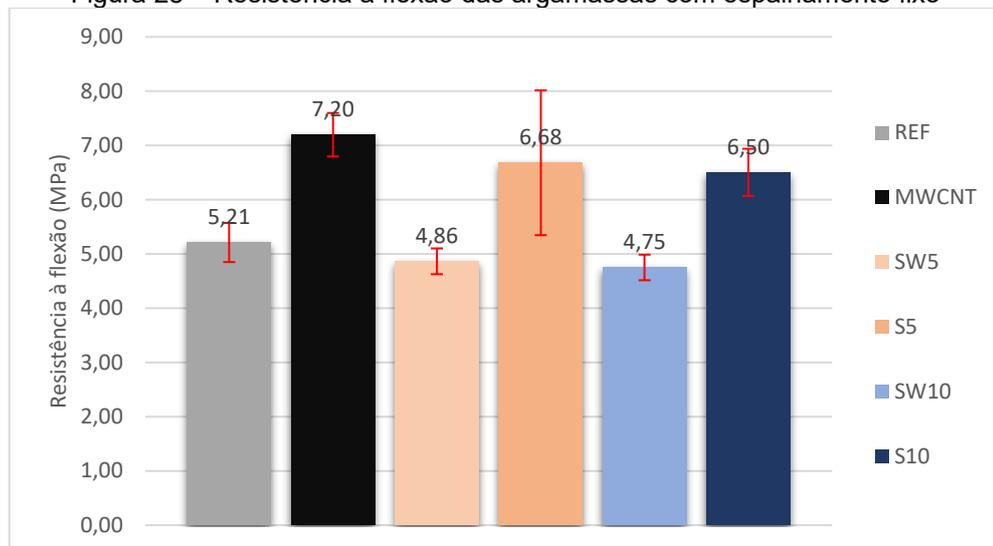
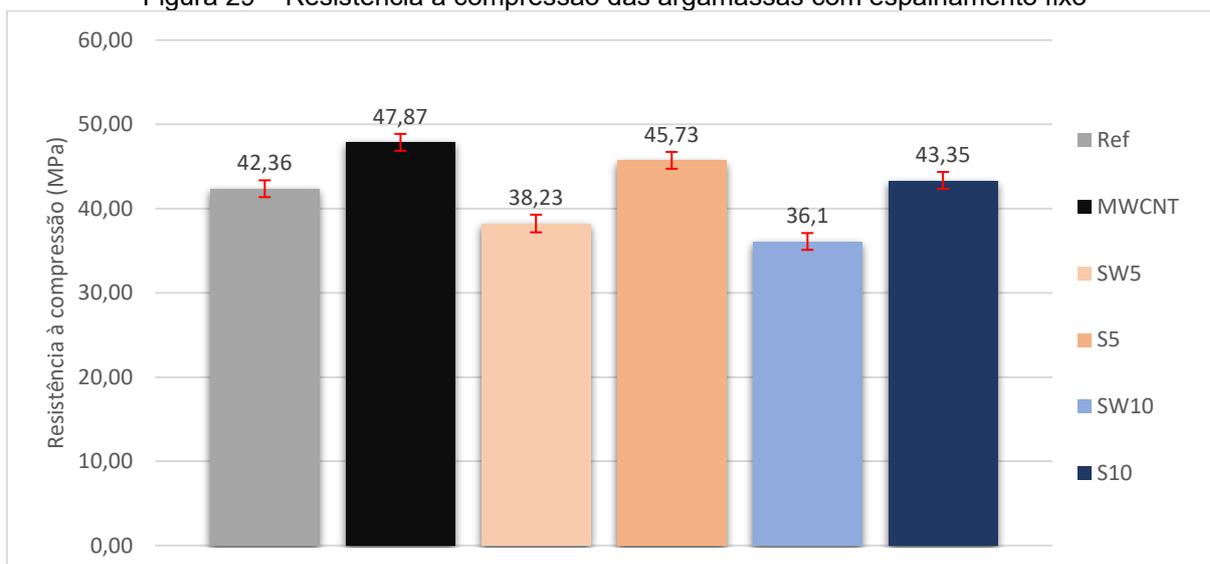


Figura 29 – Resistência à compressão das argamassas com espalhamento fixo



Com a análise estatística realizada por ANOVA two-way, pode-se dizer com 95% de confiabilidade que as argamassas com o nanomaterial MWCNT, S5 e S10 aumentaram a resistência à compressão média em relação às argamassas REF, SW5 e SW10, respectivamente. Além disso, o aprimoramento na resistência à compressão pelo MWCNT foi de 7,5% para a argamassa de referência, e de 9,5% para a argamassa com 10% de substituição. Esse ganho de resistência à compressão pode ser explicado por uma densificação da matriz e menor incorporação de ar devido à inserção do NTCPM, conforme descrito anteriormente. Esses resultados convergem com estudos encontrados na literatura que apresentaram um ganho de resistência à compressão com a utilização de NTCPM em matrizes cimentícias (KONSTAGDOUTOS *et al.*, 2017; HAWREEN *et al.*, 2018; MA *et al.*, 2018; HASSAN *et al.*, 2019). É interessante ressaltar que os nanotubos de carbono podem promover melhor distribuição de tensões dentro da matriz cimentícia, o que acarreta aprimoramento em suas propriedades mecânicas (MANZUR *et al.*, 2016; LUDVIG *et al.*, 2017; CHAIPANICH *et al.*, 2017). Ainda, utilizando a mesma análise estatística, a argamassa S10 resultou em mesma resistência à compressão média aos 28 dias em relação à argamassa REF. Isso significa que se pode produzir uma argamassa de mesma resistência à compressão aos 28 dias com mesma relação água/cimento e consumo reduzido de cimento Portland em 10% com a utilização do nanotubo de carbono.

Para a resistência à flexão, conforme foi verificado na análise estatística, aceita-se com 95% de confiabilidade que as argamassas produzidas com NTCPM resultaram em maiores médias de resistência à flexão do que as argamassas sem a utilização do material. Entretanto, a argamassa com S10 não resultou em diferença significativa em relação à REF.

Analisando as composições, as argamassas MWCNT e S5 aumentaram a resistência à flexão média em até 36% em relação à argamassa REF e SW5, respectivamente, enquanto a argamassa S10 aumentou em 25% em relação à SW10. Ainda, se comparadas a argamassa S5 com a REF, houve um aumento de 26%. O aprimoramento na resistência à flexão pode ser atribuído ao papel do nanomaterial atuando como fibras de reforço, fazendo ponte entre fissuras e, assim, acarretando aumento na flexibilidade (HASSAN *et al.*, 2019). Os mesmos autores inferem que ligações curtas e muito fortes entre C – C de NTCPM podem criar pontes entre nanofissuras e, portanto, aumentam a resistência à flexão. Além disso, o nanomaterial pode ter preenchido vazios existentes que antes não eram preenchidos anteriormente à sua inserção no compósito (SARVANDANI *et al.*, 2021). Quando comparadas as argamassas S10 e REF, não se pôde inferir que houve um aumento nessa propriedade mecânica, pois a análise estatística não resultou em diferença significativa entre os valores comparados, apesar de que visualmente o valor médio de resistência à flexão da argamassa S10 parece maior do que a REF. Lopes *et al.* (2022), Mosallam *et al.* (2022) e Huang, Rodrigue e Guo (2022), encontraram resultados semelhantes para a resistência à flexão em compósitos cimentícios reforçados com NTCPM.

Com relação ao módulo de elasticidade das argamassas, os resultados indicaram que a argamassa MWCNT resultou em maior módulo de elasticidade em relação à argamassa REF, ou seja, a utilização de NTCPM na argamassa de referência ocasionou aumento do módulo de elasticidade. Esse efeito também foi evidenciado nas demais argamassas. Isso é esperado devido ao fato de que o nanomaterial possui maior módulo de elasticidade do que os componentes da argamassa, e, assim, sua adição na mistura deveria acarretar o aumento dessa propriedade mecânica. Entretanto, como o teor de NTCPM inserido é baixo, isso poderia não resultar em influência no aumento significativo do módulo de elasticidade das argamassas, fazendo com que não houvesse diferença significativa entre os

módulos de elasticidade. Além disso, conforme Lee *et al.* (2018), o NTCPM pode preencher os vazios entre os géis de C-S-H, reduzindo a nanoporosidade do compósito e conseqüentemente aumentando suas propriedades mecânicas. A diminuição da porosidade da argamassa de cimento Portland devido à utilização do nanomaterial resulta no aumento de suas propriedades mecânicas (KONSTAGDOUTOS *et al.*, 2010). Ainda, ressalta-se que o aumento do módulo de elasticidade dinâmico pode ter se dado em decorrência da diminuição do ar incorporado pelas misturas com o nanomaterial, e que, como o teor de inserção é baixo, o que mais interferiu no aumento do módulo de elasticidade pode ter sido a incorporação de ar. Sabe-se que, em geral, quanto maior a incorporação de ar nas matrizes cimentícias convencionais, menor será o seu módulo de elasticidade. Estatisticamente, quando comparadas as argamassas REF e S10, verificou-se que não houve diferença significativa entre os seus módulos de elasticidade, ou seja, mesmo com a substituição de 10% de cimento Portland, não houve diminuição no módulo de elasticidade da argamassa com o nanomaterial.

Assim, para um fechamento desta etapa do trabalho, optou-se por adotar a solução aquosa ideal de NTPCM: aditivo superplastificante de 1:2 com agitação manual, bem como diminuição do consumo de cimento em 10% em relação ao traço REF e a utilização da quantidade de aditivo “fixa”.

## 4.2 CONCRETOS

Neste tópico serão abordados os resultados dos concretos produzidos com os parâmetros determinados na etapa anterior (Item 4.1) em seu estado fresco e endurecido. Primeiramente serão abordados os resultados dos concretos em seu estado fresco, e depois serão abordados em seu estado endurecido.

### 4.2.1 Estado fresco

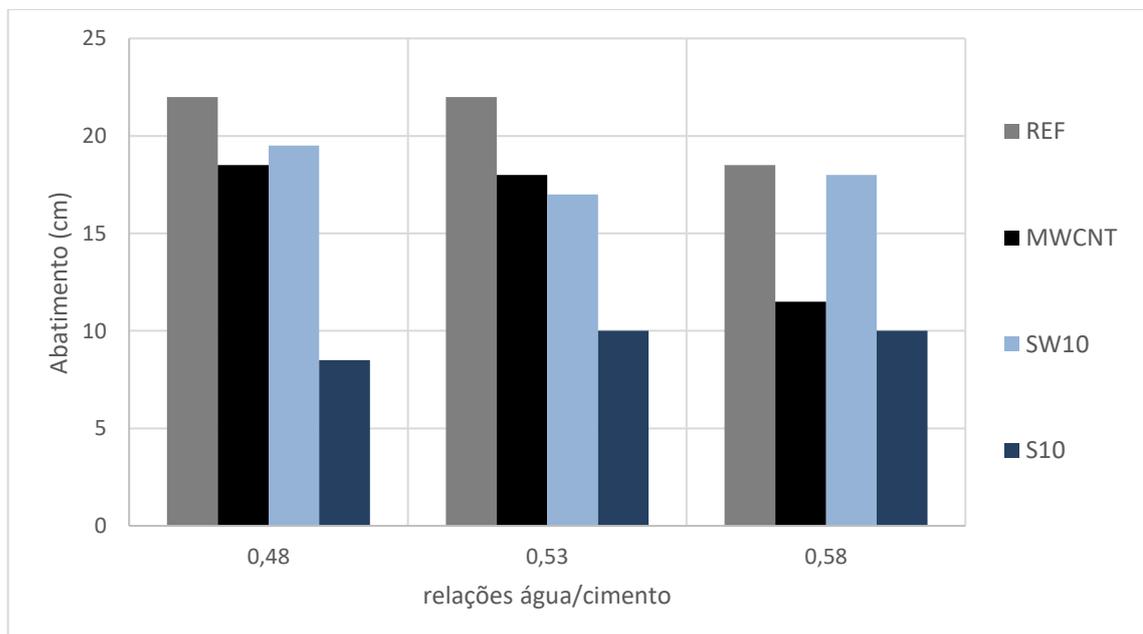
Para o estado fresco dos concretos, serão apresentados os resultados dos ensaios de abatimento de tronco de cone, teor de ar incorporado por meio do ensaio de massa específica e reometria. Alguns dos concretos produzidos são ilustrados na Figura 30.

Figura 30 – Fotos dos concretos produzidos REF, MWCNT, SW10 e S10



Os resultados do ensaio do abatimento do tronco de cone para a classe de consistência adotada em todos os concretos produzidos neste estudo são mostrados na Figura 31.

Figura 31 – Ensaio de abatimento de tronco de cone dos concretos produzidos



Conforme foi verificado nas argamassas, os concretos produzidos com o nanomaterial também resultaram em abatimentos menores do que os concretos sem o NTCPM, independentemente da relação água/cimento utilizada. Ressalta-se que os concretos principais (REF e SW10) foram produzidos para a classe de consistência  $20 \text{ cm} \pm 3 \text{ cm}$ , e que, a partir da quantidade de aditivo necessária para esses concretos alcançarem este abatimento, foram produzidos os concretos com o nanomaterial (MWCNT e S10) com a mesma quantidade de aditivo do concreto original. Vale mencionar que o concreto original do MWCNT é o REF, e que o concreto original do S10 é o SW10.

Quando são comparados os concretos REF e MWCNT, há uma diminuição no abatimento do concreto MWCNT de até 38% em relação ao REF para a relação a/c 0,58. Para a relação a/c 0,53, há uma diminuição no abatimento de 18%, e na relação a/c 0,48, de 16%. Verifica-se assim um padrão de que, quanto maior a relação a/c, maior é a perda de abatimento pela utilização do material para esses concretos. Esse mesmo padrão não ficou evidenciado quando se comparou os concretos SW10 e S10. Nesse caso foi evidenciado que houve também a perda de abatimento pela inserção do nanomaterial em aproximadamente 56% na relação a/c 0,48, de 41% na relação 0,53, e de 44% na relação a/c 0,58, mas com o aumento da relação a/c não houve maior percentual de perda de abatimento pelo concreto analisado.

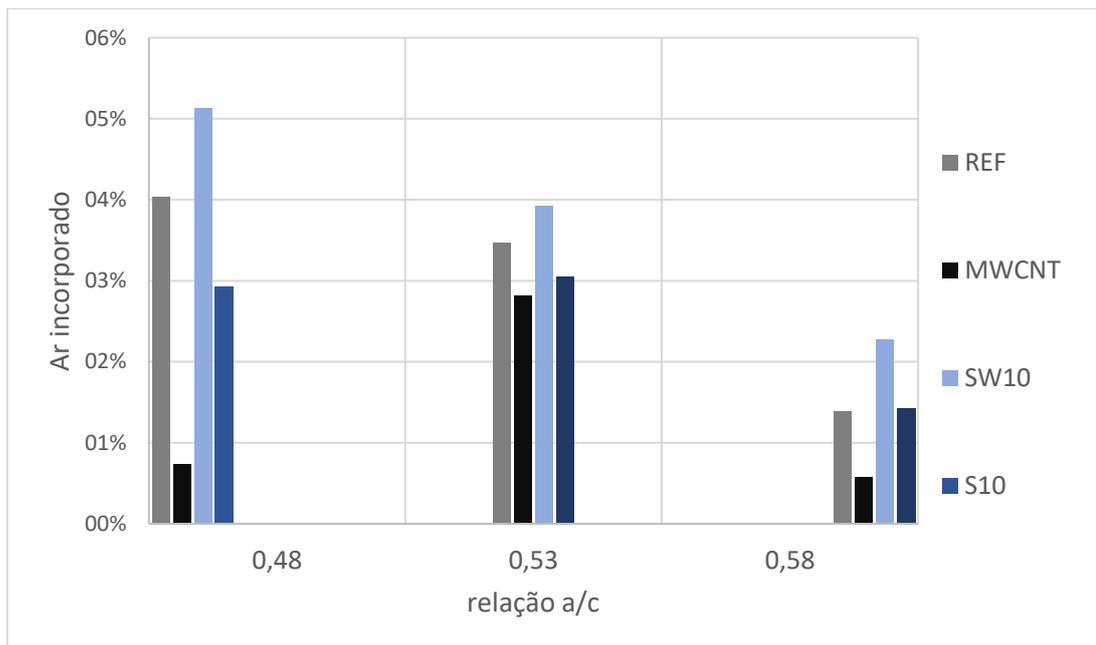
Comparando o concreto S10 e REF, verificou-se que o abatimento do concreto S10 foi reduzido consideravelmente devido a dois fatores. O primeiro fator é a redução da quantidade de água do sistema e o aumento da quantidade de agregado total na mistura, e o segundo está relacionado à utilização do nanomaterial. A perda de abatimento pode ser prejudicial às propriedades mecânicas, já que há maior dificuldade de adensamento deste concreto.

Resultados semelhantes aos encontrados neste estudo foram relatados por Marcondes (2012). Esse comportamento pode ser justificado pelo menor tamanho dos NTCPMs em relação às partículas de cimento Portland, o que aumenta a colisão entre elas. Outro fator relevante é a elevada área superficial específica do nanomaterial, o que demanda maior quantidade de água para molhar a superfície das nanopartículas. Com isso ocorre o aumento das forças de atrito entre as partículas. Mudasilir e Naqash (2021) indicaram que a utilização de NTCPM no teor de 1% em relação à massa de cimento Portland resultou na perda de abatimento de concretos produzidos com

diferentes relações a/c entre 0,4 e 0,55. A perda de abatimento variou de 35% até 39%. Os autores comentam que, além da elevada área superficial específica, a água pode ficar aprisionada por aglomerados de NTCPM, o que acarreta diminuição do abatimento do concreto. Além disso, muitos trabalhos na literatura relatam que a utilização do nanomaterial resulta na diminuição do espalhamento/abatimento de compósitos cimentícios (RHEE; ROH, 2013; MEDEIROS, et al., 2015; SILVESTRO, 2022). É importante ressaltar que, no presente estudo, como a quantidade de aditivo foi fixada, é esperado que os concretos com NTCPM resultem em abatimentos menores, já que uma parte do aditivo total foi utilizada para dispersão desses concretos antes de serem inseridos na mistura.

Outro ensaio feito no estado fresco dos concretos foi o ensaio de massa específica, conforme explicado no capítulo de materiais e métodos utilizados. Esse ensaio foi utilizado para encontrar o teor de ar incorporado no estado fresco de cada concreto. Os resultados do ensaio são mostrados na Figura 32.

Figura 32 – Resultado de teor de ar incorporado no estado fresco dos concretos



Observa-se, nos resultados de ar incorporado dos concretos, que os concretos REF e SW10 incorporaram maior quantidade de ar do que os concretos MWCNT e S10. Comparando REF com MWCNT, verifica-se que houve uma incorporação 0,8% maior na relação a/c 0,58, de 0,7% para a relação a/c 0,53 e de 3,3% na relação a/c 0,48. Já para a comparação entre SW10 e S10, a incorporação foi 0,9% maior nas

relações a/c 0,58 e 0,53, e na relação a/c 0,48 foi 2,2% maior. Assim, os concretos com a incorporação do nanomaterial resultaram em menores incorporações de ar, o que pode acarretar melhores propriedades mecânicas dos compósitos MWCNT e S10 em relação aos outros. Encontra-se na literatura uma grande gama de trabalhos que afirmam que a utilização de nanotubos de carbono promove maior compactação do compósito cimentício (MENDOZA-REALES; SIERRA GALLEGO; TOBÓN, 2016; HAWREEN; BOGAS, 2018). A melhor compactação do compósito gera menor quantidade de vazios no estado fresco, e assim pode-se ter misturas cimentícias com menor teor de ar incorporado quando utilizado o nanomaterial.

Ainda, quando foram comparados o concreto REF com o SW10, ocorreu uma incorporação maior de ar pelo concreto SW10 para todas as relações a/c estudadas. Com relação a isso, o concreto SW10 teve maior incorporação de ar para todas as relações a/c: para a relação a/c 0,58, foi de 0,9% maior, na relação a/c 0,53, de 0,4% maior, e na relação a/c 0,48, foi de 1,1% maior. Esse resultado mostra que a maior quantidade de aditivo superplastificante utilizado no concreto SW10 pode ter influenciado nesse quesito. Foi verificado que houve maior incorporação de ar no concreto REF para as relações a/c de 0,48 e 0,53, sendo elas nos valores de 1,1% e 0,5% em relação ao concreto S10. Já para a relação a/c 0,58, houve uma equivalência no teor de ar incorporado comparando os concretos REF e S10.

Finalizando os ensaios no estado fresco dos concretos, foi realizado o ensaio de reometria para determinar os parâmetros reológicos de cada mistura produzida. Assim, na Figura 33 são ilustrados os resultados do ensaio de reometria. As curvas na Figura 33 são as porções decrescentes das curvas torque vs velocidade dos concretos produzidos. As linhas mostradas indicam o modelo linear, dado pela equação  $T = T_0 + V \times N$ . A inclinação da reta fornece o parâmetro V, que é análogo à viscosidade da mistura, e a interseção com o eixo vertical fornece o parâmetro  $T_0$ , que é análogo à tensão de escoamento da mistura. Com isso, são apresentados na Tabela 11 esses termos para cada mistura produzida.

Figura 33 – Resultados do ensaio de reometria dos concretos, curvas torque vs velocidade

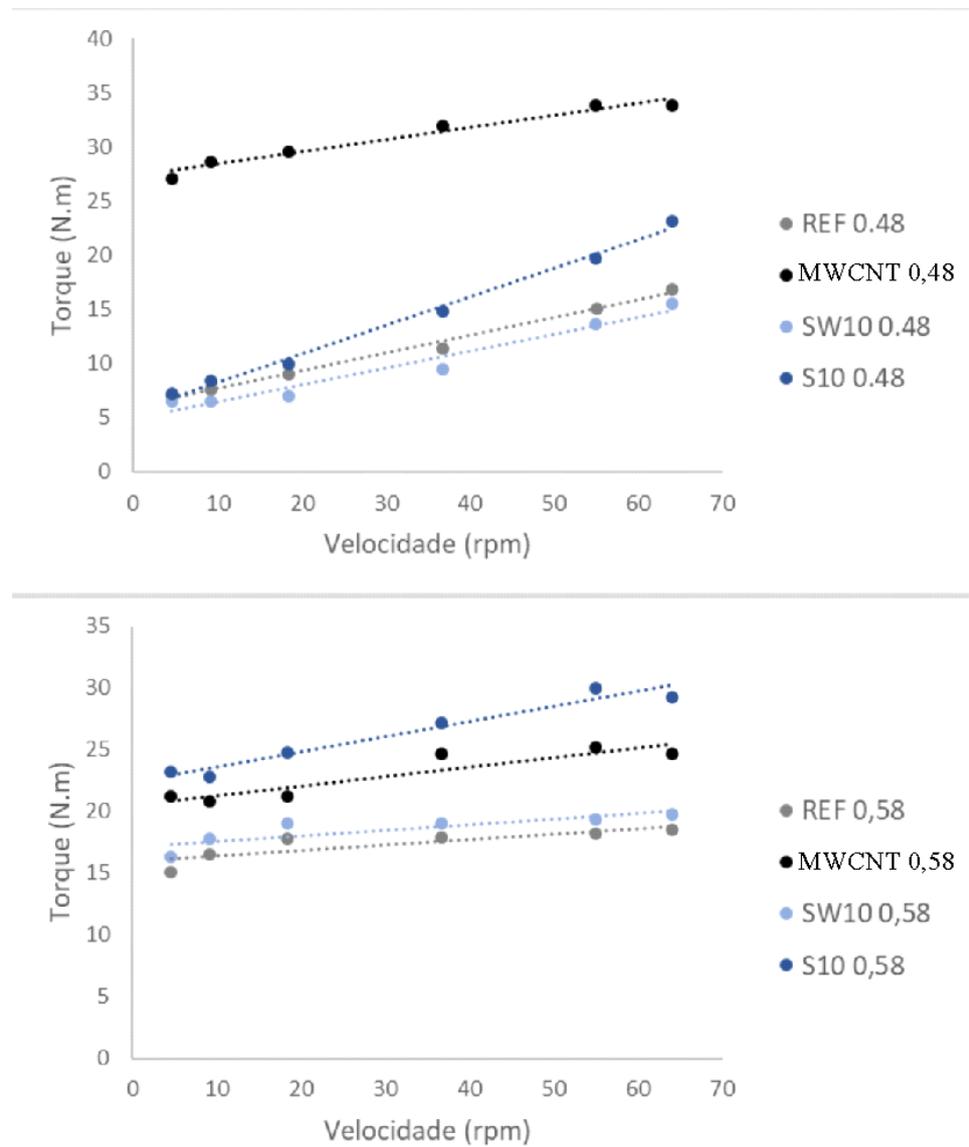


Tabela 11 – Propriedades dos concretos no estado fresco e seus respectivos parâmetros reológicos

Concreto	Abatimento (mm)	Aditivo (%)	Ar (%)	T <sub>0</sub> (N.m)	V (N.m/rpm)
REF 0,48	230	0,41%	4,0%	5,98	0,165
MWCNT 0,48	185	0,41%	0,7%	27,29	0,112
SW10 0,48	195	0,53%	5,1%	4,84	0,156
S10 0,48	85	0,53%	2,9%	5,60	0,264
REF 0,58	185	0,37%	1,4%	15,94	0,044
MWCNT 0,58	115	0,37%	0,6%	20,50	0,078
SW10 0,58	190	0,70%	2,3%	17,14	0,044
S10 0,58	100	0,70%	1,4%	22,31	0,123

Observa-se que na relação a/c 0,58, os concretos produzidos com NTCPM (MWCNT e S10) resultaram em valores maiores de  $T_0$  e  $V$  em relação aos concretos sem o nanomaterial (REF e SW10), aumentando o  $T_0$  de 15,94 N.m para 20,50 N.m para o concreto MWCNT em relação ao REF, e de 17,14 N.m para 22,31 N.m para o concreto S10 em relação ao SW10. Ainda, para as mesmas comparações, o parâmetro  $V$  foi aumentado de 0,044 N.m/rpm para 0,078 N.m/rpm para o concreto MWCNT em relação ao REF, e de 0,044 N.m/rpm para 0,123 N.m/rpm para o concreto S10 em relação ao SW10. Para a relação a/c 0,48, houve o mesmo comportamento de aumento dos parâmetros reológicos devido à inserção do nanomaterial. O parâmetro  $T_0$  foi aumentado de 5,98 N.m para 27,29 N.m para o concreto MWCNT em relação ao REF e de 4,84 N.m para 5,60 N.m para o concreto S10 em relação ao SW10. Quanto ao parâmetro  $V$ , o aumento foi evidenciado somente no concreto S10 em relação ao SW10, sendo ele de 0,156 N.m/rpm para 0,264 N.m/rpm. O concreto MWCNT resultou na diminuição do parâmetro  $V$  em relação ao REF no valor de 0,165 N.m/rpm para 0,112 N.m/rpm.

No geral, o parâmetro  $T_0$ , análogo à tensão de escoamento, foi aumentado para os concretos com utilização do nanomaterial. Isso vai ao encontro dos resultados obtidos no ensaio de abatimento dos concretos, já que os concretos com NTCPM resultaram em valores de abatimento menores do que os concretos sem o nanomaterial. A literatura explica que esses resultados se devem à adsorção de parte da água de mistura devido aos grupos carboxila na superfície do nanomaterial. Em conjunto a isso, deve-se levar em conta a elevada área superficial específica do NTCPM (MUSSO *et al.*, 2009; JIANG *et al.*, 2018; AHMED *et al.*, 2019). Além disso, pode ocorrer formação de aglomerados de NTCPM que aprisionam parte da água da mistura, fazendo com que a água efetiva do sistema seja diminuída (NASIBULINA *et al.*, 2012; MENDOZA *et al.*, 2013). Esses fatores em conjunto reduzem a água efetiva da mistura, e conseqüentemente ocorre o aumento dos parâmetros reológicos da mistura. É interessante ressaltar que o aumento da viscosidade ocasionado pela inserção do NTCPM nos concretos não ocasionou maior quantidade de ar incorporado no estado fresco dos concretos, e, ainda, houve diminuição do ar incorporado no estado fresco pelos concretos com NTCPM. Esse fator ressalta o efeito de maior compacidade da matriz ocasionado pelo nanomaterial.

#### 4.2.2 Estado endurecido

Para o estado endurecido dos concretos, são apresentados os resultados dos ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade aos 3 dias, resistência à compressão e módulo de elasticidade aos 28 dias, retração por secagem até os 56 dias e absorção de água por imersão para a idade de 28 dias.

##### 4.2.2.1 Resistência à compressão

Assim, nas Figuras 34 e 35 são mostrados os resultados dos ensaios de resistência à compressão dos concretos aos 3 e 28 dias.

Figura 34 – Resultado de resistência à compressão aos 3 dias dos concretos

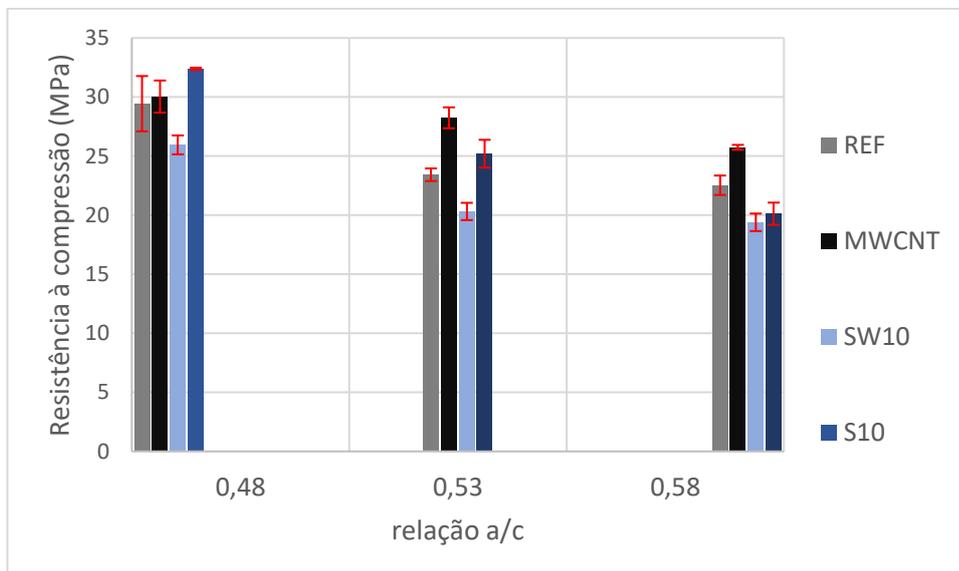
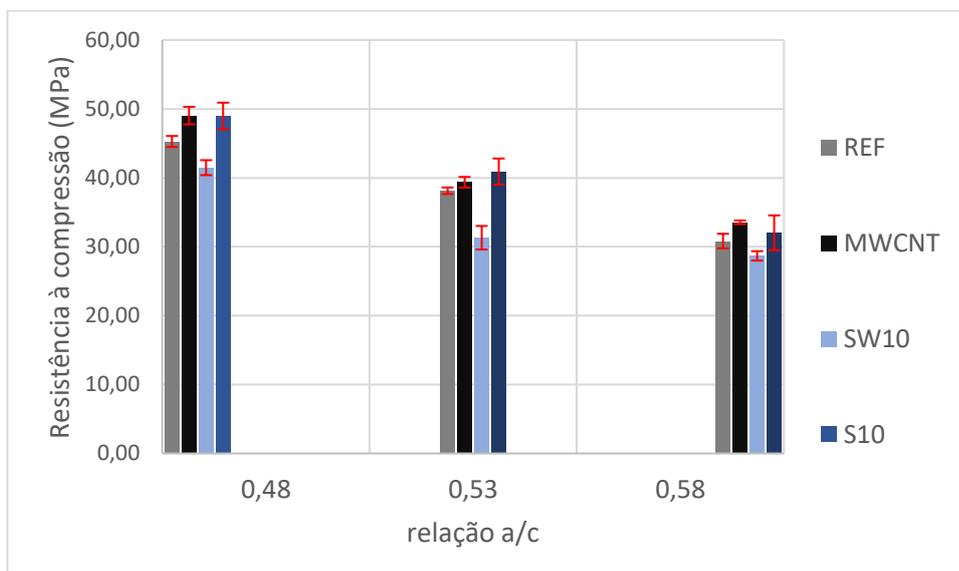


Figura 35 – Resultado de resistência à compressão aos 28 dias dos concretos



Comparando os concretos de referência (REF e SW10) com os concretos com o nanomaterial (MWCNT e S10), os resultados da média da resistência à compressão aos 3 dias e 28 dias indicaram que, com a utilização do nanomaterial, houve uma tendência do aumento dessa propriedade mecânica, independentemente da relação a/c analisada.

Diante disso, aos 3 dias, na relação a/c 0,58, houve um ganho médio de aproximadamente 14% comparando MWCNT e REF, e de 4% entre S10 e SW10. Para a relação a/c 0,53, o ganho foi de aproximadamente 21% para o MWCNT em relação ao concreto REF, e de 24% para o concreto S10 em relação ao concreto SW10. Já para a relação 0,48, o ganho foi de 2% para o concreto MWCNT, e de 25% para o concreto S10. Na idade de 28 dias, na relação a/c 0,58, houve um ganho médio de aproximadamente 9%, comparando o concreto MWCNT ao REF, e de 12% para o concreto S10 em relação ao SW10. Para a relação a/c 0,53 o ganho foi de aproximadamente 3% para o concreto MWCNT em relação ao concreto REF e de 31% para o S10 em relação ao concreto SW10. Analisando a relação a/c 0,48, o ganho foi de 8% para o concreto MWCNT, e de 18% para o concreto S10, em relação aos concretos REF e SW10, respectivamente.

Ainda, comparando o concreto S10 com o concreto REF, foi verificado que a resistência à compressão aos 3 dias e 28 dias não foi afetada, o que é condizente com os resultados encontrados em argamassas no presente estudo. Desse modo, isso indica que há possibilidade da utilização do nanomaterial em concreto com o intuito de diminuir o consumo de cimento Portland sem acarretar perda de resistência, independentemente da relação a/c utilizada.

Para a idade de 3 dias, notou-se que, conforme se diminuiu a relação a/c, houve o efeito de melhor desempenho do concreto S10 em relação ao REF, fazendo com que a resistência ficasse mais equiparada e até aprimorada na relação a/c 0,48. Verificou-se assim que a média da resistência à compressão do concreto S10 com relação a/c 0,58 foi cerca de 10% menor do que a média do REF. Já para a relação 0,53, a média do concreto S10 foi cerca de 8% superior do que a do concreto REF. Para a relação 0,48, o concreto S10 teve um aprimoramento de 10% na média dos resultados de resistência. Esse efeito foi verificado também quando se comparou o concreto S10 com o SW10, em que a relação a/c 0,48 foi a que apresentou maior

diferença entre as médias de resistências, apontando-se ganho de resistência média de quase 25%. Para a relação 0,53, obteve-se 24% e para a relação 0,58 o aumento foi de 3%.

Resultados semelhantes aos deste estudo foram encontrados por Marcondes (2012), que obteve resultados de aprimoramento na resistência à compressão de concretos com utilização de NTCPM em 29%, 36% e 19% em relação ao concreto referência aos 28 dias. Além disso, Mudasir e Naqash (2021) relatam em seu trabalho que os concretos produzidos com o nanomaterial no teor de 1% tiveram ganhos de 5% a 9% na resistência à compressão aos 28 dias. Hawreen e Bogas (2019) obtiveram ganhos de resistência à compressão aos 7 dias no valor de 4,2%, e aos 28 dias no valor de 9% em concretos produzidos com NTCPM-COOH no teor de 0,05%.

Para a idade de 28 dias, houve ganhos de resistência média para todas as relações a/c do concreto S10 comparado com o REF: 4% na relação a/c 0,58, 7% na relação a/c 0,53, e 8% na relação a/c 0,48. Na idade de 3 dias, os resultados de resistência à compressão aos 28 dias mostraram uma tendência do efeito mais evidenciado no ganho de resistência média do concreto S10 em relação ao REF em relações a/c menores. Concretos com maiores relações a/c podem ocasionar maior quantidade de água aprisionada por NTCPM, fazendo com que essa água aprisionada evapore e cause aumento na porosidade do concreto, resultando na diminuição da resistência desses concretos. Entretanto, pode haver uma compensação na maior porosidade pela formação de fortes ligações entre os produtos de hidratação ocasionadas pelo NTCPM, e assim pode ser que a resistência do concreto com o nanomaterial seja maior do que a do concreto de referência (MUDASIR; NAQASH, 2021).

Portanto, pode ser considerado que, em menores relações a/c, o efeito do nanomaterial seja mais evidenciado, e assim resulte em resistências maiores. Dessa maneira, para concretos com NTCPM de relações a/c mais baixas, podem resultar maiores diminuições do consumo de cimento Portland para que seja obtida mesma resistência à compressão do concreto sem o nanomaterial. Isso pode ser explicado pelo efeito de melhor dispersão causado pela maior quantidade de superplastificante no sistema, bem como pela maior quantidade de NTCPM disponível (HAWREEN et al., 2018).

Comparando o concreto REF com o SW10, os resultados de resistência à compressão aos 3 dias indicaram que houve uma tendência de diminuir a resistência com a diminuição do consumo de cimento Portland (concreto SW10). Concreto de relação a/c 0,48 resultou na diminuição da resistência à compressão média de aproximadamente 12% no concreto SW10 em relação ao REF, de aproximadamente 13% para relação a/c 0,53, e de 14% para a/c 0,58. Para essa mesma comparação na idade de 28 dias, os resultados de resistência à compressão indicaram que houve uma tendência de diminuir a resistência. Para a relação a/c 0,48, a diminuição média de resistência foi de aproximadamente 8%, para a relação 0,53, foi de 18%, e para a relação a/c 0,58, foi de 7%.

Comparando os concretos MWCNT e S10, houve a tendência de diminuição da resistência à compressão aos 3 dias pelo concreto S10 em relação ao concreto MWCNT para as relações a/c 0,58 e 0,53 nos valores de 22% e 11%, respectivamente. Entretanto, para a relação a/c 0,48, houve a inversão desse comportamento, pois o concreto S10 resultou no aumento de aproximadamente 8% da média de resistência à compressão em relação ao MWCNT. Já para a idade de 28 dias, foi evidenciada a diminuição dessa propriedade no concreto S10 em relação ao MWCNT para a relação a/c 0,58 no valor de 4%. Contudo, para a relação a/c 0,53, houve uma inversão, ou seja, obteve-se um ganho de resistência média de aproximadamente 4%, e para a relação a/c 0,48, não houve aprimoramento ou perda de resistência média dos concretos.

Concretos produzidos com maiores quantidades de agregado tendem a produzir concretos com menor resistência à compressão porque, quando se aumenta a quantidade de agregado no concreto, aumenta-se a zona de interface pasta agregado. Mehta e Monteiro (2014) explicam que o acúmulo de filme de água em torno das partículas de agregado contribui para maior relação a/c na zona de transição pasta agregado, assim, há maior quantidade de produtos formados que apresentam pior desempenho mecânico (etringita e portlandita). Ferreira Júnior e Camarini (2003) apud Cavaliere (2020) indicam em seu estudo que uma das características da interface pasta agregado é a formação de microfissuras. Portanto, os concretos produzidos no estudo com menor consumo de cimento Portland e maior quantidade de agregados possuem maior quantidade de zona interfacial de pasta/agregado, podendo assim

acarretar resistência à compressão menor do que o concreto produzido com menor consumo de agregados.

Por fim, é importante ressaltar que o foco do estudo é a comparação entre o concreto REF e o S10. Portanto, foi criada a Tabela 12 para mostrar essa comparação para melhor ilustrar os resultados desses concretos.

Tabela 12 – Comparação entre as médias de resistência à compressão dos concretos REF e S10

<b>IDADE DE 3 DIAS</b>			
<b>Relação a/c 0,48</b>	<b>Resistência média (MPa)</b>	<b>Desvio padrão (MPa)</b>	<b>Ganho de resistência em relação ao REF</b>
REF	29,44	2,34	0,00%
S10	32,39	0,1	10,02%
<b>Relação a/c 0,53</b>			
REF	23,42	0,53	0,00%
S10	25,2	1,18	7,60%
<b>Relação a/c 0,58</b>			
REF	22,53	0,82	0,00%
S10	20,12	0,94	-10,70%
<b>IDADE DE 28 DIAS</b>			
<b>Relação a/c 0,48</b>	<b>Resistência média (MPa)</b>	<b>Desvio padrão (MPa)</b>	<b>Ganho de resistência em relação ao REF</b>
REF	45,27	0,8	0,00%
S10	48,97	1,94	8,17%
<b>Relação a/c 0,53</b>			
REF	38,13	0,47	0,00%
S10	40,9	1,9	7,26%
<b>Relação a/c 0,58</b>			
REF	30,83	1,05	0,00%
S10	32,03	2,53	3,89%

#### 4.2.2.2 Módulo de Elasticidade

Para continuar com a análise no estado endurecido dos concretos, foi realizado o ensaio de módulo de elasticidade aos 3 dias e aos 28 dias. Os resultados do ensaio são ilustrados nas Figuras 36 e 37.

Figura 36 – Resultado de módulo de elasticidade aos 3 dias dos concretos

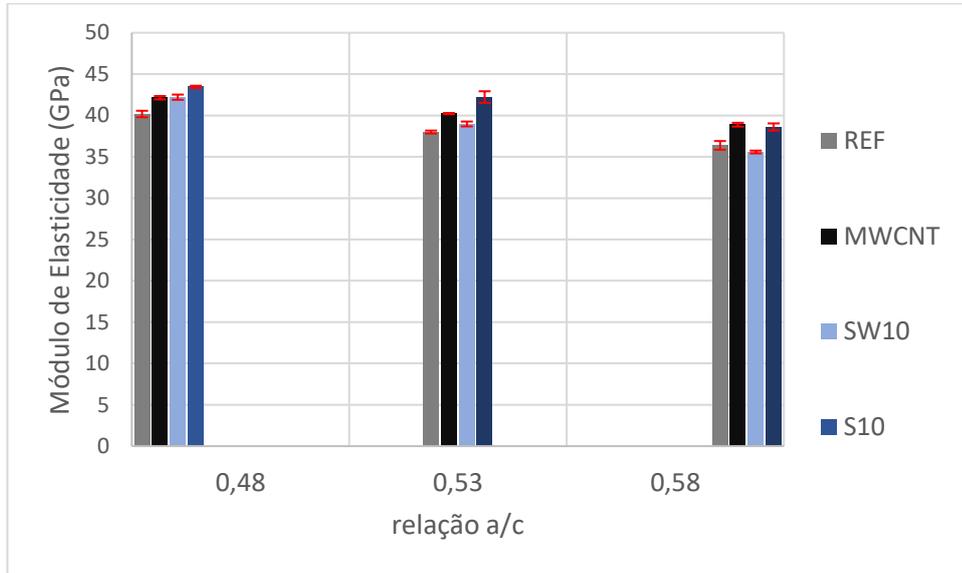
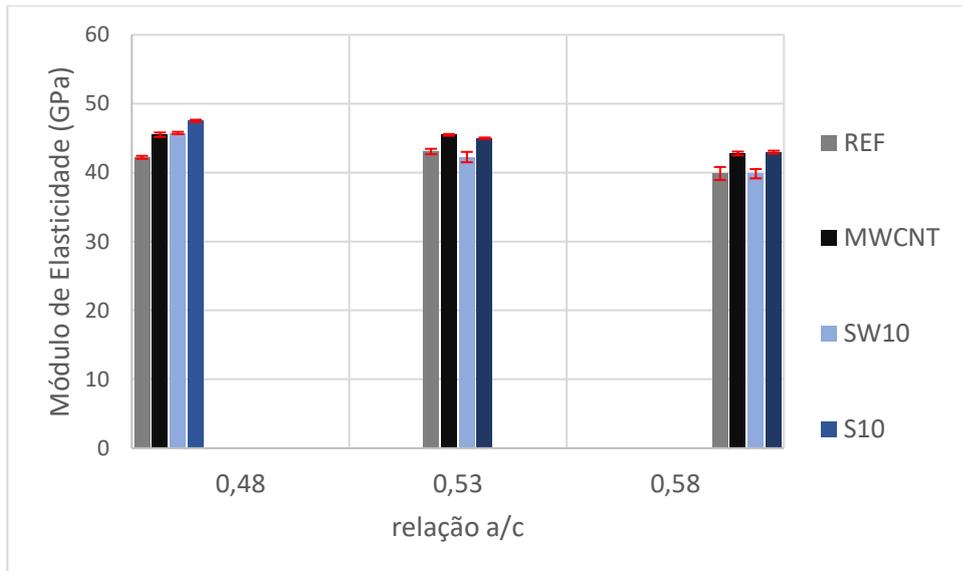


Figura 37 – Resultado de módulo de elasticidade aos 28 dias dos concretos



Os resultados do módulo de elasticidade dos concretos aos 3 dias e aos 28 dias indicaram que houve uma tendência de aumento dessa propriedade mecânica para os concretos com nanomateriais (MWCNT e S10) em relação aos concretos sem o nanomaterial (REF e SW10), independentemente da relação a/c utilizada. O aumento médio para a relação a/c 0,48 foi de 5% para o concreto MWCNT em relação ao concreto REF, e de 2,9% para o concreto S10 em relação ao concreto SW10. Para as mesmas comparações, na relação a/c 0,53, resultaram no aumento de 6% e 8%, respectivamente, e para a relação 0,58, o aprimoramento foi de 7% e 8%. Já para a idade de 28 dias, o aumento médio para a relação a/c 0,48 foi de 8% para o concreto

MWCNT em relação ao concreto REF, e de 4% para concreto S10 em relação ao concreto SW10. Para as mesmas comparações, na relação a/c 0,53, os resultados indicaram aumento de 6% e 7%, respectivamente, e para a relação 0,58, o aprimoramento foi de 7% e 8%.

Comparando o concreto S10 com o concreto REF, verificou-se que os resultados da média do módulo de elasticidade aos 3 dias e aos 28 dias apontaram o aumento dessa propriedade, independentemente da relação a/c analisada. O aprimoramento foi de 8% para a relação a/c 0,48, de 11% para a relação a/c 0,53, e de 6% para a relação a/c 0,58. Já para a idade de 28 dias, o aprimoramento foi de 13% para a relação a/c 0,48, de 5% para a relação a/c 0,53, e de 8% para a relação a/c 0,58.

Comparando com os resultados encontrados na literatura, o módulo de elasticidade aprimorado no presente estudo não se mostrou tão expressivo. Em outros estudos foram relatados acréscimos do módulo de elasticidade em até 95% de compósitos cimentícios com o nanomaterial em relação à referência. Além disso, houve aprimoramento conforme aumentado o teor de NTCPM no compósito cimentício (DANOGLIDIS *et al.*, 2016; KONSTA-GDOUTOS *et al.*, 2017b). Entretanto, Qissab e Abbas (2016) e Hawreen e Bogas (2019) relataram resultados semelhantes aos encontrados no presente estudo. Hawreen e Bogas (2019) mencionam que a incorporação de NTCPM nos concretos resultou no aumento do módulo de elasticidade em até 14% em relação ao concreto de referência. Os autores comentam que o aprimoramento do módulo pela incorporação de NTCPM é ocasionado pela mitigação/diminuição da propagação de microfissuras e pela redução da nanoporosidade do compósito. O aumento menos expressivo encontrado pelos autores foi atribuído ao fato de que o NTCPM atua essencialmente na estrutura porosa e à rigidez da pasta de cimento, que ocupa apenas 30% do volume total da mistura. Em geral, foram encontrados muitos estudos na literatura indicando que a inserção do NTCPM em compósitos cimentícios faz com que essa propriedade mecânica seja aprimorada (PARVEEN *et al.*, 2015; QISSAB; ABBAS, 2016; AHMED *et al.*, 2018; REALES *et al.*, 2018).

Analisando os concretos produzidos com menor consumo de cimento Portland (SW10 e S10) em comparação aos de referência (REF e MWCNT), observou-se que houve uma tendência do aumento da média do módulo de elasticidade dinâmico com

a diminuição do consumo de cimento Portland para a idade de 3 dias. Para a relação a/c 0,48, o aprimoramento foi de 5% para o concreto SW10 em relação ao concreto REF, e de 3% do concreto S10 em relação ao concreto MWCNT. Utilizando as mesmas comparações, na relação a/c 0,53, o aumento foi de 3% e 5%, respectivamente. Entretanto, na relação a/c 0,58, houve diminuição nos resultados dessa propriedade mecânica em aproximadamente 2% e 1%.

Já para a idade de 28 dias, percebeu-se que não houve uma tendência de aumento da média do módulo de elasticidade para as mesmas comparações. Com isso os resultados foram: para a relação a/c 0,48, houve o aprimoramento de 8% para o concreto SW10 em relação ao concreto REF, e de 4% do S10 em relação ao concreto MWCNT. Para essas comparações, na relação a/c 0,53, ocorreu uma diminuição de 2% e 1%, respectivamente, e para a relação a/c 0,58, teve-se uma equiparação nos resultados. No que diz respeito aos resultados para as relações a/c 0,53 e 0,58, não foi observada diferença significativa.

Com esses resultados, observa-se que, de modo geral, não houve uma tendência no comportamento dessa propriedade mecânica relacionada à diminuição do consumo de cimento. Entretanto, foi verificado que, para a relação a/c 0,48, houve um aumento no módulo ocasionado pela diminuição do consumo de cimento Portland, que pode ser explicado pela maior quantidade de pasta disponível no sistema, de modo a exercer maior influência na propriedade mecânica ao se diminuir o consumo de cimento do compósito. Resultados semelhantes a esse foram relatados por Girardi *et al.*, (2020), que obtiveram resultados de maiores módulos de elasticidade em concretos de mesma relação a/c com menores volumes de pasta. No geral, o módulo de elasticidade dos agregados é maior do que o da pasta de cimento Portland hidratada. Assim, maiores teores de agregados podem significar maiores valores dessa propriedade mecânica em concretos (NEVILLE, 2016).

Os valores de módulo de elasticidade nessas classes de resistência à compressão são regidos pela influência da rigidez do esqueleto granulométrico. Desta forma, com o avanço da hidratação das partículas de cimento Portland, ocorre o aumento da rigidez da pasta, fazendo com que misturas com maior quantidade de pasta e menor quantidade de agregados resultem em menores contribuições para os valores de módulo de elasticidade em idades iniciais (3 dias). Já em idades mais avançadas (28 dias), esse efeito deve diminuir e até desaparecer.

Além disso, os resultados do ensaio de módulo de elasticidade dos concretos vêm ao encontro dos resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão, no qual foi verificado que a influência do NTCPM é mais relevante em relações a/c, conforme relatado em outros estudos da literatura supracitados. Para ressaltar a importância do estudo, foi feita uma tabela-resumo de comparação entre os resultados de módulo de elasticidade dos concretos REF e S10. Portanto, os resultados são mostrados na Tabela 13.

Tabela 13 – Comparação entre as médias de módulo de elasticidade dos concretos REF e S10

<b>IDADE DE 3 DIAS</b>			
<b>Relação a/c 0,48</b>	<b>Módulo de Elasticidade (GPa)</b>	<b>Desvio padrão (GPa)</b>	<b>Ganho em relação ao REF</b>
REF	40,17	0,39	0,00%
S10	43,45	0,14	8,17%
<b>Relação a/c 0,53</b>			
REF	37,99	0,18	0,00%
S10	42,23	0,7	11,16%
<b>Relação a/c 0,58</b>			
REF	36,38	0,52	0,00%
S10	38,61	0,43	6,13%
<b>IDADE DE 28 DIAS</b>			
<b>Relação a/c 0,48</b>	<b>Módulo de Elasticidade (GPa)</b>	<b>Desvio padrão (GPa)</b>	<b>Ganho em relação ao REF</b>
REF	42,21	0,22	0,00%
S10	47,51	0,17	12,56%
<b>Relação a/c 0,53</b>			
REF	43,06	0,4	0,00%
S10	44,99	0,1	4,48%
<b>Relação a/c 0,58</b>			
REF	39,87	0,94	0,00%
S10	42,96	0,22	7,75%

#### 4.2.2.3 *Retração por secagem*

Outra análise realizada, conforme descrita anteriormente, foi o ensaio de retração por secagem. Esse ensaio foi realizado até a idade de 56 dias, e seus resultados são mostrados nas Figuras 38, 39 e 40.

Figura 38 – Resultados do ensaio de retração por secagem dos concretos com relação a/c 0,48

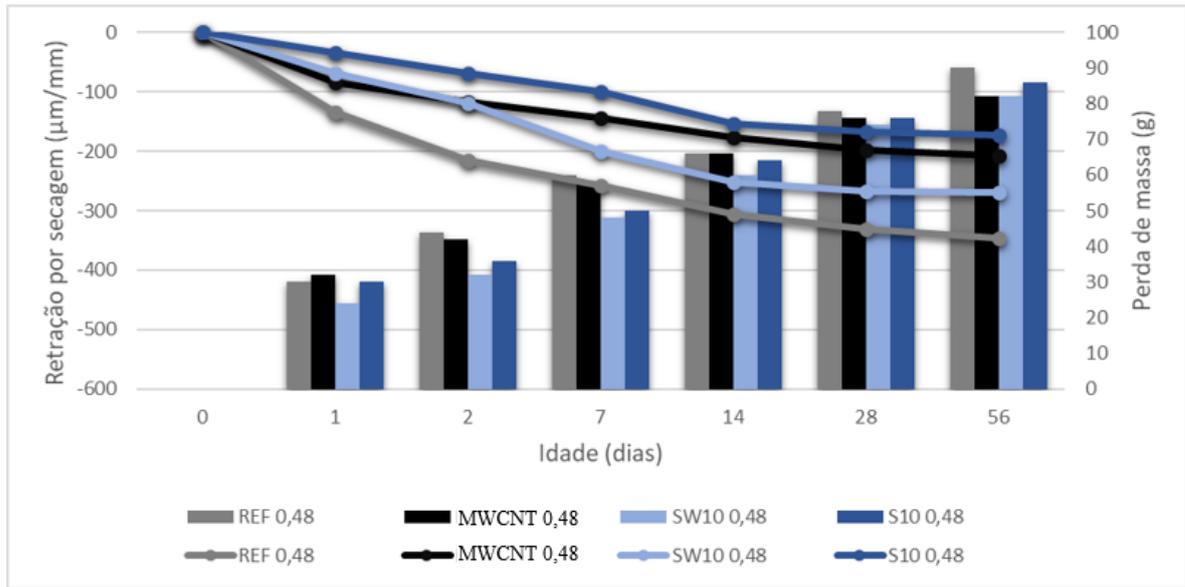


Figura 39 – Resultados do ensaio de retração por secagem dos concretos com relação a/c 0,53

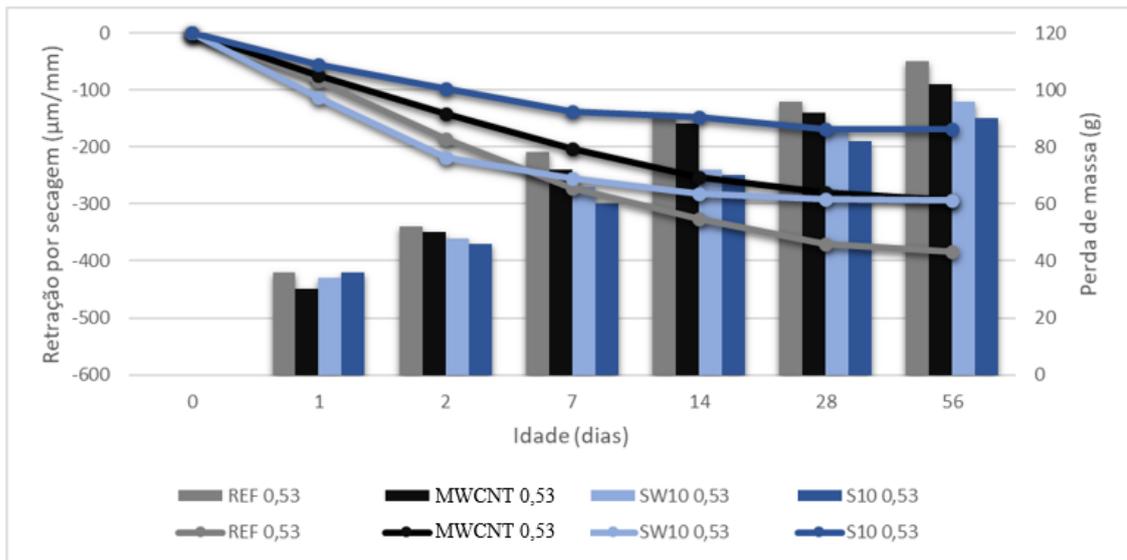
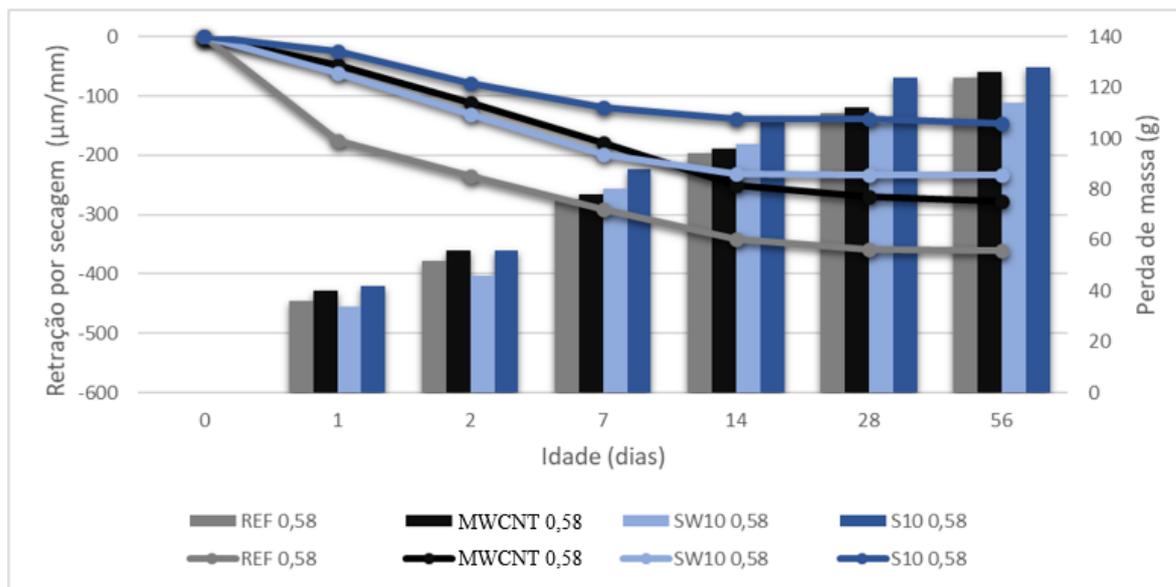


Figura 40 – Resultados do ensaio de retração por secagem dos concretos com relação a/c 0,58



Os resultados de retração indicam que, independentemente da relação a/c analisada, a maior parte do fenômeno aconteceu nos 14 primeiros dias. Após os 14 dias analisados, houve praticamente uma estabilização na retração de todas as misturas produzidas. Os concretos produzidos com o nanomaterial (MWCNT e S10) resultaram em menor magnitude do fenômeno aos 56 dias em relação aos concretos de referência (REF e SW10). Para a relação a/c 0,48, o concreto MWCNT resultou na diminuição do fenômeno em comparação com o REF em até 40%. Para a relação a/c 0,53, a diminuição foi de 24%, e para a relação a/c 0,58, foi de 23%. Já o concreto S10, em comparação com o concreto SW10, teve diminuição do fenômeno de 36% para a relação 0,48, de até 43% na relação 0,53, e de até 38% na relação 0,58.

Sobre a perda de massa dos concretos REF e MWCNT, destaca-se que foram muito semelhantes nas relações 0,58 e 0,48, indicando assim que o resultado dessa diminuição da retração pelo concreto MWCNT em relação ao REF pode ser atribuída ao nanomaterial. Entretanto, na relação a/c 0,53, o concreto REF teve perda de massa maior que a do concreto MWCNT, o que aponta que a maior retração desse concreto em relação ao MWCNT pode ser explicada por um efeito sinérgico entre a maior perda de água do concreto em conjunto com a não utilização do nanomaterial. Já para os concretos SW10 e S10, foi observado que suas perdas de massa foram muito semelhantes, e até o concreto S10 teve maior perda de massa do que o concreto SW10 na relação a/c 0,58. Mesmo assim, houve uma diminuição do fenômeno de retração no concreto S10 em relação ao SW10. Isso converge com os resultados

encontrados para os concretos MWCNT e REF, indicando assim que o efeito de diminuição da retração ocorreu em ambas as comparações para os concretos produzidos com o nanomaterial.

Em relação aos concretos S10 e REF, o concreto S10 resultou na diminuição do fenômeno em aproximadamente 50% na relação 0,48, em até 56% para a relação 0,53, e em até 59% na relação 0,58. Isso pode ter ocorrido pelo maior consumo de cimento Portland utilizado no concreto REF conjuntamente com a ação do NTCPM, que deveria auxiliar no combate da retração da mistura. Isso fica evidente quando se olha para as curvas dos concretos REF e SW10, que demonstram que o concreto SW10 resultou em menor magnitude do fenômeno em relação ao concreto REF em até 22% na relação a/c 0,48, em 24% na relação a/c 0,53, e em 35% para a relação 0,58.

Resultados semelhantes aos encontrados neste estudo foram relatados no trabalho de Hawreen *et al.* (2018). Os autores relataram que houve diminuição do fenômeno da retração por secagem pela inserção do nanomaterial no compósito cimentício, chegando a valores de até 62% após a primeira semana de ensaio, e de até 21% após o período de um ano. Eles atribuem esses resultados aos efeitos físicos do NTCPM, sendo eles o efeito *filler*, a criação de novos pontos de nucleação e o nanomaterial servindo de ponte. Ainda, Li *et al.* (2015) também obtiveram redução da retração por secagem em até 32% em compósito cimentício com o nanomaterial após os primeiros seis dias de ensaio.

Após a discussão e apresentação dos resultados obtidos por meio desse ensaio, pode ser relatado que o menor consumo de cimento Portland e a utilização do nanomaterial estão auxiliando na diminuição do fenômeno de retração por secagem. Esses resultados auxiliam na interpretação dos resultados de resistência à compressão e vêm ao encontro de que o nanomaterial está auxiliando no efeito de ligação e preenchimento de vazios.

#### 4.2.2.4 Absorção de água por imersão

O último ensaio disposto neste tópico é o ensaio de absorção de água por imersão, cujos resultados de absorção de água e índice de vazios dos corpos de prova estão ilustrados nas Figuras 41 e 42.

Figura 41 – Resultado de absorção de água dos concretos aos 28 dias

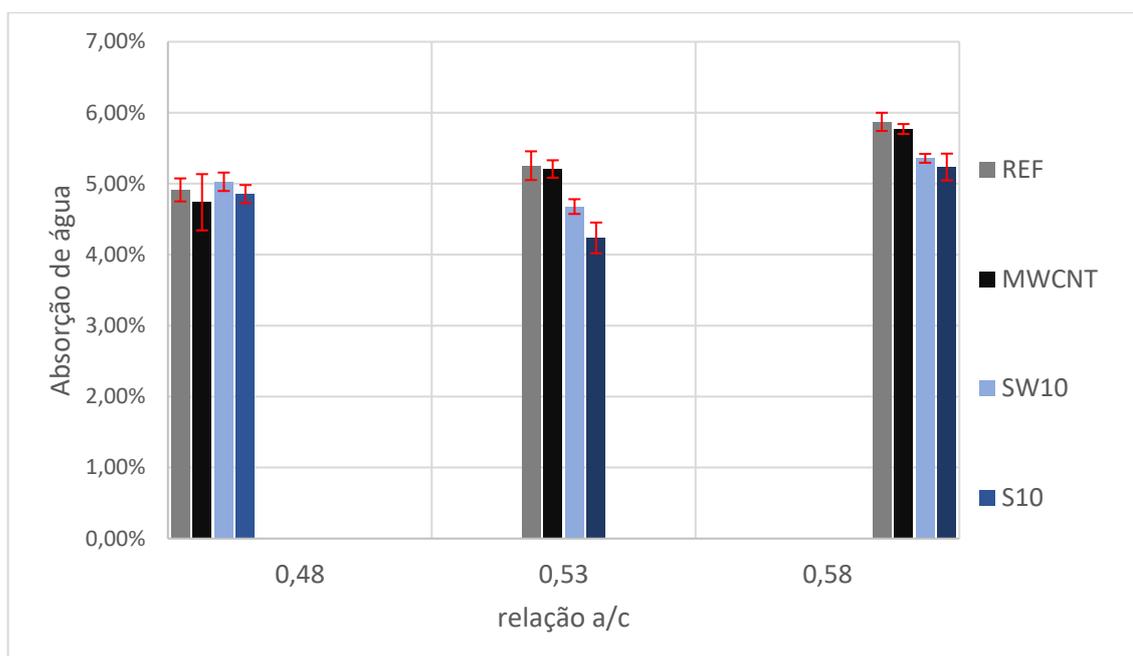
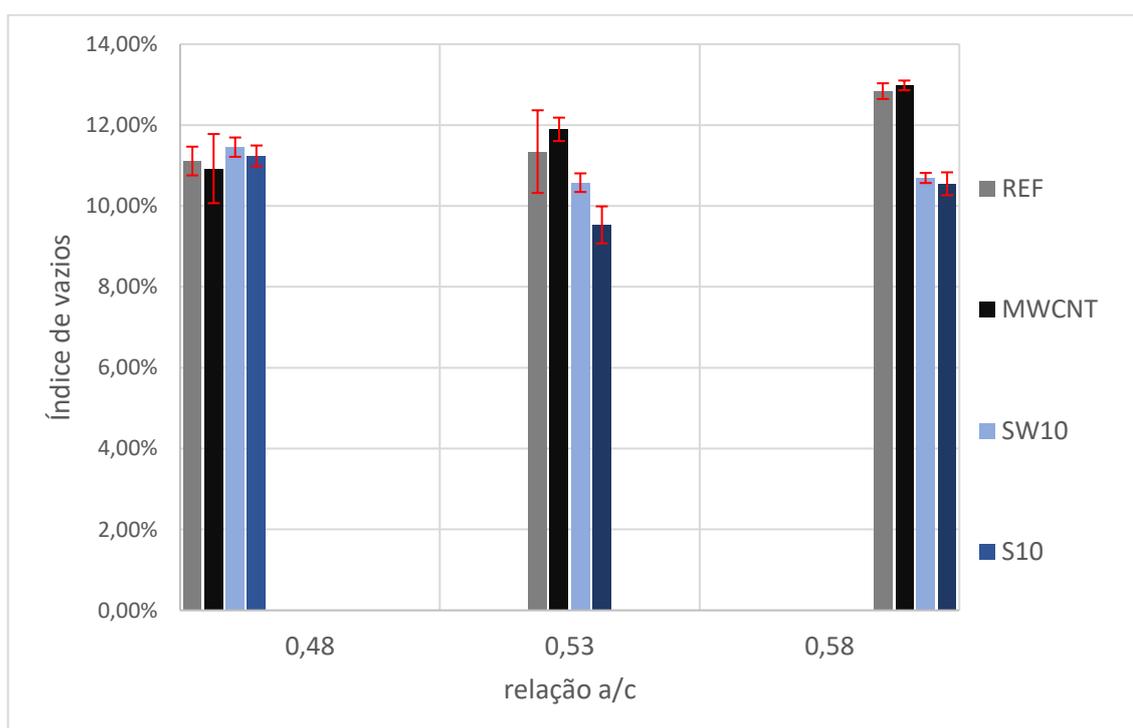


Figura 42 – Resultado do índice de vazios dos concretos aos 28 dias



Para auxiliar na discussão deste ensaio, é interessante comentar que a maior absorção de água de um concreto pode resultar em maior índice de vazios do que os concretos com menores absorções. Um concreto com menor índice de vazios representa melhor compactação e conseqüentemente pode resultar no

aprimoramento de suas propriedades mecânicas. Relacionado a isso, os resultados de índice de vazios dos concretos aos 28 dias mostraram que, para a relação a/c 0,48, não houve diferença significativa entre as médias de índice de vazios entre todos os concretos produzidos. Já para a relação a/c 0,53, a média do índice de vazios do concreto S10 foi menor do que as médias dos outros concretos (REF, MWCNT e SW10). Na relação a/c 0,58 os concretos REF e MWCNT resultaram em maiores médias de índice de vazios em relação aos concretos SW10 e S10.

Observa-se que houve uma tendência de haver um aumento na absorção de água dos concretos REF e MWCNT conforme foi aumentada a relação a/c de 0,48 para 0,58. Entretanto, esse mesmo comportamento não pode ser notado nos concretos SW10 e S10. Os concretos REF e MWCNT aumentaram a média de absorção de água em 1% conforme foi aumentada a relação a/c de 0,48 para 0,58, sendo que, da relação a/c 0,48 para 0,53, o aumento foi de 0,3% para o REF, e de 0,5% para o MWCNT. Já o concreto SW10 aumentou a média de absorção em 0,3% da relação a/c 0,48 para a relação 0,58. Porém, quando foi analisada a absorção entre 0,48 e 0,53, notou-se que houve um decréscimo de 0,4% na absorção. Para o concreto S10, houve um aumento de absorção de 0,4% da relação a/c 0,48 para a 0,58. Todavia, houve um decréscimo na absorção entre as relações a/c 0,48 e 0,53 no valor de 0,6%.

Verificou-se pelos resultados de absorção de água por imersão dos concretos aos 28 dias que, para a relação a/c 0,48, não houve diferença significativa entre as médias de absorção dos concretos produzidos. Para as relações a/c 0,53 e 0,58, as médias de absorção dos concretos SW10 e S10 foram menores do que as dos concretos REF e MWCNT. Comparando os concretos REF e S10, a média de absorção do concreto S10 foi menor do que a do concreto REF na relação a/c 0,53 em aproximadamente 1%, e 0,6% na relação a/c 0,58. Já na comparação entre o concreto S10 e SW10, não houve diferença significativa na média de absorção de água por imersão entre os dois concretos.

Observa-se que houve uma tendência de haver um aumento no índice de vazios dos concretos REF e MWCNT conforme foi aumentada a relação a/c de 0,48 para 0,58. Entretanto, esse mesmo comportamento não pôde ser notado nos concretos SW10 e S10. Os concretos REF e MWCNT aumentaram a média do índice de vazios em 1,7% e 2%, conforme foi aumentada a relação a/c de 0,48 para 0,58,

sendo que, da relação a/c 0,48 para a relação a/c 0,53, o aumento foi de 0,2% para o REF, e de 1% para o MWCNT. Já o concreto SW10 diminuiu a média do índice de vazios em 0,8% da relação a/c 0,48 para a relação a/c 0,58. Ainda, quando foi analisado o índice de vazios entre 0,48 e 0,53, percebeu-se que houve um decréscimo de 0,9%. Para o concreto S10, houve também uma diminuição no índice de vazios de 0,7% da relação a/c 0,48 para a 0,58, bem como houve um decréscimo na absorção entre as relações a/c 0,48 e 0,53 no valor de 1,7%. Na tabela 14 são ilustrados os resultados do ensaio de absorção de água por imersão nos concretos.

Tabela 14 – Resultados do ensaio de absorção de água por imersão em concreto

Concreto	Índice de vazios	Absorção de água
REF_0,58	12,8%	5,9%
MWCNT_0,58	13,0%	5,8%
SW10_0,58	10,7%	5,4%
S10_0,58	10,5%	5,2%
REF_0,53	11,3%	5,3%
MWCNT_0,53	11,9%	5,2%
SW10_0,53	10,6%	4,7%
S10_0,53	9,5%	4,2%
Ref_0,48	11,1%	4,9%
MWCNT_0,48	10,9%	4,7%
SW10_0,48	11,5%	5,0%
S10_0,48	11,2%	4,9%

Diante dos resultados obtidos, de modo geral, observa-se que os concretos produzidos com o nanomaterial (MWCNT e S10) não apresentaram menor absorção de água e menor índice de vazios em relação aos concretos sem a utilização do nanomaterial (REF e SW10). Segundo Ahmed et al. (2018), o ensaio de absorção de água por imersão tem como objetivo avaliar essencialmente a porosidade aberta total, portanto, o refinamento dos poros associado à redução da quantidade de mesoporos, poros de 2 a 50 nm, pode não ser significativo em tal ensaio. Isso auxilia no entendimento da menor contribuição do NTCPM em compósitos cimentícios por meio desse ensaio. Resultados como esses foram encontrados no estudo de Carriço et al. (2018), em que a inserção de NTCPM no compósito não resultou na diminuição da absorção de água. Os autores afirmam que esse resultado é difícil de ser explicado mesmo levando em conta a variabilidade do teste. Eles comentam que compósitos cimentícios produzidos com NTCPM podem reduzir e melhorar o refinamento do

tamanho dos poros, entretanto, não se espera uma redução significativa no volume total de poros do compósito, já que a quantidade de macroporos (poros com diâmetro maior que 50 nm) deve permanecer praticamente inalterada. Os autores comentam ainda que o efeito de ponte de ligação ocasionado pelo nanomaterial pode ajudar na redução da conectividade geral da matriz, mas não deve alterar significativamente a porosidade total do compósito. Ainda, no estudo de Borges (2019), foi relatado que a utilização do NTCPM em concreto não proporcionou diminuição na absorção de água por imersão em relação ao concreto de referência. Conforme comentado por Nochaya e Chaipanich (2011), os NTCPMs acarretam diminuição da quantidade de mesoporos (poros com diâmetros entre 2nm e 50nm) e não afetam significativamente a quantidade de macroporos (poros com diâmetro maiores que 50nm), fazendo com que a redução da porosidade total não seja significativa. Porém, para a relação a/c 0,53, houve uma diminuição na absorção de água pelo concreto S10 em relação ao SW10. Resultados semelhantes a esse foram encontrados em trabalhos disponíveis na literatura (MARCONDES *et al.*, 2015; AHMED *et al.*, 2018; WANG *et al.*, 2019).

#### 4.2.3 Síntese dos resultados em concreto

Com os resultados dos ensaios em concreto, foi demonstrado que a utilização de NTCPM se mostrou eficaz para diminuir o consumo de cimento Portland de concretos em 10%. Os resultados obtidos mostraram que as propriedades mecânicas dos concretos com a diminuição do consumo de cimento Portland foram compensadas pela inserção do nanomaterial, independente da relação a/c e da idade de ensaio. Além disso, houve uma diminuição da retração por secagem dos concretos com NTCPM em relação aos concretos sem o nanomaterial. Ainda, foi verificado que o estado fresco dos concretos foi diretamente influenciado pela inserção de NTCPM, indicando assim que, para um mesmo abatimento, é necessário utilizar maior quantidade de aditivo superplastificante para concretos produzidos com o nanomaterial em relação a concretos sem o NTCPM.

#### 4.3 PASTAS

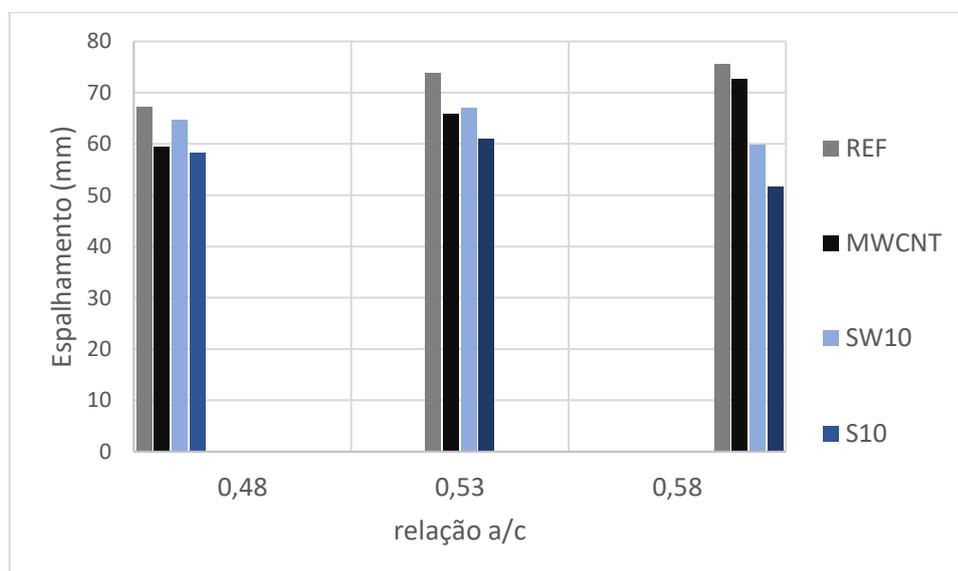
Para finalizar o programa experimental, foram produzidas pastas de cimento Portland para realização dos ensaios de miniespalhamento, reologia, calorimetria

isotérmica e difração de raios-X (DRX) na idade de três dias, e espectroscopia de infravermelho (FTIR) também para a idade de três dias.

#### 4.3.1 Estado Fresco

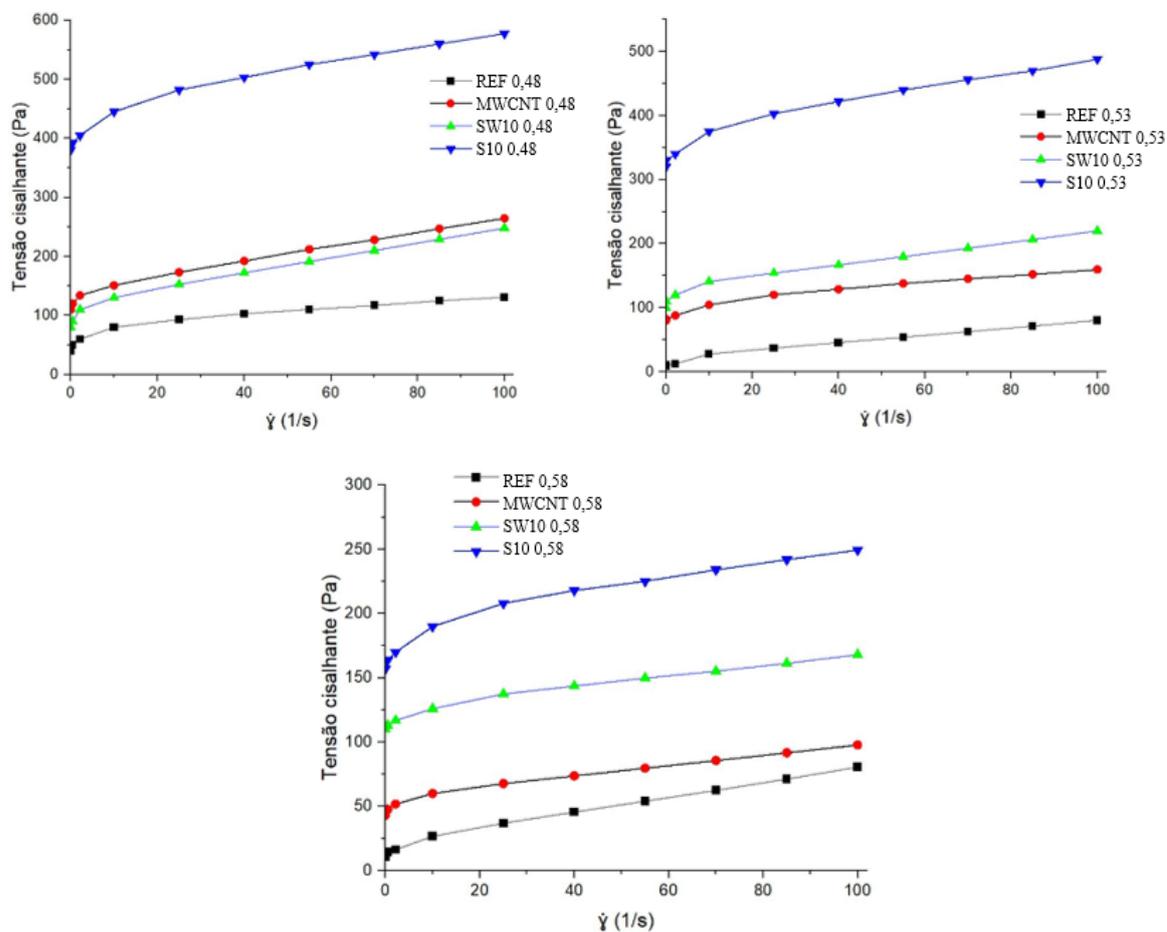
Conforme observado na Figura 43, o espalhamento das pastas produzidas com o nanomaterial (MWCNT e S10) resultou em menores espalhamentos do que as pastas originais (REF e SW10). Para a relação a/c 0,48, a pasta MWCNT resultou em um decréscimo de espalhamento de 11,7% em relação à pasta REF, e a pasta S10, em 10% em relação à pasta SW10. Já para a relação a/c 0,53, os decréscimos de espalhamento para as mesmas comparações foram de 10,7% e 9%, respectivamente. Por fim, para a relação a/c 0,58, os decréscimos foram de 4% e 14%. Resultados semelhantes foram encontrados por Silvestro (2022), em estudo em que a pasta produzida com incorporação de 0,1% de MWCNT resultou na perda de 31% no ensaio de miniatamento em relação à pasta de referência. Assim, conforme os resultados encontrados em concretos e argamassas, o comportamento de diminuição do espalhamento dos compósitos cimentícios com o nanomaterial foi condizente.

Figura 43 – Resultado do ensaio de *minislump* das pastas



Para complementar os resultados do ensaio de miniespalhamento, foram realizados ensaios reológicos nas pastas. A Figura 44 ilustra os resultados obtidos no ensaio reológico de pastas. Nela são apresentadas as curvas de tensão cisalhante vs taxa de cisalhamento. Conforme verificado, os perfis reológicos das pastas não foram alterados pela incorporação de NTCPM.

Figura 44 – Resultado do ensaio reológico em pastas (curvas de fluxo)



Verificou-se que as pastas produzidas apresentaram diminuição da viscosidade conforme ocorria o aumento da taxa de cisalhamento. Portanto, as pastas possuem um comportamento não newtoniano pseudoplástico em baixas taxas de cisalhamento (ROUSSEL, 2012; SILVESTRO, 2022). Pastas de cimento Portland, em sua maioria, resultam em comportamento pseudoplástico em baixas taxas de cisalhamento (JIAO, et al., 2018). Assim, o modelo de Herschel-Bulkley foi adotado para o presente estudo para o ajuste das curvas e para o cálculo dos parâmetros reológicos, uma vez que este modelo é o mais adequado para o estudo de propriedades reológicas dos compósitos cimentícios (CHEN et al., 2020; ANDRADE NETO et al., 2021).

Na tabela 15 são mostrados os valores dos parâmetros reológicos obtidos por meio do modelo de Herschel-Bulkley. O modelo de Herschel-Bulkley não fornece diretamente o valor da viscosidade, porque esta varia de acordo com a taxa de cisalhamento aplicada. Dessa maneira, de Larrard e Sedran (2002) sugeriram um ajuste linear do modelo de Herschel-Bulkley por meio do método dos mínimos

quadrados. Dessa forma, a viscosidade aparente ( $\mu_{app}$ ) foi determinada pela inclinação da reta do ajuste linear. A equação 3 adotada pelos autores é mostrada a seguir.

$$\mu_{app} = \frac{3K}{n+2} \cdot (y_{max})^{n-1} \quad (3)$$

Onde K representa o índice de consistência, n é o índice pseudoplástico do modelo Herschel-Bulkley, e  $y_{max}$  é a taxa de cisalhamento máxima aplicada.

Tabela 15 – Dados determinados dos coeficientes pelo modelo de Herschel-Bulkley

Pasta	Herschel-Bulkley				
	R <sup>2</sup>	K	n	$\tau_0$ (Pa)	$\mu_{app}$ (Pa. s)
REF 0,48	0,992	3,44	0,70	32,78	0,96
MWCNT 0,48	0,974	0,85	1,08	108,07	1,19
SW10 0,48	0,980	1,47	0,98	76,24	1,36
S10 0,48	0,983	2,27	0,95	371,18	1,81
REF 0,53	0,985	3,37	0,66	8,49	0,79
MWCNT 0,53	0,992	8,30	0,50	77,52	0,98
SW10 0,53	0,999	8,86	0,55	103,32	1,32
S10 0,53	0,987	16,26	0,50	318,69	1,98
REF 0,58	0,994	2,35	0,73	12,17	0,73
MWCNT 0,58	0,993	3,79	0,57	44,46	0,60
SW10 0,58	0,992	4,46	0,55	109,92	0,66
S10 0,58	0,977	12,76	0,43	154,46	1,16

Observa-se na Tabela 15 que praticamente todas as misturas apresentaram um comportamento fluidificante, o que significa redução da viscosidade com o aumento da taxa de cisalhamento. Esse comportamento é indicado pelo índice n, o qual deve ser menor que 1 para que o comportamento da mistura seja considerado fluidificante. Apenas a pasta MWCNT 0,48 resultou no valor  $n > 1$ , o que representa comportamento linear do compósito cimentício.

A respeito da tensão de escoamento dinâmica ( $\tau_0$ ), segundo Jiang et al. (2018), a tensão de escoamento é relacionada ao valor de tensão de escoamento mínimo para que ocorra o início do fluxo e deformação do material. Este parâmetro reológico está diretamente ligado às forças adesivas de atrito entre as partículas. Portanto, verifica-se que esse parâmetro é aumentado pela inserção do NTCPM na pasta de cimento Portland. Na relação a/c 0,48, houve um aumento de 230% e 387% para esse parâmetro quando comparadas as pastas REF com a MWCNT, e a SW10

com a S10, respectivamente. Já na relação a/c 0,53, para as mesmas comparações, ocorreu um aumento respectivo desse parâmetro de 813% e 208%. Por fim, na relação a/c 0,48, houve um aumento de 265% e de 41%, para as mesmas comparações respectivas. Além disso, comparando as pastas REF e S10, verificou-se que houve aumentos de 1032% para a relação a/c 0,48, de 3654% para a relação 0,53, e de 1169% para a relação a/c 0,58. Ressalta-se que esse elevado aumento da tensão de escoamento entre a pasta REF e S10 deveu-se à utilização do nanomaterial e também ao aumento da quantidade do material inerte, o que acarretou diminuição da quantidade de pasta do sistema (água e cimento Portland).

Esses resultados convergem com os resultados encontrados por meio do ensaio de *mini-slump*. Resultados semelhantes a esses foram encontrados por Farooq *et al.* (2020), Andrade Neto *et al.* (2021) e Silvestro (2022). Portanto, esse aumento pode estar relacionado à maior adsorção de parte da água da mistura ocasionada pelos grupos carboxila na superfície do NTCPM, que acarreta o aumento da hidrofiliabilidade do nanomaterial (MUSSO *et al.*, 2009; KANG *et al.*, 2015; AHMED *et al.*, 2019). Ainda, há uma tendência de aglomeração pelos NTCPMs, porque eles podem interagir com os íons  $Ca^{2+}$  resultantes do processo de hidratação das partículas de cimento Portland, podendo aumentar o aprisionamento de água da mistura em aglomerados de NTCPM (NASIBULINA *et al.*, 2012; SILVESTRO 2022). Diante disso, Jiang *et al.* (2018) relatam que o aumento excessivo da tensão de escoamento dinâmica ocasionado pela utilização de NTCPM pode estar associado à maior incorporação de ar no estado fresco das misturas, podendo impactar negativamente no desempenho mecânico de compósitos cimentícios. Entretanto, isso não foi verificado no presente estudo, cujos resultados de maior incorporação de ar no estado fresco dos concretos foram obtidos pelos concretos com incorporação de NTCPM, e cujas maiores resistências encontradas foram dos concretos com o nanomaterial. Assim, esse aumento da tensão de escoamento dinâmica pode estar relacionado com o efeito de preenchimento provocado pelo menor tamanho das partículas de NTCPM, reduzindo o espaço entre as partículas do sistema, e, assim, aumentando a colisão entre elas, juntamente à maior área superficial específica do nanomaterial, que demanda maior quantidade de água para molhar sua superfície, aumentando as forças de atrito entre as partículas (JIANG *et al.*, 2018).

Com relação à viscosidade aparente ( $\mu_{app}$ ) das pastas, foi verificado que, para quase todas as pastas com NTCPM (MWCNT e S10), obtiveram-se resultados com maiores viscosidades aparentes em relação às pastas sem o nanomaterial (REF e SW10). A viscosidade aparente é o parâmetro que avalia a resistência ao fluxo, parâmetro este que é influenciado pela forma, tamanho e concentração dos insumos que constituem a mistura (JIANG, et al., 2018). Para a relação a/c 0,48, os aumentos de viscosidade aparente foram de 23% e de 33% para a comparação entre as pastas MWCNT com a REF, e S10 com a SW10. Já para a relação 0,53, foram obtidos os valores de 24% e 51% para as mesmas comparações, respectivamente, e para a relação 0,58, para as mesmas comparações respectivas, foram obtidos valores de -18% e de 74%. Quando comparadas as pastas REF e S10, verificou-se que o aumento da viscosidade foi de 87% para a relação a/c 0,48, de 151% para a relação a/c 0,53, e de 58% para a relação a/c 0,58. Cabe lembrar que este aumento de viscosidade pelas pastas S10 em relação à REF possui o efeito sinérgico da utilização do nanomaterial e da diminuição da quantidade de pasta, bem como do aumento da quantidade de pó de quartzo no sistema. No que diz respeito à inserção do nanomaterial em misturas cimentícias, foram relatados acentuação de viscosidade aparente nos trabalhos de Jian et al. (2018), Farooq et al. (2020) e Silvestro (2022).

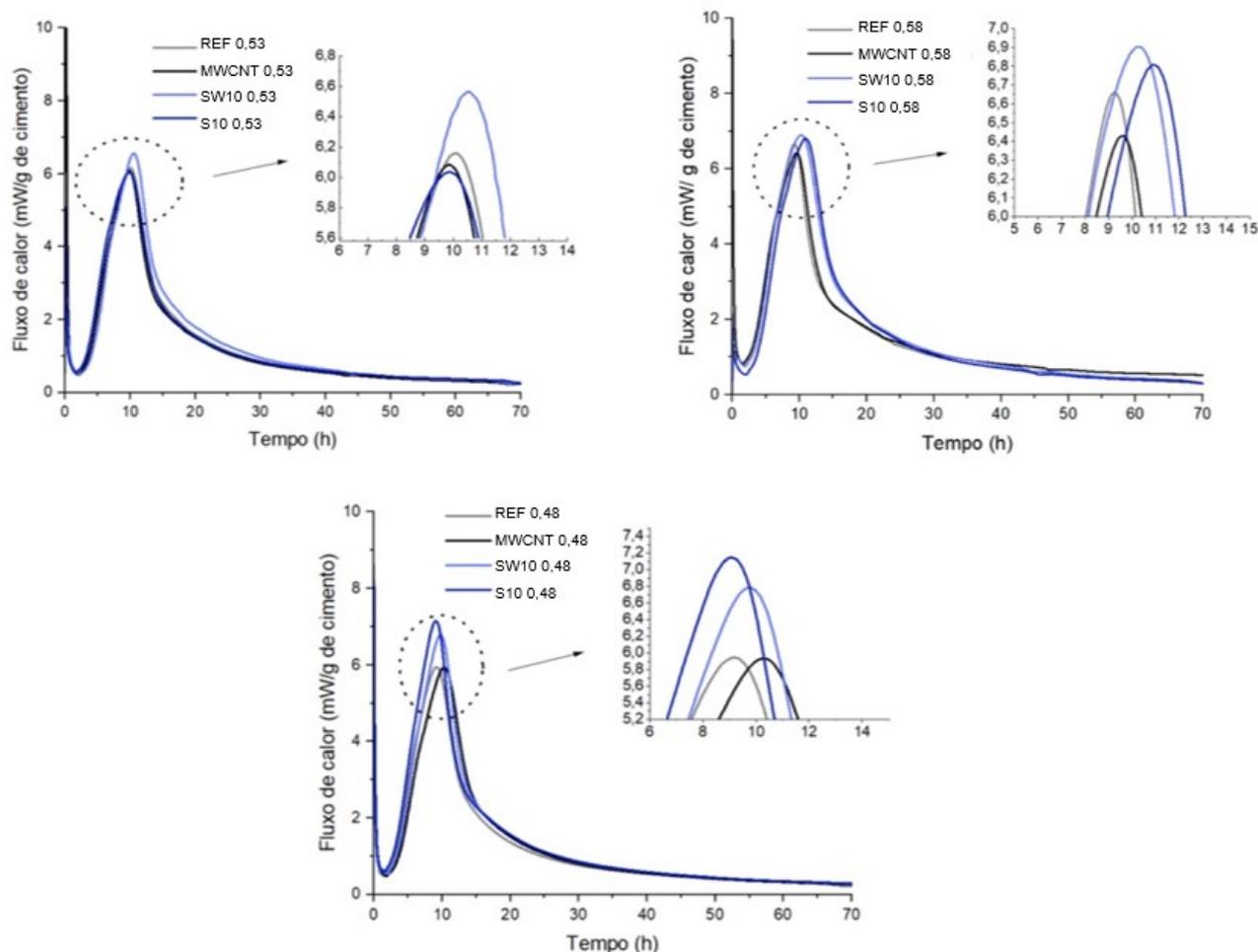
#### 4.3.2 Hidratação e microestrutura das pastas

Para analisar a hidratação das pastas de cimento Portland produzidas no presente estudo, serão apresentados os resultados dos ensaios de calorimetria isotérmica, difração de raios-X (DRX) e espectroscopia em infravermelho (FTIR). Podem ser identificadas quatro etapas nas curvas de fluxo de calor, sendo elas: (1) período inicial que ocorre nos primeiros minutos após o contato das partículas de cimento Portland e a água que está vinculada à dissolução das fases de cimento e rápida formação de etringita; (2) período de indução ou de dormência, em que a velocidade é baixa; (3) período em que há a aceleração associada principalmente à reação de alita, e a consequente formação de C-S-H e portlandita; (4) período em que ocorre a desaceleração caracterizada por uma redução gradativa da taxa de reação (BULLARD *et al.*, 2011; SCRIVENER *et al.*, 2016).

As curvas de liberação de calor das pastas medidas por meio da calorimetria isotérmica estão apresentadas na Figura 46. Os valores de fluxo de calor foram

ajustados para a massa de cimento de cada amostra analisada. Ainda, as curvas de fluxo de calor ilustradas na Figura 45 são referentes ao período de 70 horas de ensaio.

Figura 45 – Resultados referentes ao ensaio de calorimetria isotérmica das pastas



Nesse contexto, ressalta-se que a influência dos NTCPMs na hidratação das partículas de cimento Portland não é totalmente compreendida (MACLEOD, *et al.*, 2021; SILVESTRO, 2022). Alguns estudos mostram que houve aceleração nas reações de hidratação das partículas de cimento Portland devido à inserção do nanomaterial (MAKAR; CHAN, 2009; NADIV *et al.*, 2016; ALATAWNA *et al.*, 2020), e outros estudos indicam que a inserção de NTCPM em pastas de cimento Portland faz com que haja um decréscimo no grau de hidratação das partículas de cimento Portland (ISFAHANI *et al.*, 2016; SIKORA *et al.*, 2019). Entretanto, Rashad (2017) indica que há maior quantidade de estudos com relatos de que a inserção do nanomaterial em pastas de cimento Portland acarretam aceleração no processo de hidratação das partículas de cimento Portland.

Com relação aos resultados deste estudo, podem ser observados comportamentos semelhantes em relação ao pico de calor principal em todas as relações a/c das misturas REF e MWCNT, e SW10 e S10. Esse comportamento semelhante para o pico principal de liberação de calor foi equivalente quando comparadas as misturas REF e MWCNT, e as misturas SW10 e S10. O pico de liberação de calor principal é correspondente à formação de C-S-H e portlandita. Portanto, não ficou evidenciado valor significativamente diferente entre as misturas originais (REF e SW10) comparadas com as misturas com o nanomaterial (MWCNT e S10).

Ainda, o comportamento da curva de calor das misturas originais não se diferenciou significativamente das curvas das pastas produzidas com NTCPM. Isso é um indício de que não houve interferência no processo de hidratação das partículas de cimento Portland devido à inserção do nanomaterial nas pastas. Entretanto, houve uma antecipação no tempo de ocorrência do pico de calor principal para a pasta S10 nas relações a/c 0,48 e 0,53 em relação à pasta SW10 e para a pasta MWCNT em relação à REF na relação a/c 0,53. Esse comportamento pode ser atribuído à redução a/c efetiva destas pastas, contribuindo para a aceleração das reações iniciais de hidratação (SCRIVENER *et al.*, 2016). Isso ocorre porque os nanotubos de carbono com o grupo carboxila possuem comportamento hidrofílico e assim podem adsorver a água da mistura, e também porque há a tendência de aglomeração do nanomaterial em ambientes iônicos, fazendo com que ocorra o aprisionamento da água de amassamento. Silvestro (2022) relatou resultados semelhantes para pastas de cimento Portland com utilização de NTCPM para relação a/c 0,40.

De encontro a isso, a pasta MWCNT resultou no atraso do pico principal de fluxo de calor em relação à REF para as relações a/c 0,48 e 0,58, bem como a pasta S10 em relação à pasta SW10 na relação a/c 0,58. Isso pode ter ocorrido pelo fato de que as pastas com o nanomaterial (MWCNT e S10) tiveram a mesma quantidade fixa de aditivo superplastificante do que as pastas REF e SW10. Desse modo, o aditivo superplastificante pode ter retardado o pico de liberação de calor principal das pastas MWCNT e S10, fazendo contraposição ao efeito de aceleração da hidratação das partículas de cimento Portland ocasionado pela inserção do nanomaterial. Muitos trabalhos na literatura relatam esse efeito ocasionado pelo aditivo superplastificante à base de policarboxilato (KONG *et al.*, 2016; HE *et al.*, 2019). Além disso, Reales *et al.*

(2021) relatam em seu estudo que o efeito do superplastificante pode mascarar o efeito do nanomaterial na cinética de hidratação das partículas de cimento Portland.

Para a relação a/c 0,58, a pasta SW10 resultou em maior pico principal de liberação de calor em comparação com as outras pastas, sendo que seu pico foi maior em 3,6% em relação à pasta a REF, em 7,4% em relação à pasta MWCNT e em 1,4% em relação à pasta S10. Também para a relação a/c 0,53, a pasta SW10 resultou em maior pico principal de liberação de calor, sendo 6,5% maior em relação à pasta REF, 7,9% em relação à pasta MWCNT, e 8,7% em relação à S10. Por fim, para as pastas com relação a/c 0,48, o maior pico principal de liberação de calor foi obtido pela pasta S10, para a qual os valores obtidos foram de 20,2% em relação à pasta REF, de 20,4% em relação à pasta MWCNT, e de 5,4% em relação à SW10. Na Tabela 16 são apresentados os dados de liberação de calor do pico principal de cada pasta de cimento Portland analisada.

Tabela 16 – Parâmetros calorimétricos das pastas de cimento Portland analisadas

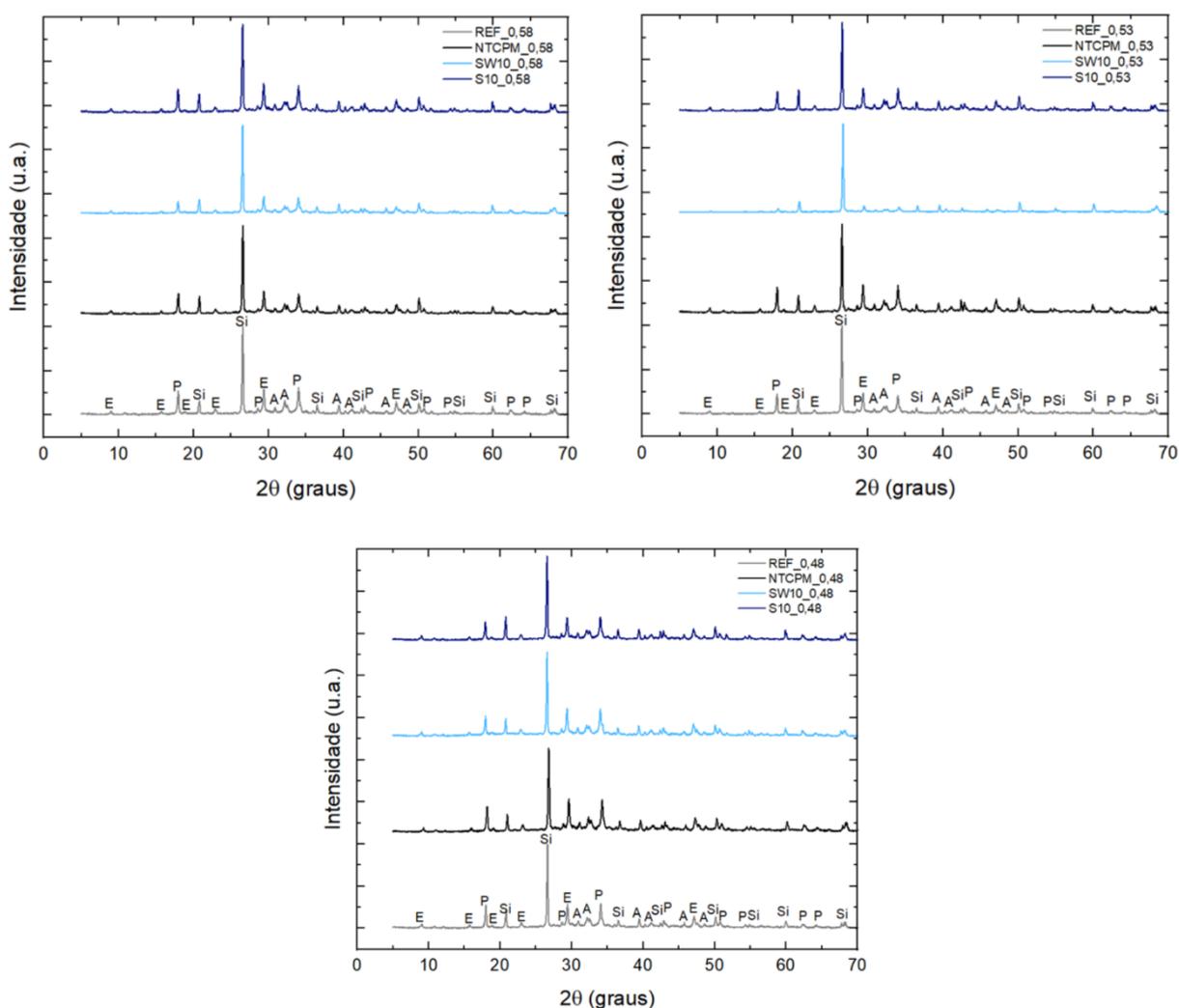
Pasta de cimento	Valor do pico principal do fluxo de calor (mW/g)	Horário do pico principal do fluxo de calor (h:min)
REF_0,58	6,66	09:15
MWCNT_0,58	6,43	09:34
SW10_0,58	6,90	10:12
S10_0,58	6,81	10:32
REF_0,53	6,16	10:04
MWCNT_0,53	6,08	09:51
SW10_0,53	6,56	10:31
S10_0,53	6,04	09:54
Ref_0,48	5,95	09:10
MWCNT_0,48	5,94	10:17
SW10_0,48	6,78	09:44
S10_0,48	7,15	09:03

Em relação à comparação das pastas de cimento produzidas com menor consumo de cimento Portland (SW10 e S10) com as pastas de maior consumo de cimento (REF e MWCNT), pode-se dizer que, para as relações a/c 0,53 e 0,58, não houve diferença significativa na intensidade do pico de liberação de calor principal. Entretanto, para a relação a/c 0,48, esse pico de liberação de calor principal mostrou-se diferente para essas misturas. Com os resultados mostrados e discutidos aqui, consegue-se inferir que não houve atraso ou aceleração do processo de hidratação das pastas com NTCPM (MWCNT e S10) em relação às pastas sem o nanomaterial

(REF e SW10) para todas as relações a/c analisadas. Portanto, as pastas produzidas com NTCPM não deveriam resultar em novas fases/produtos de hidratação das partículas de cimento Portland.

Para complementar a análise, foi realizado o ensaio de DRX para a idade de três dias. Com isso, a microestrutura das pastas de cimento com a incorporação do nanomaterial e com diferentes relações a/c foi avaliada aos três dias de hidratação por meio do ensaio de DRX, conforme os resultados na Figura 46. As principais fases identificadas de acordo com as fichas catalográficas foram: alita (A), portlandita (P) e etringita (E). Além disso, foi identificada a fase  $\text{SiO}_2$  (Si), que ocorre devido à utilização do pó de quartzo para evitar a exsudação das pastas e simular uma mistura mais próxima da realidade dos ensaios de concreto e argamassas.

Figura 46 – Resultados do ensaio de DRX nas pastas de cimento Portland



Os resultados de DRX indicaram que a adição de NTCPM não promoveu a formação de fases adicionais na pasta de cimento Portland, indo ao encontro do que foi relatado por meio do ensaio de calorimetria isotérmica. Além disso, não foram observadas mudanças significativas na intensidade de pico das fases principais, indicando assim que a adição do nanotubo de carbono nas pastas não afetou seu grau de hidratação para a idade de três dias.

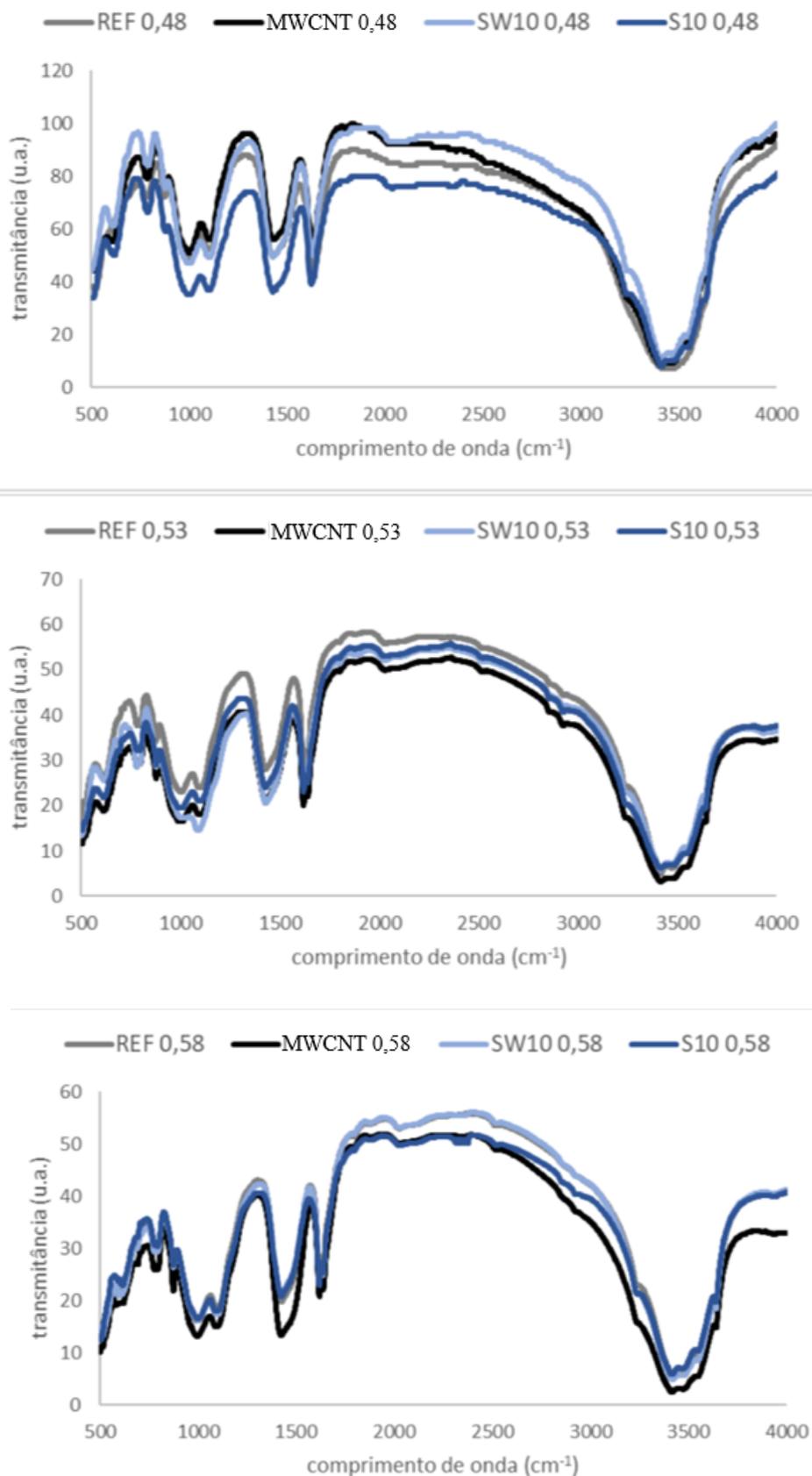
Pode ser destacado ainda que o pico de portlandita em  $18,1^\circ 2\theta$  resultou em diferentes intensidades quando comparadas as pastas dentro de cada relação a/c para todas as relações a/c. Entretanto a mudança de intensidade do pico em  $34,1^\circ 2\theta$  foi equivalente. Além disso, não foram observadas nos resultados variações significativas dos picos atribuídos à alita. Assim, nesse contexto, considera-se que o pico de portlandita em  $18,1^\circ 2\theta$  é significativamente influenciado pela orientação preferencial da portlandita enquanto se faz a preparação da amostra em pó, com o atenuante de se utilizar um porta-amostras com carregamento frontal, conforme utilizado neste estudo (SCRIVENER *et al.*, 2016; SILVESTRO, 2021; MATOS *et al.* 2021b). Com essas informações, pode-se atribuir essas diferenças nesses picos de portlandita à orientação preferencial da fase e não a variações no grau de hidratação entre as pastas, visto que os demais picos da portlandita e da alita se mantiveram sem alterações.

Esses resultados indicam que, embora haja uma alteração cinética de hidratação inicial das partículas de cimento Portland, conforme verificado nos resultados de calorimetria isotérmica, não houve diferenciações no grau de hidratação das pastas de cimento Portland com e sem o nanomaterial para a idade de três dias para todas as relações a/c estudadas. Portanto, os aprimoramentos nas propriedades mecânicas das misturas são atribuídos à ação física dos NTCPMs por preenchimento de vazios e melhoria na distribuição de tensões do compósito.

Por fim, para auxiliar nas análises, foi realizado o ensaio de FTIR em pastas de cimento Portland com e sem o nanomaterial aos três dias. Foram analisadas que as principais bandas relatadas pela literatura estão presentes para todas as pastas e relações a/c analisadas, conforme os resultados ilustrados na Figura 47. São elas: (1) as bandas nos comprimentos de onda em  $3443\text{ cm}^{-1}$  e  $1650\text{ cm}^{-1}$ , que são relacionadas à água ligada ao C-S-H; (2) a banda no comprimento de onda de  $3650\text{ cm}^{-1}$ , que é relacionada à água ligada à portlandita; (3) a banda no comprimento de

onda em  $1117\text{ cm}^{-1}$ , a qual é relacionada à presença de etringita; (4) e a banda entre os comprimentos de onda entre 1420 e 1480, correspondente a vibrações de carbonato (HORGNIES et al., 2013; PARVEEN et al., 2015).

Figura 47 – Resultados do ensaio de FTIR para as pastas com e sem NTCPM para todas as relações a/c utilizadas aos três dias



Conforme observado na Figura 47, de modo geral, as pastas produzidas com NTCPM não resultaram em comportamento diferente das pastas produzidas sem o nanomaterial para a idade de três dias. Isso é um indicativo de que não houve formação de novos compostos resultante do processo de hidratação das partículas de cimento Portland devido à inserção do nanomaterial. Foram encontrados na literatura resultados semelhantes aos encontrados neste estudo (SOUZA *et al.*, 2020; LI *et al.*, 2022). Este fato indica que os ganhos das propriedades mecânicas pela inserção do nanomaterial não estão relacionados à formação de diferentes compostos ou às novas fases diferentes daquelas geralmente resultantes do processo de hidratação das partículas de cimento Portland (SOUZA *et al.*, 2020). Portanto, os aprimoramentos das propriedades mecânicas dos compósitos com o nanomaterial são relacionados ao seu efeito físico atuando como elemento de ligação e preenchimento na micro e nanoescala. Ahmed *et al.* (2019), Souza *et al.* (2020) e Silvestro (2022) relataram resultados semelhantes aos encontrados no presente estudo. Esses resultados vão ao encontro dos resultados obtidos pelo ensaio de DRX e calorimetria isotérmica.

Levando em consideração que a utilização do NTCPM não indicou alterações no grau de hidratação das partículas de cimento Portland e na microestrutura dos produtos formados, comparando REF com MWCNT, e SW10 com S10, o aumento da resistência pela incorporação dos nanomateriais pode ser vinculado à melhor distribuição de tensões, pelo efeito de preenchimento ocasionado pela nanopartícula e melhoramento da zona de transição de interface pasta-agregado (HAWREEN; BOGAS, 2019).

## 5 CONCLUSÕES

Este último tópico tem como objetivo indicar as principais considerações sobre os resultados obtidos no programa experimental realizado. Por fim, serão apresentadas algumas sugestões para produção de novos trabalhos referentes ao estudo de nanotubos de carbono em compósitos cimentícios.

### 5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho visou a utilizar NTCPM para diminuir o consumo de cimento Portland em concretos, e assim comparar as propriedades no estado fresco e endurecido dos concretos produzidos com o nanomaterial e com menor consumo de cimento Portland com as dos concretos sem o nanomaterial. Em relação à etapa de determinação dos parâmetros utilizados no presente estudo, podem ser destacadas algumas conclusões:

- Foi possível produzir argamassas com menores resistências à compressão aos 28 dias, diminuindo o consumo de cimento Portland sem alterar a relação a/c;
- A utilização do NTCPM em solução aquosa com aditivo superplastificante e agitação manual promoveu melhoras na resistência à compressão de argamassas. A solução aquosa adotada teve relação de 1:2 (NTCPM: aditivo superplastificante);
- Foi observado que a inserção do nanomaterial possibilitou a produção de argamassa com consumo de cimento Portland 10% menor do que a argamassa de referência, sem alterar sua resistência à compressão;
- Não houve diferença significativa de propriedades mecânicas das argamassas produzidas com teor de aditivo fixo e espalhamento fixo. Portanto, foi adotado para o presente estudo a utilização do teor de aditivo fixo para produção dos concretos e argamassas;
- Verificou-se que argamassas produzidas com NTCPM resultaram em menores espalhamentos do que as argamassas produzidas sem o nanomaterial;
- Quanto às propriedades mecânicas, ficou evidenciado que a inserção do NTCPM as aprimorou independentemente da diminuição do consumo de cimento Portland utilizada, indicando assim que a utilização de

NTCPM para compensar a diminuição de cimento Portland em argamassas foi eficaz.

Em relação à análise dos resultados de concretos e pastas, podem ser elencadas as seguintes conclusões:

- Os compósitos cimentícios produzidos com NTCPM resultaram em menores abatimentos do que os compósitos sem o nanomaterial. Ainda, os ensaios reológicos, tanto para pastas quanto para concretos, indicaram que houve aumentos nos parâmetros reológicos, na tensão de escoamento dinâmica e na viscosidade aparente, para as misturas produzidas com o nanomaterial;
- Não houve indícios de alteração do processo de hidratação devido à inserção do NTCPM. Ainda, não foram observadas formações de novas fases resultantes do processo de hidratação das partículas de cimento Portland pela utilização do NTCPM;
- Foi produzido concreto com diminuição de 10% do consumo de cimento Portland sem alteração da relação a/c com NTCPM sem resultar em perda de resistência à compressão aos 28 dias em relação ao concreto de referência. Portanto, a utilização de NTCPM para compensar a diminuição do consumo de cimento Portland se mostrou como uma adequada ferramenta sustentável em concreto de cimento Portland;
- A diminuição do consumo de cimento Portland acarretada pela inserção de NTCPM em concreto é de grande relevância ambiental, já que quanto maior a diminuição do consumo de cimento Portland em concreto, menor será a necessidade da sua produção para a produção de concretos, e, assim, menor serão as emissões de gases poluentes na atmosfera;
- Ficou evidente que ganhos nas propriedades mecânicas dos concretos produzidos com o nanomaterial são relacionados ao seu efeito de preenchimento e efeito de ligação.

De maneira geral, este trabalho relatou que o nanomaterial pode ser uma ferramenta para auxiliar na produção de concretos convencionais com menores consumos de cimento Portland sem acarretar na redução das suas propriedades mecânicas. Vale lembrar que a diminuição do consumo de cimento Portland é de suma

importância para a redução da emissão de gases poluentes na atmosfera. Ressalta-se, portanto, que o nanotubo de carbono de paredes múltiplas tende a ser uma ferramenta ambientalmente sustentável para diminuição do consumo de cimento Portland em concretos.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com os resultados obtidos neste estudo, é interessante ressaltar alguns aspectos para desenvolver novas pesquisas futuras à cerca da utilização de NTCPM em concreto de cimento Portland:

- Analisar a influência de teores maiores que 0,1% em relação da massa de cimento Portland nas propriedades do estado fresco e endurecido de concretos;
- Avaliar a durabilidade de concretos produzidos com o teor de 0,1% de NTCPM e de teores maiores que 0,1%;
- Analisar a influência de NTCPM em teores iguais ou maiores que 0,1% no estado fresco e endurecido de concreto de cimento Portland com materiais cimentícios suplementares;
- Utilizar NTCPM com diferentes tipos de funcionalização para teores iguais ou maiores que 0,1% em concreto de cimento Portland, analisando as propriedades no estado fresco e endurecido.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDEL-GAWWAD, H. A.; MOHAMMED, M. S.; ALOMAYRI, T. Single and dual effects of magnésia and alumina nano-particles on strength and drying shrinkage of álcali activated slag. **Construction and Building Materials**. V 228, 2019.

AHMED, H.; BOGAS, J. A.; GUEDES, M. Mechanical behavior and transport properties of cementitious composites reinforced with carbon nanotubes. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 30, n. 10, p. 1 – 14, 2018. DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002470.

AHMED, H.; GUEDES, M.; BOGAS, J. A.; PEREIRA, M. F. C. Dispersion and reinforcement efficiency of carbon nanotubes in cementitious composites. **Magazine of Concrete Research**, v. 71, p. 408 – 423, 2019.

AJAYAN, P. M.; SCHADLER, L. S.; BRAUN, P. V. **Processing and Properties of Nanocomposites**. 1. ed. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2003.

ALATAWNA, A.; BIRENBOIM, M.; NADIV, R.; BUZAGLO, M.; PERETZ-DAMARI, S.; PELED, A.; REGEV, O.; SRIPADA, R. The effect of compatibility and dimensionality of carbon nanofillers on cement composites. **Construction and Building Materials**, v. 232, p. 1 – 10, 2020.

AMIN, M.S.; EL-GAMAL, S.M.A.; HASHEM, F.S. Fire resistance and mechanical properties of carbon nanotubes – clay bricks wastes (Homra) composites cement. **Construction and Building Materials**, v. 98, p. 237-249, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.074>

ANDRADE NETO, J.S.; SANTOS, T.A.; PINTO, S.A.; DIAS, C.M.R.; RIBEIRO, D.V. Effect of the combined use of carbon nanotubes (CNT) and metakaolin on the properties of cementitious matrices. **Construction and Building Materials**, v. 271, 2021.

ANDREW, R.M. Global CO<sub>2</sub> emissions from cement production, 1928-2018: Review Article. **Earth System Science data**. Vol, 11. Pg, 1675 – 1710. 2019. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1675-2019>

ARAÚJO, K. A. de S. **Estudo de propriedades elétricas de nanotubos de carbono e monocamadas de ácido retinóico por microscopia de varredura por sonda.** Tese (Doutorado em Ciências – Física) – Programa de Pós-Graduação em Física, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

ASAGA, K.; ISHIZAKI, M.; TAKAHAGH, S.; KONISHI, K.; TSURUMI, T.; AIMON, M. Effect of curing temperature on the hydration of portland cement compounds. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER COMMUNICATION, 9, 1992. **Deli. Conference Deli: ICCC, 1992.**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NORMA BRASILEIRA (NBR) 16697: **Cimento Portland – Requisitos.** Rio de Janeiro, 2018.

\_\_\_\_\_.NBR 5738: **Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.** Rio de Janeiro, 2015.

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

\_\_\_\_\_.NBR 8953: **Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência.** Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_.NBR 9778: **Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro, 2009.

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

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

\_\_\_\_\_.NBR NM 53: **Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** Rio de Janeiro, 2009.

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

AYDIN, A. C.; NASL, V.J.; KOTAN, T. The synergic influence of nano-silica and carbon nano tube on self-compacting concrete. **Journal of Building Engineering**. V, 20. Pa, 467 – 475. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.08.013>

BALOCH, W. L.; KHUSHNOOD, R. A.; KHALIQ, W. Influence of multi-walled carbon nanotubes on the residual performance of concrete exposed to high temperatures. **Construction and Building Materials**. v. 185, p. 44 – 56, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.051>

BALOCH, W. L.; KHUSHNOOD, R. A.; MEMON, S. A.; AHMED, W.; AHMAD, S. Effect of Elevated Temperatures on Mechanical Performance of Normal and Lightweight Concretes Reinforced with Carbon Nanotubes. **Fire Technology**. P. 1-37. 2018. <https://doi.org/10.1007/s10694-018-0733-z> .

BANFILL, P.F.G. Additivity effects in the rheology of fresh concrete containing water-reducing admixtures. **Construction and Building Materials**. Volume 25, Issue 6, Pages 2955–2960. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.001>

BATISTON, E.R. **Estudo exploratório dos efeitos de nanotubos de carbono em matrizes de cimento Portland**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 92 p. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

BODNAROVA, L.; JAROLIM, T. Study the effect of carbon nanoparticles in concrete. **Materials Science and engineering**. V. 385, 2018. doi:10.1088/1757-899X/385/1/012006.

BORGES, L.A. **Desempenho de concretos produzidos com nanotubos de carbono sintetizados diretamente sobre o clínquer**. Dissertação apresentada ao Programa de PósGraduação em Construção Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG. 2019.

BOTELLA, R.M. **Reologia de suspensions ceramicas**. Consejo superior de investigaciones cientificas, Madrid, 2005.

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

CAVALIERE, I. S. G. **O estudo comparativo do módulo de elasticidade de concretos convencionais e concretos com materiais alternativos**. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana). Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana. Universidade Católica de Campinas, Campinas – SP, Brasil. 2020.

CHAIPANICH, A.; NOCHAIYA, T.; WONGKEO, W.; TORKITTIKUL, P. Compressive strength and microstructure of carbon nanotubes–fly ash cement composites. **Materials Science and Engineering: A**, [s.l.], v. 527, n. 4-5, p.1063-1067, fev. 2010. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.09.039>

CHAIPANICH, A.; RIANYOI, R.; NOCHAIYA, T. The effect of carbon nanotubes and silica fume on compressive strength and flexural strength of cement mortars. **Materials Today: Proceedings**. V, 4. Pg, 6065–6071. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.06.095>.

CHEN, M.; YANG, L.; ZHENG, Y.; HUANG, Y.; LI, L.; ZHAO, P.; WANG, S.; LU, L.; CHENG, X. Yield stress and thixotropy control of 3D-printed calcium sulfoaluminate cement composites with metakaolin related to structural build-up. **Construction and Building Materials**, v. 252, p. 1 – 10, 2020.

CHEUNG, J.; JEKNAVORIAN, A.; ROBERTS, L.; SILVA, D. Impact of admixtures on the hydration kinetics of Portland cement. *Cement and Concrete Research*. V, 41. Pg, 1289 – 1309. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.005>

CHOWDHURY S. C.; HAQUE B. Z.; OKABE T.; GILLESPIE J. W. Modeling the effect of statistical variations in length and diameter of randomly oriented *N*TCs on the properties of *N*TC reinforced nanocomposites. **Composites Part B: Engineering**. v. 43, p. 1756-1762, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.01.066>

CWIRZEN, A.; HABERMEHL-CWIRZEN, K.; PENTTALA, V. Surface decoration of carbon nanotubes and mechanical properties of cement/carbon nanotube composites. **Advanced Cement Research**. vol. 20, p. 65–73, 2008.

DAHLAN, A.S. Impact of nanotechnology on high performance cement and concrete. **Journal of Molecular Structure**. V. 1223. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2020.128896>

DANOGLIDIS, P. A.; KONSTA-GDOUTOS, M. S.; GDOUTOS, E. E.; SHAH, S. P. Strength energy absorption capability and self-sensing properties of multifunctional carbon nanotube reinforced mortars. **Construction and Building Materials**, v. 120, p. 265 – 274, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.049>

DE LARRARD, F.; FERRARIS, C.F.; SEDRAN, T. **Fresh concrete: a Herschel-Bulkley material**. Materials and Structures, Volume 31, 1998, pg 494-498.

DE LARRARD, F.; SEDRAN, T. Mixture-proportioning of high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**. Volume 32, Pages 1699–1704. 2002

DINIZ, J. Z.F.; FERNANDES, J.F.; KUPERMAN, S.C. RETRAÇÃO E FLUÊNCIA. In: ISAÍÁ, G. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. ed. São Paulo: Instituto Brasileiro de Concreto, 2011. p. 672–703.

ELKASHEF, M. WANG, K. ABOU-ZEID, M. N. Acid-treated carbon nanotubes and their effects on mortar strength. **Frontier Strucural Civil Engineering**, volume, 10, páginas, 180-188, 2016.

FAROOQ, F.; AKBAR, A.; KHUSHNOOD, R.A.; MUHAMMAD, W.L.B.; REHMAN, S.K.U.; JAVED, M.F. Experimental Investigation of Hybrid Carbon Nanotubes and Graphite Nanoplatelets on Rheology, Shrinkage, Mechanical, and Microstructure of SCCM. **Materials**, v. 13, p. 1-20, 2020.

FELIPE, A. DOS S. **Utilização de nanotubos de carbono e nano-sio<sub>2</sub> em argamassas produzidas com cinzas do lodo de esgoto em substituição parcial do cimento Portland**. Tese (Doutorado em Ciências dos Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciências dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2015.

FERRARIS, C.F; DE LARRARD, F. **Testing and modelling of fresh concrete rheology**. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, USA, 1998.

GIRARDI, R., DAL MOLIN, D.C., RECENA, F.A.P., “Portland Cement Concrete Deformation Modulus: Influence of Paste Volume”, **ACI Materials Journal**, v. 117, n.1, Jan. 2020.

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

GLEIZE, P. J. P. Nanociência e Nanotecnologia dos Materiais Cimentícios. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, v. 2, 2011. Cap. 51, p. 1871-1884.

HASSAN, A.; ELKADY, H.; SHAABAN, I.G. Effect of Adding Carbon Nanotubes on Corrosion Rates and Steel-Concrete Bond. *Scientific Reports*. V, 9. Pg, 1–12. 2019. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42761-2>.

HATFIELD, A.K. **Cement Statistics and Information**. Serviço Geológico dos Estados Unidos. 2021. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021-cement.pdf>. (Acesso em 09/11/2022).

HAWREEN, A.; BOGAS, J. A.; DIAS, A. P. S. On the mechanical and shrinkage behavior of cement mortars reinforced with carbon nanotubes. **Construction and Building Materials**. v. 168, p. 459-470, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.146> .

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

HAYSPARK, N. P. *et al.* DEFORMAÇÃO POR RETRAÇÃO E FLUÊNCIA. In: ISAÍÁ, G. C. (Ed.). **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. 1. ed. São Paulo: [s.n.]. p. 655–686. 2005.

HE, Y.; ZHANG, X.; SHUI, L.; WANG, Y.; GU, M.; WANG, X.; WANG, H.; PENG, L. Effects of PCEs with various carboxylic densities and functional groups on the fluidity and hydration performances of cement pastes. **Construction and Building Materials**, v. 202, p. 656 – 668, 2019.

Horgnies M.; Chen J.J.; Bouillon, C. **Overview about the use of Fourier transform infrared spectroscopy to study cementitious materials**. *Materials Characterisation VI: Computacional Methods and Experiments. WIT Transactions on Engineering Sciences*. 77: 251–262. 2013.

HU, C.; LARRARD, F. DE. The rheology of fresh high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**. V. 26, no 2, p. 283-294, 1996.

HU, J; WANG, K. Effect of coarse aggregate characteristics on concrete rheology. **Construction and Building Materials**. Volume 25, Issue 3, March 2011, Pages 1196–1204. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.035>

HU, Y.; SHENDEROVA, O. A.; HU, Z.; PADGETT, C. W.; BRENNER, D.W.. Carbon nanostructures for advanced composites. **Reports on Progress in Physics**, n. 69, p. 1847-1895, 2006.

HUANG, J.; RODRIGUE, D.; GUO, P. Flexural and compressive strengths of carbon nanotube reinforced cementitious composites as a function of curing time. *Construction and Building Materials*. V, 318. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125996>

IJIMA, S. Helical microtubules of graphitic carbon. **Nature**, [s.l.], v. 354, n. 6348, p.56-58, nov. 1991. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1038/354056a0>

ISAÍA, G. A. Água no concreto. In: ISAÍA, G. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 311–346.

ISFAHANI, F. T.; LI, W.; REDAELLI, E. Dispersion of multi-walled carbon nanotubes and its effects on the properties of cement composites. **Cement And Concrete Composites**, [s.l.], v. 74, p.154-163, nov. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.09.007>.

JAYAKUMARI, B.Y.; SWAMINATHAN, E.N.; PARTHEEBAN, P. A review on characteristics studies on carbon nanotubes-based cement concrete. **Construction and Building**. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130344>

JIANG, S.; SHAN, B.; OUYANG, J.; ZHANG, W.; YU, X.; LI, P.; HAN, B. Rheological

properties of cementitious composites with nano/fiber fillers. **Construction and Building Materials**, v. 158, p. 786 – 800, 2018.

JIAO, D.; SHI, C.; YUAN, Q. Influences of shear-mixing rate and fly ash on rheological behavior of cement pastes under continuous mixing. **Construction and Building Materials**, v. 188, p. 170-177, 2018.

KANG S. T.; SEO J. Y.; PARK S. H. The characteristics of *NTC*/Cement composites with acid-treated *MWNTCs*. **Advanced Materials Science Engineering**. V. 6, p. 1 -9, 2015.

KENDALL K.; HOWARD A.; BIRCHALL J. The relation between porosity, microstructure and strength, and the approach to advanced cement-based materials. **Philosophical transactions of the royal society A: mathematical, physical and engineering sciences**. v. 310, p. 139-153, 1983. <https://doi.org/10.1098/rsta.1983.0073> .

KLEE, H. The cement sustainability initiative. **Proceeding of Institution of Civil Engineers Engineering Sustainability**. Institute of Civil Engineers: London, UK, 2004.

KIM, S. W.; KIM, T.; KIM, Y. S.; CHOI, H. S.; LIM, H. J.; YANG, S. J.; PARK, C. P. Surface modifications for the effective dispersion of carbon nanotubes in solvents and polymers. **Carbon**. V. 50, n. 1, p. 3–33, 2012.

KOEHLER, E.P. **Aggregates in Self-consolidating concrete**. Dissertation for the degree of doctor of philosophy. The University of Texas at Austin. 2007.

KONG, F.; PAN, L.; WANG, C.; ZHANG, D.; XU N. Effects of polycarboxylate superplasticizers with different molecular structure on the hydration behavior of cement paste. **Construction and Building Materials**, v. 105, p. 545-553, 2016.

KONSTA-GDOUTOS, M. S.; METAXA, Z. S.; SHAH, S. P. Multi-scale mechanical and fracture characteristics and early-age strain capacity of high-performance carbon nanotube/cement nanocomposites. **Cement & Concrete Composites**, volume 32, p. 110 -115. 2010. Doi: [10.1016/j.cemconcomp.2009.10.007](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.10.007)

KONSTA-GDOUTOS, M. S.; BATIS, G.; DANOGLIDIS, P. A.; ZACHAROPOULOU, A. K.; ZACHAROPOULOU, E. K.; FALARA, M. G.; SHAH, S. P. Effect of CNT and CNF loading and

count on the corrosion resistance, conductivity, and mechanical properties of nanomodified OPC mortars. **Construction and Building Materials**, v. 147, p. 48-57, 2017b.

KUMAR, S.; KOLAY, P.; MALLA, S.; MISHRA, S. Effect of Multiwalled Carbon Nanotubes on Mechanical Strength of Cement Paste. *Journal Of Materials In Civil Engineering*, [s.l.], v. 24, n. 1, p.84-91, jan. 2012. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0000350](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000350).

LAZNIIEWSKA-LIEKARCZYK, B. **Influence of temperature on the properties of non-air-entrained cement mortars modified with diferente plasticisers and superplasticisers types**. MATEC, Web conferences, 163. 2018

Lecompte, T.; Perrot, A.; Picandet, V.; Bellegou, H.; Amziane, S. Cement-based mixes: Shearing properties and pore pressure. **Cemente and Concrete Research**. V, 42. Pg, 139–147. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.09.007>.

LEE, C. Y. Super-sensitive and small: New MIT detector uses nanotubes to sense deadly gases. MITnews. 2008. Disponível em: <http://web.mit.eduQnewsoffice/2008/nanotube-0505.html> Acesso em:18/06/2019.

LEE, S.S.; BALASUBRAMANIAN, B.; GOPALAKRISHNA, G.V.T.; KWON, S.; KARTHICK, S.P.; SARASWATHY, V. Durability performance of cnt and nanosilica admixed cement mortar. **Construction and Building Materials**. V, 159. Pg, 463-472. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.003>

LI GY, WANG PM, ZHAO X. Mechanical behavior and microstructure of cement composites incorporating surface-treated multi-walled carbon nanotubes. **Carbon**, volume 43, p.1239–1245, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2004.12.017> .

LI, H.; LI, Y.; JIN, C. The energy dissipation property of mwcnts/cement cement paste composites. **Construction and Building Materials**. V. 327. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126953>

LI, Q.; LIU, J.; XU, S. Progress in Research on Carbon Nanotubes Reinforced Cementitious Composites. **Advances In Materials Science And Engineering**, [s.l.], v. 2015, p.1-16, 2015. Hindawi Limited. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/307435>.

LI, W.; JI, W.; WANG, Y.; LIU, Y.; SHEN, R.; XING, F. Investigation on the mechanical properties of a cement-based material containing carbon nanotube under drying and freeze-thaw conditions, **Materials** 8. (2015). <https://doi.org/10.3390/ma8125491>

LICHT, S. Co-production of cement and carbon nanotubes with a carbon negative footprint. **Journal of CO<sub>2</sub> Utilization**. V. 18, p. 378-389. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcou.2017.02.011>

LIEW, K. M.; KAI, M. F.; ZHANG, L. W. Carbon nanotube reinforced cementitious composites: An overview. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [s.l.], v. 91, p.301-323, dez. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.10.020>.

LUDVIG, P.; CALIXTO, J.M.F.; LADEIRA, L.O.; SOUZA, T.C.C.; PAULA, J.N. Analysis of Cementitious Composites Prepared with Carbon Nanotubes and Nanofibers Synthesized Directly on Clinker and Silica Fume. **Journal of Materials Civil Engineering**. 29 (2017) 06017001. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001836](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001836).

LOPES, J.P.; FERRARI, V.J.; CAMÕES, A.; SOUZA, A.; FANGUEIRO, R. Influence of carbon nanotubes on the performance of concrete and fiber reinforced concrete (FRC). **Matéria**. V, 27. 2022. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620220002.1397>

LUDVIG P.; LADEIRA L.; CALIXTO J.; GASPAR I.; MELO V. **In-situ synthesis of multiwall carbon nanotubes on portland cement clinker**. In: 11th International conference on advanced materials, Rio de Janeiro, Brazil. September 20–25, 2009.

LUSHNIKOVA, A.; ZAOUI, A. Influence of single-walled carbon nanotubes structure and density on the ductility of cement paste. **Construction and Building Materials**. V. 172. Pg, 86-97. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.244>

MA, P. C.; SIDDIQUI, N. A.; MAROM, G.; KIM, J.K. Dispersion and functionalization of carbon nanotubes for polymer-based nanocomposites: A review. **Composites: Part A**, v. 41, p. 1345-1367, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.07.003>

MA, S.; QIAN, Y.; KAWASHIMA, S. Performance-based study on the rheological and hardened properties of blended cement mortars incorporating playgorskite clays and carbon nanotubes. **Construction and Building Materials**. V. 171, p. 663-671, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.121>.

MACLEOD, A.J.N.; COLLINS, F.G.; DUAN, W. Effects of carbon nanotubes on the early age hydration kinetics of Portland cement using isothermal calorimetry. **Cement and Concrete Composites**, v.119, p. 1 – 11, 2021.

MAKAR, J.; MARGESON, J.; LUH, J. **Carbon nanotube / cement composites – early results and potential applications**. In: International Conference on Construction Materials: Performance, Innovations and Structural Implications, n. 3., 2005, Vancouver. Anais... Vancouver: ConMAT, 2005. Disponível em: <http://www.irc.nrc-cnrc.gc.ca/ircpubs>. Acesso em: 27/03/2015.

MARKAR J. M.; CHAN, G. W. Growth of cement hydration products on single-walled carbon nanotubes, **Journal of the American Ceramic Society**. V. 92, p. 1303– 1310, 2009.

MUDASIR, O.; NAQASH, J.A. The effect of water cement ratio on the characteristics of multi-walled carbon nanotube reinforced concrete. *Materials today: Proceedings*. Part 6. Pg, 3852-3855. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.1176>

MANZUR, T.; YAZDANI, N. Optimum mix ratio for carbon nanotubes in cement mortar. **Ksce Journal Of Civil Engineering**, [s.l.], v. 19, n. 5, p.1405-1412, 19 dez. 2014. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s12205-014-0721-x>.

MANZUR, T.; YAZDANI, N.; EMON, A.B. Potential of Carbon Nanotube Reinforced Cement Composites as Concrete Repair Material. *Journal of Nanomaterials*. V, 10. 2016. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1155/2016/1421959>.

MARCONDES, C.G.N., **Adição de nanotubos de carbono em concretos de cimento Portland – absorção, permeabilidade, penetração de cloretos e propriedades mecânicas**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil da Universidade federal do Paraná, Curitiba, 2012.

MATARREDONA, O.; RHOADS, H.; LI, Z.; HARWELL, J.H.; BALZANO, L.; RESASCO, D.E. Dispersion of single-walled carbon nanotubes in aqueous solutions of the anionic surfactant NaDDBS. **The Journal of Physical Chemistry B**. 107 (2003) 13357–13367. <https://doi.org/10.1021/jp0365099>.

MATOS, P. R. **Estudo do uso de resíduo do polimento de porcelanato em concreto autoadensável**. Tese (Doutorado em engenharia civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC – Brasil. 2019.

MATOS, P.R.; ANDRADE NETO, J.S.; CAMPOS, C.E.M. Is the R index accurate to assess the preferred orientation of portlandite in cement pastes? **Construction and Building Materials**, v. 292, p. 1 – 7. 2021b.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: Ibracon, 2014.

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

MENDOZA-REALES, O. A.; SIERRA-GALLEGO, G.; TOBÓN, J. I. The mechanical properties of Portland cement mortars blended with carbon nanotubes and nanosilica: A study by experimental design. **DYNA**, v. 83, p. 136 – 141, 2016.

MENGA, W. KHAYAT, H. Effect of graphite nanoplatelets and carbon nanofibers on rheology, hydration, shrinkage, mechanical properties and microstructure of UHPC. **Cement and Concrete Research**, volume 105, p. 64-71. 2018. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.01.001>

MENDOZA, O.; SIERRA, G.; TOBÓN, J. I. Influence of super plasticizer and Ca(OH)<sub>2</sub> on the stability of functionalized multi-walled carbon nanotubes dispersions for cement composites applications. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 771 – 778, 2013.

MEYER, C. The greening of the concrete industry. **Cement Concrete Composites**. Volume 31, páginas 601–605, 2009.

MORSY, M. S.; ALSAYED, S. H.; AQEL, M. Hybrid effect of carbon nanotube and nanoclay on physico-mechanical properties of cement mortar. **Construction and Building Materials**. V. 25, p. 145–149, 2011.

MOSSALAM, S.J.; BEHBAHANI, H. P.; SHAHPARI, M.; ABAEIAN, R. The effect of carbon nanotubes on mechanical properties of structural lightweight concrete using LECA aggregates. **Structures**. V, 35. Pg, 1204 – 1218. 2022.

MUSSO S.; TULLIANI J.; FERRO G.; TAGLIAFERRO A. Influence of carbon nanotubes structure on the mechanical behavior of cement composites, **Composites Science Technology**. v. 69,1985–1990, 2009.

NADIV, R.; SHTEIN, M.; REFAELI, M.; PELED, A.; REGEV, O. The critical role of nanotubes shape in cement composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 71, p. 166 – 174, 2016.

NASIBULIN, A.G.; SHANDAKOV, S.D.; NASIBULINA, L.I.; CWIRZEN, A.; MUDIMELA, P.R.; HABER-MEHL-SWIRZEN, K.; GRISHIN, D.A.; GAVRILOV, .V.; MALM, J.E.M; TAPPER, U.; TIAN, Y.; PENTALA, V.; KARPPINEN, M.J.; KAUPPINEN, E.I., **A novel cement-based hybrid material**. New Journal of Physics 11. 2009. Doi:10.1088/1367-2630/11/2/023013

NASIBULINA, L.I.; ANOSHKIN, I.V.; NASIBULIN, A.G.; CWIRZEN, A.; PENTTALA, V.; KAUPPINEN, E.I. Effect of Carbon Nanotube Aqueous Dispersion Quality on Mechanical Properties of Cement Composite. **Journal of Nanomaterials**, v. 2012, p. 1 – 6, 2012.

NEHDI, M.; RAHMAN, M. A. Effect of geometry and surface friction of test accessory on oscillatory rheological properties of cement pastes. **ACI Materials Journal**. v. 101, p. 416–424, 2004.

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

NOCHAIYA, T.; CHAIPANICH, A. Behavior of multi-walled carbon nanotubes on the porosity and microstructure of cement-based materials. **Applied Surface Science**. V. 257, p. 1941-1945, 2011.

PARVEEN S.; RANA S.; FANGUEIRO R.; PAIVA M. C. Microstructure and mechanical properties of carbon nanotube reinforced cementitious composites developed using a novel dispersion technique. **Cement and Concrete Research**. V. 73, p. 215–27, 2015.

PILEGGI, R.G.; PAIVA, A.E.; GALLO, J.; PANDOLFELLI, V.C. A novel rheometer for refractory castables. **American Ceramic Society Bulletin**, v. 79, n. 1, p. 54-58, 2000.

QISSAB, M. A.; ABBAS, S. T. Effect of multi-walled carbon nanotubes on mechanical properties of concrete. **Al-Nahrain University, College of Engineering Journal (NUCEJ)**, v. 19, n. 2, p. 194-201, 2016.

RAKI, L.; BEAUDOIM, J.; ALIZADEH, R.; MAKAR, J. **Cement and concrete nanoscience and nanotechnology**, National Research Council Canada, 918-942, 2010.

RAMACHANDRAN, V.S. **Concrete admixtures handbook**. Properties, Science and Technology, 2nd ed., Cambridge University Press, 1996.

RASHAD A. M. Effect of carbon nanotubes (NTCs) on the properties of traditional cementitious materials. **Construction Building Materials**. v. 153, p. 81-101, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.089> .

REALES, O.; TOLEDO FILHO, R. Nanotube–Cement Composites. **Carbon Nanomaterials Sourcebook**, [s.l.], p.579-602, 7 abr. 2016. CRC Press. <http://dx.doi.org/10.1201/b19568-32>.

REALES, O. A. M.; DUDA, P.; TOLEDO FILHO, R. Dias. Effect of a Carbon Nanotube/Surfactant Aqueous Dispersion on the Rheological and Mechanical Properties of Portland Cement Pastes. **Journal Of Materials In Civil Engineering**, [s.l.], v. 30, n. 10, p.1-8, out. 2018. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002452](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002452).

Ren, J.; Lau, J.; Lefler, M.; Licht, S. The minimum electrolytic energy needed to convert carbon dioxide by electrolysis in carbonate melts. **Journal Physical Chemistry**. (2015). <http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acs.jpcc.5b07026>.

REPETTE, W. L. Concreto para fins especiais. In: ISAÍÁ, G. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 1807–1842.

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

REN, J.; LAU, J.; LEFLER, M.; LICHT, S. The Minimum Electrolytic Energy Needed To Convert Carbon Dioxide to Carbon by Electrolysis in Carbonate Melts. *The Journal of Physical Chemistry*. 2015. DOI: 10.1021/acs.jpcc.5b07026

RIXOM, M.R. MAILVAGANAM, N.P. **Chemical admixtures for concrete**. Edition published in the Taylor & Francis e-Library, 2002.

ROMANO, R.C.O.; CARDOSO, F.A.; PILEGGI, R.G. **Propriedades do concreto no estado fresco**. In: *Concreto: Ciência e Tecnologia*. Editor Geraldo C. Isaia. Volume I, Pg 453-500. IBRACON. 2011.

ROUSSEL, N.; OVARLEZ, G.; GARRAULT, S.; BRUMAUD, C. The origins of thixotropy of fresh cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 43, n. 1, p. 148-157, 2012.

SALAS, D.A.; RAMIREZ, A.D.; RODRÍGUEZ, C.R.; PETROCHE, D.M.; BOERO, A.B.; DUQUE-RIVERA, J. Environmental impacts, life cycle assessment and potential measures for cement production: a literature review. **Journal of Cleaner Production**. V, 113. Pg, 114-122. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.078>

SARVANDANI, M.M.; MAHDIKHANI, M.; AGHABARATI, H.; FATMEHSARI, M.H. Effect of functionalized, multi-walled carbon nanotubes on mechanical properties and durability of cement mortars. **Journal of Building Engineering**. V, 41. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102407>

SCHWARTZENTRUBER, L.D; LE ROY, A; CORDIN, J. Rheological behaviour of fresh cement pastes formulated from a Self Compacting Concrete (SCC). **Cement and Concrete Research**, Volume 36, Pages 1203–1213. 2004.

SCRIVENER, K. L.; JUILLAND, P.; MONTEIRO, P. J. M. Advances in understanding hydration of Portland cement. **Cement and Concrete Research**. Keynote papers from 14th International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC 2015). v. 78, Part A, p. 38–56, dezembro 2015.

SCRIVENER, K.; SNELLINGS, R.; LOTHENBACH, B. **A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials**. Taylor & Francis Group, 2016.

SIKORA, P.; ELRAHMAN, M. A.; CHUNG, S.; CENDROWSKI, K.; MIJOWSKA, E.; STEPHAN, D. Mechanical and microstructural properties of cement pastes containing carbon nanotubes and carbon nanotube-silica core-shell structures, exposed to elevated temperature. **Cement and Concrete Composites**, v. 95, p. 193 – 204, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.11.006>

SILVA, J. M. da. **Análise temporal da dispersão de nanotubos de carbono para aplicação em pastas de cimento Portland**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil). – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC – Brasil. 2019.

SILVESTRO, L. **Incorporação de nanotubos de carbono funcionalizados com silano em pastas de cimento Portland**. Tese (Doutorado em engenharia civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC – Brasil. 2022.

SILVESTRO, L.; GLEIZE, P. J. Effect of carbon nanotubes on compressive, flexural and tensile strengths of Portland cement-based materials: A systematic literature review. **Construction and Building Materials**. Vol, 264. 2020.

SINGH A.P.; GUPTA B. K.; MISHRA M.; CHANDRA A.; MATHUR R.; DHAWAN S. Multiwalled carbon nanotube/cement composites with exceptional electromagnetic interference shielding properties. **Carbon**. V.56, p. 86-96, 2013.

SNELLINGS, R.; CHWAST, J.; CIZER, O.; DE BELIE, N.; DHANDAPANI, Y.; DURDZINSKI, P.; ELSÉN, J.; HAUFE, J.; HOOTON, D.; PATAPY, C.; SANTHANAM, M.; SCRIVENER, K.; SNOECK, D.; STEGER, L.; TONGBO, S.; VOLLPRACHT A.; WINNEFELD, F.; LOTHENBACH, B. Report of TC 238-SCM: hydration stoppage methods for phase assemblage studies of blended cements—results of a round robin test. **Materials and Structures**, v. 51, n. 4, 2018. [https://doi.org/10.1617/s11527-018-1237-5\(0123456789\(\)\).-volIV\)\(0123456789\(\)\).-volIV](https://doi.org/10.1617/s11527-018-1237-5(0123456789()).-volIV)(0123456789()).-volIV)

SOBOLKINA, A.; MECHTECHERINE, V.; KHAVRUS, V.; MAIER, D.; MENDE, M.; RITSCHEL, M.; LEONHARDT, A. Dispersion of carbon nanotubes and its influence on the mechanical properties of the cement matrix. **Cement And Concrete Composites**, [s.l.], v. 34, n. 10, p.1104-1113, nov. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.07.008>.

SOBOLKINA, A.; MECHTCHERINE, V.; KHAVRUS, V.; MAIER, D.; MENDE, M.; RITSCHHEL, M.; LEONHARDT, A. Dispersion of carbon nanotubes and its influence on the mechanical properties of the cement matrix, **Cement Concrete Composites**. Volume 34, páginas 1104–1113, 2012.

SONG, W.; YI, J.; WU, H.; HE, X.; SONG, Q.; YIN, J. Effect of carbon fiber on mechanical properties and dimensional stability of concrete incorporated with granulated-blast furnace slag. *Journal of Cleaner Production*. V. 238, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117819>.

SOUZA, D. J.; YAMASHITA, L.Y.; DRANKA, F.; MEDEIROS, M.H.; MEDEIROS-JUNIOR, R.A. Repair Mortars Incorporating Multiwalled Carbon Nanotubes: Shrinkage and Sodium Sulfate Attack. **Journal of Materials in Civil Engineering**. V. 29, 2017. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002105](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002105) .

SOUZA, T. C.; PINTO, G.; CRUZ, V.S.; MOURA, M.; LADEIRA, L.O.; CALIXTO, J.M. Evaluation of the rheological behavior, hydration process, and mechanical strength of Portland cement pastes produced with carbon nanotubes synthesized directly on clinker. *Construction and Building Materials*. V, 248. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118686>

STRUBLE, L.; SZECSY, R.; LEI, W.G.; SUN, G.K. Rheology of Cement Paste and Concrete. **Cement Concrete Aggregates**. V. 20. Pg, 269–277.1998. <https://doi.org/10.1520/cca10421j>.

SZELAG, M. Mechano-Physical properties and microstructure of carbon nanotube reinforced cement paste after thermal load. **Journal nanomaterials**. Setembro, 2017. doi:10.3390/nano7090267

TAFESSE, M.; KIM, H. The role of carbon nanotube on hydration kinetics and shrinkage of cement composite. **Composites Part B**, v. 169, p. 55 – 64, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.04.004>

TAMIMI, A.; HASSAN, N. M.; FATTAH, K.; TALACHI, A. Performance of cementitious materials produced by incorporating surface treated multiwall carbon nanotubes and silica fume. **Construction and Building Materials**. V. 114, p. 934–945, 2016.

THOMAZ, E.C.S. **Notas de disciplina “materiais de construção civil – tempos de pega”**. Instituto Militar de Engenharia - IME, Rio de Janeiro, p. 6. 2008.

VARDHAN, K.; SIDDIQUE, R.; GOYAL, S. Influence of marble waste as partial replacement of fine aggregates on strength and drying shrinkage of concrete. **Construction and Building Materials**. V. 228, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116730>

VASCONCELLOS, A. T. **Estudo da variabilidade do módulo de elasticidade de concretos produzidos com diferentes tipos de agregados graúdos**. Dissertação (Mestrado em engenharia civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC – Brasil. 2018.

VICH, M.; FLÁDR, J.; BROUKALOVÁ, I. Influence of concrete additives on cement paste shrinkage. **Materials Science and Engineering**. V. 596, 2019. doi:10.1088/1757-899X/596/1/012042

WALLEVIK, O. H. et al. Avoiding inaccurate interpretations of rheological measurements for cement-based materials. **Cement and Concrete Research**. V. 78, p. 100–109, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.05.003>

WANG, H. Dispersing carbon nanotubes using surfactants. **Current Opinion in Colloid and Interface Science**. V, 14. Pg, 364–371. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2009.06.004>.

WANG, Z.; YU, J.; LI, G.; ZHANG, M.; LEUNG, C. Corrosion behavior of steel rebar embedded in hybrid CNTs-OH/polyvinyl alcohol modified concrete under accelerated chloride attack. **Cement and Concrete Composites**, v. 100, p. 120 – 129, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.02.013>

WATANABE, K.; ISHIKAWA, M.; WAKAMATSU M. - “Rheology of castable refractories”. Taikabutsu Overseas, v. 9, n. 1, p. 41-53, 1989.

WEIDMANN, D. F. **Contribuição ao estudo da influência da forma e da composição granulométrica de agregados miúdos de britagem nas propriedades do concreto de cimento Portland**. Dissertação (Mestrado em engenharia civil). Programa de Pós-Graduação

em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC – Brasil. 2008.

WU, H.; LI, Z.; JI, D.; LIU, Y.; LI, L.; YUAN, D.; ZHANG, Z.; REN, J.; LEFLER, M.; WANG, B.; LICHT, S. One-pot synthesis of nanostructured carbon materials from carbon dioxide via electrolysis in molten carbonate salts. **Carbon**. Volume, 106, páginas, 208-217. 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbon.2016.05.031>

XU, S.; LIU, J.; LI, Q. Mechanical properties and microstructure of multi-walled carbon nanotube-reinforced cement paste. **Construction Building Materials**. Volume 76, páginas 16–23, 2015.

YOUSEFI, A.; BUNNORI, N. M.; KHAVARIAN, M.; HASSANSHAHI, O; MAJID, T. A. Experimental investigation on effect of multi-walled carbon nanotubes concentration on flexural properties and microstructure of cement mortar composite. **Aip Conference Proceedings**, [s.l.], p.321-326, 2017. Author(s). <http://dx.doi.org/10.1063/1.5005663>.

YU M-F.; LOURIE O.; DYER M. J.; MOLONI K.; KELLY T. F.; RUOFF R. S. Strength and breaking mechanism of multiwalled carbon nanotubes under tensile load. **Science**. V. 287, p. 637-640, 2000. <http://dx.doi.org/10.1126/science.287.5453.637> .

YUREKLI, K.; MITCHELL, C.A.; KRISHNAMOORTI, R. Small-angle neutron scattering from surfactant-assisted aqueous dispersions of carbon nanotubes. **Journal American Chemistry Society**. V. 126. Pg, 9902–9903. 2004. <https://doi.org/10.1021/ja047451u>.

ZARBIN, A. J. G. Química de nano materiais. **Quim. Nova**, São Paulo, v. 30, n.6, p. 1469-1479, 2007.

ZING, A.; WINNEFELD, F.; HOLZER, L.; PAKUSCH, J.; BECKER, S.; FIGI, R.; GAUCKLER, L. Interaction of polycarboxylate-based superplasticizers with cements containing different C3A amounts. **Cement and Concrete Composites**. 31(3), p. 153-162. 2009.

ZHOU, C.; LI, F.; HU, J.; REN, M.; WEI, J.; YU, Q. Enhanced mechanical properties of cement paste by hybrid graphene oxide/carbon nanotubes. **Construction and Building Materials**, v. 134, p. 336 – 345, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.147>

ZOU, B.; CHEN, S. J.; KORAYEM, A. H.; COLLINS, F.; WANG, C. M.; DUAN, W. H. Effect of ultrasonication energy on engineering properties of carbon nanotube reinforced cement pastes. **Carbon** , volume 85, páginas 212 -220, 2015.