

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**DIOVANA PATIAS DELLA FLORA**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE ARGAMASSAS MODIFICADAS COM  
ADIÇÃO DE NANOTUBOS DE CARBONO**

**Alegrete**

**2019**

**DIOVANA PATIAS DELLA FLORA**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE ARGAMASSAS MODIFICADAS  
COM ADIÇÃO DE NANOTUBOS DE CARBONO**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia Civil  
da Universidade Federal do Pampa, como  
requisito parcial para obtenção do Título de  
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Dra. Simone Dornelles  
Venquiaruto

Coorientador: Me. Aldo Leonel Temp

**Alegrete**

**2019**

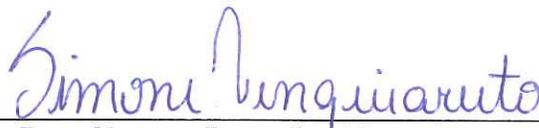
DIOVANA PATIAS DELLA FLORA

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE ARGAMASSAS  
MODIFICADAS COM ADIÇÃO DE NANOTUBOS DE CARBONO**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de  
Engenharia Civil da Universidade  
Federal do Pampa, como requisito  
parcial para obtenção do Título de  
Bacharel em Engenharia Civil.

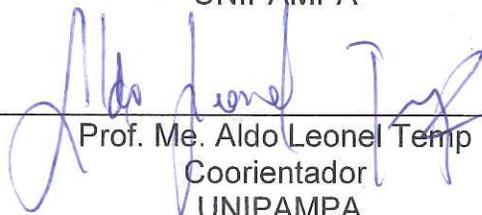
Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 26 de Junho de  
2019

Banca examinadora:



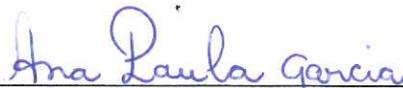
---

Prof<sup>a</sup>. Dra. Simone Dornelles Venquiaruto  
Orientadora  
UNIPAMPA



---

Prof. Me. Aldo Leonel Temp  
Coorientador  
UNIPAMPA



---

Prof<sup>a</sup>. Dra. Ana Paula Garcia  
UNIPAMPA



---

Prof<sup>a</sup>. Me. Fernanda Bianchi Pereira da Costa  
UNIPAMPA

## AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente à Deus pela vida, saúde e a força dada a mim para superar todas as dificuldades e estar comigo em todas as conquistas.

Aos meus pais e meu irmão por todo amor, carinho, atenção, apoio incondicional e principalmente por serem meu suporte. Obrigada pois o esforço de vocês foi fundamental para que meu sonho se tornasse realidade.

Agradeço aos meus avós Valter (*in memoriam*) e Marilene pelas orações e pela preocupação, pelo apoio e incentivo durante essa caminhada.

À Bruna, minha prima e companheira durante todos esses anos em Alegrete, com certeza foi um período de muito aprendizado, obrigada pela troca de experiência que tivemos.

Um agradecimento especial às minhas queridas amigas e engenheiras Débora Bottura e Raquel Zydeck, companheiras de estudos, de conversas, por todo o apoio e incentivo, obrigada por serem e estarem presentes em minha vida

Agradeço todos os meus amigos de Alegrete, cada um sabe o quanto é importante na minha vida, obrigada por todos os momentos compartilhados.

Aos professores, eu agradeço por todos os ensinamentos, pela paciência e incentivo ao longo da minha caminhada. Agradecimento especial à minha orientadora Professora Dra. Simone Dornelles Venquiaruto, por sempre acreditar no meu potencial, pelo exemplo de pessoa e profissional. Agradeço também a oportunidade de trabalharmos juntas, por ter despertado em mim o interesse pela pesquisa e por todo o suporte durante a minha jornada na Unipampa. Sou muito grata pela confiança, orientação e paciência dedicada a mim.

Ao meu Coorientador Professor Me. Aldo Leonel Temp pela orientação, dedicação e disponibilidade para a realização deste trabalho.

Agradeço ao Engenheiro Marcelo Dias e aos técnicos Raquel Machado e Dieison Fantineli por todo o suporte, disponibilidade e conhecimento transmitido durante a realização dos ensaios.

Agradeço as colegas e amigas Cibele Scherer e Maria Eduarda Dacheri pela troca de conhecimento e o auxílio nos ensaios de laboratório.

“A humildade exprime uma das raras certezas de que estou certo: a de que ninguém é superior a ninguém”.

Paulo Freire

## RESUMO

A nanotecnologia é considerada atualmente como um dos ramos mais promissores no campo científico. Os nanotubos de carbono (NTCs), por apresentar grande capacidade de resistência à tração, pode se tornar um importante componente na fabricação de concretos e argamassas que requeiram bom desempenho na referida propriedade. A aplicação deste material na indústria da construção civil é promissora e apresenta grandes perspectivas de crescimento devido aos benefícios que este material pode proporcionar em matrizes cimentícias. Assim, este estudo tem como objetivo avaliar os efeitos da incorporação de NTCs nas propriedades físicas e mecânicas de matrizes de cimento Portland. Os NTCs foram adicionados às argamassas em forma de dispersão, nos teores de 0,20%, 0,30% e 0,40%, em relação à massa de cimento. Para as argamassas no estado fresco, foram determinados o índice de consistência, densidade de massa, teor de ar incorporado e retenção de água. A avaliação das propriedades no estado endurecido foram todas ensaiadas sob a argamassa aplicada a um substrato padrão, os ensaios realizados foram: absorção pelo método do cachimbo e resistência potencial à tração. As argamassas com 0,20% e 0,30% de NTCs, quando comparadas com a argamassa de referência, apresentaram melhorias em todas as propriedades analisadas no presente estudo. Mesmo com as melhorias constatadas, existem alguns desafios a serem enfrentados para a utilização dos NTCs em larga escala nas matrizes cimentícias, tais como alto custos do material e a dificuldade em se garantir uma dispersão eficiente na mistura.

**Palavras-chave:** Nanotecnologia, nanotubo de carbono, argamassas, adesão.

## ABSTRACT

The nanotechnology is considered at present as one of the most promising branches in the scientific field. Because of presenting great resistance capacity to the traction, an important component one can make the nanotubos of carbon (NTCs) into the manufacture of concrete ones and mortars that apply for good performance in the above-mentioned property. The application of this material in the industry of the civil construction is promising and she presents great growth perspectives due to the benefits that this material can provide in wombs cimentícias. So, this study has as objective values the effects of the incorporation of NTCs at the physical and mechanical properties of wombs from cement Portland. The NTCs were added to the mortars in the form of dispersal, in the tenors of 0,20 %, 0,30 % and 0,40 %, regarding the cement mass. For the mortars in the fresh state, there were determined the rate of consistency, density of mass, tenor of incorporated air and water retention. The evaluation of the properties in the hardened state there were they all rehearsed under the mortar devoted to a substrate a standard, the fulfilled tests were: absorption for the method of the pipe and potential resistance to the traction. The mortars with 0,20 % and 0,30 % of NTCs, when compared with the reference mortar, they presented improvements in all the properties analysed in the present study. With the noted improvements, some challenges are even being faced for the use of the NTCs in wide scale in the wombs cimentícias, such as highly costs of the material and the difficulty in an efficient dispersal is guaranteed in the mixture.

**Keywords:** Nanotechnology, carbon nanotube, mortars; adhesiveness

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fatores que influenciam na aderência do revestimento argamassado ....	23
Figura 2 – Vista da superfície por meio de lupa estereoscópica com aumento de 50 vezes: a) bloco cerâmico e b) bloco de concreto .....	24
Figura 3 – Representação esquemática da estrutura de nanotubos de carbono, (a) nanotubo de parede simples e (b) nanotubo de parede múltipla.....	27
Figura 4 – Esquema do programa experimental .....	36
Figura 5 – Substrato padrão.....	41
Figura 6 – Nanotubos de carbono (NTCs) (a) aspecto físico e (b) imagem de MEV..	41
Figura 7 – Etapas de produção da argamassa referência.....	43
Figura 8 – Etapas de execução da dispersão dos NTCs .....	44
Figura 9 - Aplicação da argamassa sobre o substrato padrão .....	46
Figura 10 – Etapas de realização do ensaio de índice de consistência .....	47
Figura 11 – Etapas de execução do ensaio de retenção de água.....	50
Figura 12 – Execução ensaio de absorção pelo Método do Cachimbo.....	52
Figura 13 – Etapas de execução do ensaio de arrancamento .....	54
Figura 14 – Microscópio eletrônico de varredura .....	55
Figura 15 – Tipos de ruptura (a) no substrato e (b) na interface argamassa-cola.....	63
Figura 16 – Formas de ruptura (a) na argamassa e (b) na interface argamassa-substrato.....	63
Figura 17 - Imagem MEV com (a) ampliação de 15.000 vezes e (b) ampliação de 20.000 vezes – Argamassa com 0,20% NTC.....	71
Figura 18 - Imagem MEV com (a) ampliação de 15.000 vezes e (b) ampliação de 20.000 vezes - Argamassa com 0,30% NTC.....	71
Figura 19 - Imagem MEV com (a) ampliação de 15.000 vezes e (b) ampliação de 20.000 vezes - Argamassa com 0,40% NTC.....	72

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Caracterização dos nanotubos de carbono utilizados em estudos de matrizes cimentícias.....	28
Tabela 2 - Composição do Cimento CP V-ARI.....	37
Tabela 3 - Caracterização do Agregado Miúdo.....	38
Tabela 4 - Especificações técnicas do aditivo.....	40
Tabela 5 - Propriedades dos nanotubos de carbono.....	42
Tabela 6 - Traço em massa para a argamassa de dosagem 1:3 em massa.....	43
Tabela 7 - Densidade de massa e teor de ar incorporado .....	57
Tabela 8 - Retenção de água das argamassas.....	59
Tabela 9 - Resultados do ensaio de resistência à tração do revestimento - Traço referência .....	64
Tabela 10 - Resultados do ensaio de resistência à tração do revestimento - Traço 0,20% NTC.....	66
Tabela 11 - Resultados do ensaio de resistência à tração do revestimento - Traço 0,30% NTC.....	67
Tabela 12 - Resultados do ensaio de resistência à tração do revestimento - Traço 0,40% NTC.....	69

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Funções das argamassas e seus respectivos tipos. ....	18
Quadro 2 - Diferentes alternativas de revestimentos de paredes.....	19
Quadro 3. Propriedades relacionadas czzom a trabalhabilidade das argamassas. ..	21
Quadro 5 - Tipologia de ruptura .....	62

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;  
AR – Argamassa traço referência;  
NA20 – Argamassa com 0,20% de adição de NTC;  
AN30 – Argamassa com 0,30% de adição de NTC;  
AN40 – Argamassa com 0,40% de adição de NTC;  
CORSAN – Companhia Riograndense de Saneamento;  
CP V-ARI – Cimento Portland de Alta Resistência;  
CVD – Chemical Vapor Deposition;  
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas;  
LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil  
MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura;  
NBR – Norma brasileira;  
NS – Nanosílica;  
NTC – Nanotubo de Carbono;  
NTCPM – Nanotubo de Carbono de Paredes Múltiplas;  
NTCPS – Nanotubo de Carbono de Parede Simples;  
UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais;  
UFPR – Universidade Federal do Paraná;  
UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina;  
USP – Universidade de São Paulo.

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTO</b> .....	<b>3</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>5</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1 Considerações iniciais .....	14
1.2 Justificativa .....	15
1.3 Objetivos .....	16
1.3.1 Objetivo geral .....	16
1.3.2 Objetivos específicos .....	16
1.4 Estrutura do trabalho.....	16
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>17</b>
2.1 Argamassas .....	17
2.2 Propriedades das argamassas de revestimento .....	20
2.2.1 Trabalhabilidade.....	20
2.2.2 Aderência.....	22
2.2.3 Resistência mecânica .....	25
2.3 Nanociência e nanotecnologia .....	25
2.3.1 Nanotubos de carbono (NTCs) .....	26
2.3.1.1 Características dos NTCs.....	26
2.3.1.2 Métodos de síntese de nanotubos de carbono .....	28
2.3.2 Propriedades de matrizes cimentícias com incorporação de NTCs.....	30
2.4 Dispersão de nanotubos em matrizes cimentícias .....	31
2.5 Estudos de matrizes cimentícias com adição de nano tubos de carbono .....	32
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>36</b>
3.1 Materiais.....	37
3.1.1 Cimento Portland .....	37
3.1.2 Areia .....	38

3.1.3 Aditivo .....	39
3.1.4 Água .....	40
3.1.5 Substrato padrão .....	40
3.1.6 Nanotubos de carbono (NTC) .....	41
3.2 Procedimento de dosagem e mistura das argamassas .....	42
3.2.1 Mistura da argamassa de referência .....	43
3.2.2 Mistura da argamassa com nanotubos de carbono (NTCs).....	44
3.2.3 Moldagem e cura dos corpos de prova.....	45
3.3 Caracterização das argamassas no estado fresco .....	46
3.3.1 Ensaio do índice de consistência .....	46
3.3.2 Ensaio de densidade de massa e teor de ar incorporado .....	48
3.3.3 Ensaio de retenção de água .....	49
3.4 Caracterização das argamassas no estado endurecido .....	51
3.4.1 Absorção de água pelo Método do Cachimbo.....	51
3.4.2 Resistência potencial de aderência à tração .....	52
3.4.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) .....	54
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>56</b>
4.1 Caracterização das argamassas no estado fresco .....	56
4.1.1 Índice de consistência .....	56
4.1.2 Densidade de massa e teor de ar incorporado.....	57
4.1.3 Retenção de água .....	58
4.2 Caracterização das argamassas no estado endurecido .....	59
4.2.1 Absorção de água – Método do cachimbo .....	60
4.2.2 Resistência potencial de aderência .....	62
4.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) .....	70
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>73</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>76</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A história de desenvolvimento da civilização sempre esteve baseada na necessidade de buscar novas tecnologias para atender suas demandas. Essa necessidade tem impulsionado o homem a descobrir novos materiais para aplicação em diversos ramos da indústria e da construção civil.

A nanotecnologia está emergindo como a próxima revolução tecnológica, pois permite aplicações em todas as áreas da ciência, auxiliando no desenvolvimento de materiais e sistemas. De acordo com Hood (2004), o potencial promissor dos nanomateriais está gerando uma grande expectativa do ponto de vista econômico e em termos de inovação. Este novo ramo da ciência, segundo Batiston (2007) possibilitou aos cientistas e pesquisadores manipular a estrutura de materiais com mais precisão, bem como interferir com mais eficiência em suas características físicas e químicas além de desenvolver materiais compostos com propriedades potencializadas.

Em seu estudo, Le Marois (2004) apresenta algumas potencialidades dos nanomateriais como a busca do desenvolvimento sustentável através de economia de energia com motores de alto rendimento, tratamento de doenças por meio do desenvolvimento de sensores biológicos e tratamentos localizados, redução da poluição pelo desenvolvimento de filtros seletivos de alto rendimento, assim como, através da osmose reversa da água do mar, proporcionar o consumo de água potável.

Neste contexto, destaca-se os nanotubos de carbono (NTCs) que, desde o seu descobrimento, no início da década de 90, tem despertado a atenção da comunidade científica, devido as suas propriedades. Esses elementos de escalas nanoscópicas tem promovido grandes mudanças na área de engenharia de materiais.

A nanotecnologia extrapolou os limites da academia e da indústria, trazendo consigo promessas de uma verdadeira revolução de costumes e tecnológica. Os nanotubos de carbono (NTCs) são conhecidos devido suas excelentes propriedades mecânicas e maior condutividade elétrica, propriedades estas que despertaram o interesse de pesquisadores em implantar o material na indústria da construção civil. Utilizando métodos de manipulação na escala nanométrica será possível controlar e introduzir características e comportamentos na matriz da pasta de cimento, permitindo produzir sistemas mais resistentes e duráveis (ZARBIN,2007).

De acordo com Recriar (2010) o setor da construção civil é atualmente um dos maiores causadores de impactos ambientais, consumindo cerca de 75% dos recursos naturais. É em meio a esta situação que a nanotecnologia poderá vir a contribuir para o aumento da eficiência e seletividade de processos industriais, resultando em um melhor aproveitamento de matéria-prima e conseqüentemente reduzindo o consumo de energia e produzindo menos resíduos indesejáveis.

Os benefícios da adição dos NTCs à concretos e argamassas de acordo com Marcondes (2012), ainda estão sob estudos. Em todo o mundo existem pesquisas que evidenciam melhorias nas características mecânicas em concretos e na diminuição da porosidade em argamassas. Kruger *et al.* (2013) afirmam que as argamassas de revestimento são de grande importância para a construção civil, pois além de desempenhar função estética, auxiliam na proteção contra agentes agressivos, no isolamento termo acústico, estanqueidade e regularização de superfícies.

Neste contexto, o presente trabalho traz um estudo sobre o desempenho de argamassas de revestimento modificadas com nanotubos, com enfoque na interface argamassa/substrato. Assim, a utilização de um substrato padrão visa reduzir as variáveis (como a porosidades, a rugosidade e absorção do substrato) que interferem no desempenho ideal das argamassas.

## **1.1 Considerações iniciais**

O presente estudo será baseado na pesquisa de Schineider (2018), na qual a autora avaliou os efeitos da incorporação de NTCs nas propriedades físicas e mecânicas de matrizes de cimento Portland. Os NTCs foram adicionados em argamassas visando a aplicação especialmente em argamassas de revestimento.

Foram adicionados às argamassas em forma de dispersão os seguintes teores: 0,20%, 0,30% e 0,40% de NTC em relação à massa de cimento. Para as argamassas no estado fresco foram analisadas as seguintes propriedades: como índice de consistência, densidade de massa e teor de ar incorporado. No estado endurecido foram avaliadas propriedades mecânicas e de durabilidade, sendo elas resistência à tração na flexão, resistência à compressão axial e absorção de água por capilaridade. Schineider (2018) obteve melhores resultados para todas as propriedades das argamassas (absorção de água por capilaridade, resistência à compressão e

resistência à tração na flexão) com adição de NTCs quando comparadas a argamassa referência.

## 1.2 Justificativa

A existência de poucos estudos científicos analisando o desempenho de argamassas modificadas com NTC impulsionou esta pesquisa.

Atualmente, pesquisas científicas estão sendo desenvolvidas a nível mundial objetivando melhorar a relação custo-benefício de NTCs. Existem ainda alguns entraves quanto ao uso desse material que precisam ser superados, como a dificuldade de dispersão dos NTCs em matriz cimentícias e seu elevado custo. Apesar desta restrição alguns autores (SCHNEIDER (2018), LEMES (2016), RECENA (2016)) obtiveram resultados positivos em relação as propriedades mecânicas de matrizes cimentícias com incorporação de NTCs.

Analisando o contexto nacional, no Brasil, um dos melhores trabalhos ocorre na UFMG (Universidade Federal de Minas Gerais), no laboratório de nanomateriais da instituição, que desenvolveu um método no qual os NTCs são gerados a partir da produção do próprio cimento Portland.

O estudo desta pesquisa se limitará as argamassas de revestimento com incorporação de NTCs complementado as propriedades analisadas por Schneider (2016). Espera-se que esta incorporação melhore algumas propriedades como a absorção e aderência contribuindo para um melhor desempenho e vida útil deste material.

Diante do exposto, os questionamentos que conduzem esta pesquisa são:

- Existe interferência da retenção de água na aderência das argamassas de revestimento.
- Quais os efeitos da adição de NTCs na aderência no estado endurecido de argamassas de revestimento?
- A presença de NTCs em argamassas altera a absorção da matriz?

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo geral**

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar o comportamento de argamassas de revestimento de cimento Portland fabricadas com CP V - ARI, aditivo à base de policarboxilato e nanotubos de carbono de paredes múltiplas (NTCPM), funcionalizados, nos teores de 0,20%, 0,30% e 0,40% do peso do cimento.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

Como objetivos específicos deste estudo pode-se citar:

- Produzir traços de argamassas com e sem adição de NTCs.
- Avaliar a retenção de água em todos os traços estudados de argamassas, com e sem adição de NTCs;
- Comparar a absorção, através do método do cachimbo, em argamassas com e sem adição de NTCs.
- Avaliar a aderência à tração das argamassas de revestimento com adição de NTCs;
- Análise micro estrutural das argamassas através da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV);
- Comparar o desempenho de argamassas de cimento Portland fabricado com e sem NTCs;

## **1.4 Estrutura do trabalho**

Este trabalho está organizado em cinco capítulos. No primeiro, está apresentada a introdução, o tema da pesquisa, a justificativa e os objetivos para o desenvolvimento do trabalho.

O segundo capítulo apresenta a fundamentação teórica contendo a revisão bibliográfica sobre os assuntos abordados no trabalho como argamassas, nanotecnologia, estudos realizados utilizando adição de NTCs em matrizes cimentícias e formas de dispersão dos NTCs. O capítulo três apresenta os materiais e métodos utilizados na pesquisa

O capítulo quatro apresenta os resultados obtidos através dos ensaios realizados no estado fresco e endurecido das argamassas. Por fim, no capítulo cinco estão apresentadas as considerações finais.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Os itens 2.1 a 2.5 apresentam a revisão bibliográfica sobre o tema dessa pesquisa.

### **2.1 Argamassas**

Segundo Carasek (2007) e Recena (2012), argamassas são materiais de construção, com propriedades de aderência e endurecimento obtidos a partir da mistura homogênea de um ou mais aglomerantes, agregado miúdo (areia) e água, podendo conter ainda aditivos e adições minerais. As argamassas mais antigas eram constituídas à base de cal e areia. Com o passar dos anos, houve alterações das técnicas de construção e, como consequência, novos materiais foram desenvolvidos com objetivo de melhorar o seu desempenho.

De acordo com Recena (2012), as argamassas devem assumir funções primordiais quando considerada sua interação com o substrato ou o meio nas quais estão inseridas. Contudo, o autor afirma que algumas funções são primordiais, independente do tipo, como: impermeabilizar o substrato de aplicação, garantir bom acabamento ao elemento revestido, absorver as deformações naturais a que a estrutura está sujeita, regularizar e/ou preservar mecanicamente o substrato.

Os critérios para a classificação das argamassas diferem quanto a natureza, o tipo e número de aglomerantes, a consistência e a plasticidade, a densidade da massa e a forma de preparo ou fornecimento. Também podem ser classificadas com relação a sua função na construção, conforme mostrado no Quadro 1.

Quadro 1 – Funções das argamassas e seus respectivos tipos

Função	Tipos
Para construção de alvenarias	Argamassa de assentamento (elevação da alvenaria)
	Argamassa de fixação (ou encunhamento) — alvenaria de vedação
Para revestimento de paredes e tetos	Argamassa de chapisco
	Argamassa de embaço
	Argamassa de reboco
	Argamassa de camada única
	Argamassa para revestimento decorativo monocamada
Para revestimento de pisos	Argamassa de contrapiso
	Argamassa de alta resistência para piso
Para revestimentos cerâmicos (paredes/ pisos)	Argamassa de assentamento de peças cerâmicas – colante
	Argamassa de rejuntamento
Para recuperação de estruturas	Argamassa de reparo

Fonte: Caraseck (2007)

Para que as argamassas desempenhem suas funções, é necessário que as mesmas apresentem algumas propriedades como:

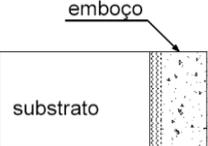
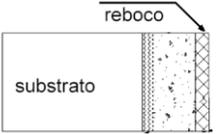
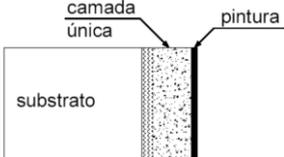
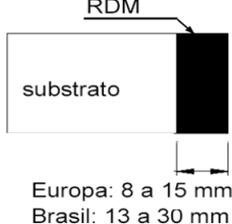
- ✓ durabilidade;
- ✓ estabilidade química e física respectivamente resistente ao ataque de agentes agressivos e as solicitações resultantes dos ciclos alternados de molhagem e secagem;
- ✓ adequada trabalhabilidade de acordo com à função que serão destinadas;
- ✓ capacidade de aderir ao substrato; e
- ✓ eficiente capacidade de retenção de água.

O tipo estudado nesta pesquisa será a argamassa de revestimento que, segundo Caraseck (2007) e Recena (2012), é um tipo de argamassa utilizado para revestir paredes, muros e estruturas de concreto. As principais funções de um revestimento argamassado de parede são: regularizar a superfície dos elementos de vedação fornecendo um bom aspecto ao mesmo e servir como base para acabamentos decorativos; contribuir de forma importante para o isolamento térmico, isolamento acústico, estanqueidade à água, segurança ao fogo, resistência ao desgaste superficial, além de apresentar adequada resistência de aderência ao substrato.

No caso de revestimentos externos, proteger a alvenaria e a estrutura contra ação do intemperismo. O revestimento pode ser constituído por várias camadas com

características e funções específicas. O Quadro 2 apresenta as diferentes aplicações de revestimentos de paredes, suas definições e finalidades.

Quadro 2 – Diferentes alternativas de revestimentos de paredes

Revestimentos de Paredes	Definição	Finalidade
<b>Chapisco</b> 	⇒ Camada de preparo da base	Uniformizar a superfície quanto a absorção e melhorar a aderência do revestimento
<b>Emboço</b> 	⇒ Camada executada para cobrir e regularizar a base	Permite a superfície receber outra camada de reboco ou revestimento decorativo
<b>Reboco</b> 	⇒ Camada utilizada para cobrir o reboco	Permite a superfície receber o revestimento decorativo
<b>Camada Única</b> 	⇒ Revestimento único aplicado sobre a base	Alternativa atualmente mais empregada no Brasil, é aplicada sobre a base e posteriormente recebe a pintura
<b>Monocamada (RDM)</b>  <p>Europa: 8 a 15 mm Brasil: 13 a 30 mm</p>	⇒ Revestimento aplicado em uma única camada	Regularização e decoração. Alternativa atualmente mais empregada no Brasil, é aplicada sobre a base e posteriormente recebe a pintura.

Fonte: Adaptado de Caraseck (2007).

Cabe dizer, com base em Recena (2012), que os revestimentos sempre foram considerados como constituídos de, basicamente, duas camadas, sendo elas o emboço, aplicado sobre o substrato, e o reboco, uma camada aplicada com a finalidade de promover o acabamento do sistema. No entanto, entre o revestimento e o substrato há uma camada intermediária, o chapisco, na qual tem a finalidade de melhorar as condições de aderência do revestimento ao substrato. Em situações nas quais a superfície garante a ancoragem da argamassa de revestimento, então o chapisco é dispensado.

## **2.2 Propriedades das argamassas de revestimento**

Algumas propriedades são essenciais para que as funções das argamassas de revestimento sejam atendidas. São elas: trabalhabilidade, essencialmente consistência, retenção de água; retração; aderência; permeabilidade à água e resistência mecânica, principalmente a superficial.

### **2.2.1 Trabalhabilidade**

É uma propriedade da argamassa no estado fresco que determina a facilidade com que elas podem ser misturadas, transportadas, aplicadas, consolidadas e acabadas em uma condição homogênea.

Para Caraseck (2007), a trabalhabilidade é a propriedade que não garantirá somente as condições de execução, mas também o desempenho adequado do revestimento em serviço, ou seja, no estado endurecido. A trabalhabilidade é ajustada à forma de aplicação em obra, desta maneira, o equipamento utilizado interfere diretamente na consistência da argamassa. Argamassas com trabalhabilidade insatisfatória e aplicação incorreta afetam diretamente quando estudadas as propriedades endurecidas da mesma, como é o caso da aderência.

De acordo com Cardoso (2009), a propriedade de um concreto ou argamassa no estado fresco que determina a facilidade como estes podem ser misturados, aplicados, consolidados e acabados a uma condição homogênea é definida como trabalhabilidade. O autor afirma que esse conceito é relativo pois não depende somente das propriedades do material (concreto ou argamassa) mas também varia de acordo com a forma de aplicação e o método de avaliação.

Dependendo do tipo ou função de argamassas algumas propriedades referentes a trabalhabilidade podem ser mais importantes que outras. O Quadro 3 apresenta as principais propriedades relacionadas com a trabalhabilidade das argamassas.

Quadro 3 – Propriedades relacionadas com a trabalhabilidade das argamassas

<b>Propriedades</b>	<b>Definição</b>
<b>Consistência</b>	É a maior ou menor facilidade de a argamassa deformar-se sob ação de cargas.
<b>Plasticidade</b>	É a propriedade pela qual a argamassa tende a conservar-se deformada após a retirada das tensões de deformação.
<b>Retenção de água e de consistência</b>	É a capacidade de a argamassa fresca manter sua trabalhabilidade quando sujeita a solicitações que provocam a perda de água.

Fonte: Adaptado Caraseck (2007)

A consistência é a propriedade da argamassa de ter maior ou menor facilidade de resistir à uma deformação. Caraseck (2007) descreve que a alteração da quantidade de água na mistura diz respeito à consistência ou fluidez da argamassa e que essas propriedades garantem a aderência do revestimento, que decresce com o aumento da relação água/cimento das argamassas, caso não sejam alteradas significativamente as características do substrato.

A plasticidade das argamassas é influenciada pelos tipos e quantidades de aglomerantes e agregados, pelo tempo e pela intensidade de mistura, além da presença de aditivos. A cal, por exemplo, é adicionada geralmente em argamassas com a função de garantir mais plasticidade e capacidade de retenção de água para a mistura, segundo Recena (2012). Os ensaios que avaliam a plasticidade das argamassas são aqueles que impõem à mesma uma deformação por meio de vibração, sendo prescritos na NBR 13276 (ABNT, 2016) e nomeado como *Flow table*.

Conforme Caraseck (2007), a retenção de água representa a capacidade de a argamassa fresca manter sua trabalhabilidade quando sujeita a solicitações que provocam perda de água de amassamento. Além de interferir no comportamento da argamassa no estado fresco, também pode afetar determinadas propriedades no estado endurecido (aderência, resistência mecânica final e durabilidade). O estudo desta propriedade, na concepção de Recena (2012), é de grande importância, pois uma argamassa que possui reduzida capacidade de retenção de água compromete a eficiência da ligação da argamassa ao substrato.

Scartezini (2002) enfatiza que a argamassa situada mais próxima do substrato perde mais água quando comparada com a camada superficial. O autor também verificou que a sucção exercida pelo bloco influencia na perda de água em todo o revestimento, inclusive na camada mais próxima à superfície.

Recena (2012) assegura que a rápida evaporação da água de amassamento de uma argamassa de revestimento empregada com pequena espessura determina a redução do volume de argamassa ainda no estado fresco. Segundo o autor, esta redução leva a dissipação de esforços através de processos de fissuração pois a argamassa, em seu estado fresco, não apresenta resistência para equilibrar os esforços de tração oriundos da diferença de volume. Se a argamassa possuir capacidade de reter água, a perda da água de amassamento ocorre lentamente, o que possibilita o ganho de resistência e assim garante uma melhor aderência da mesma ao substrato. A retenção de água em argamassas pode ser avaliada pelo método prescrito na NBR 13277 (ABNT, 2005).

### **2.2.2 Aderência**

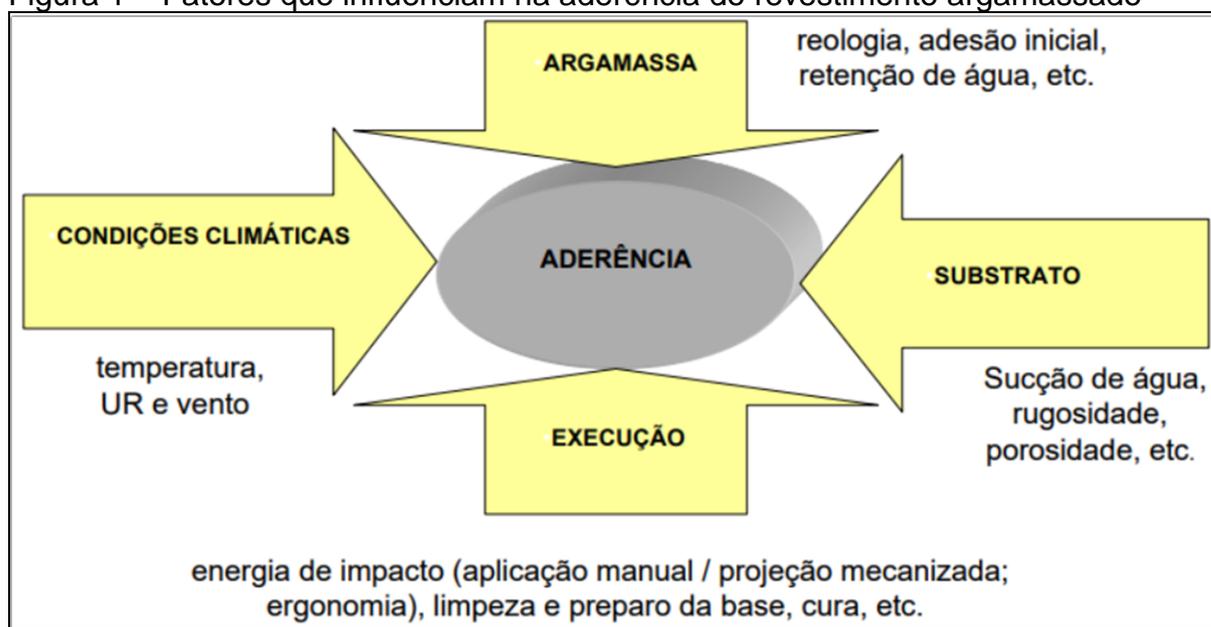
Scartezini (2002) afirma que a aderência analisada de forma independente não é um bom indicador de desempenho. Segundo o autor, existem outros fatores que são mais importantes na tecnologia dos revestimentos, porque influem diretamente na qualidade dos mesmos. Entre estes fatores, Scartezini (2002) cita os materiais constituintes das argamassas e as propriedades das argamassas no estado fresco e no estado endurecido.

A NBR 15258 (ABNT, 2005) define aderência como uma propriedade da argamassa onde a mesma deve resistir aos esforços que atuam na interface argamassa/substrato. De acordo com Scartezini (2002) e Franciscon (2007), esta é uma propriedade na qual o revestimento deve-se manter fixo ao substrato e depende das propriedades da argamassa no estado fresco, da execução do revestimento e de propriedades do substrato como natureza e limpeza superficial. Esta propriedade permite ao revestimento absorver tensões normais ou tangenciais na superfície do substrato. É utilizada para descrever a resistência do contato entre argamassa e base.

Ioppi (1995) considera que o conhecimento das propriedades físico-mecânicas das argamassas tanto no estado fresco quanto no endurecido são fundamentais, no entanto, para a análise da aderência são necessárias informações sobre características e propriedades da base. O autor enfatiza a influência de propriedades como plasticidade, adesão inicial, absorção de água capilar, textura do substrato e preparação da mão de obra na aderência dos revestimentos argamassados.

Por meio de seus estudos, Caraseck (2007) esclarece que a aderência deriva da conjunção de três propriedades da interface argamassa-substrato: resistência de aderência à tração, resistência de aderência ao cisalhamento e extensão de aderência. A importância de alguns outros fatores como o mecanismo de ligação argamassa-substrato, a influência dos materiais constituintes das argamassas e a medida de resistência a aderência, serão discutidos nos próximos tópicos. A Figura 1 mostra os fatores que influenciam no desempenho do revestimento argamassado.

Figura 1 – Fatores que influenciam na aderência do revestimento argamassado



Fonte: Caraseck (2007)

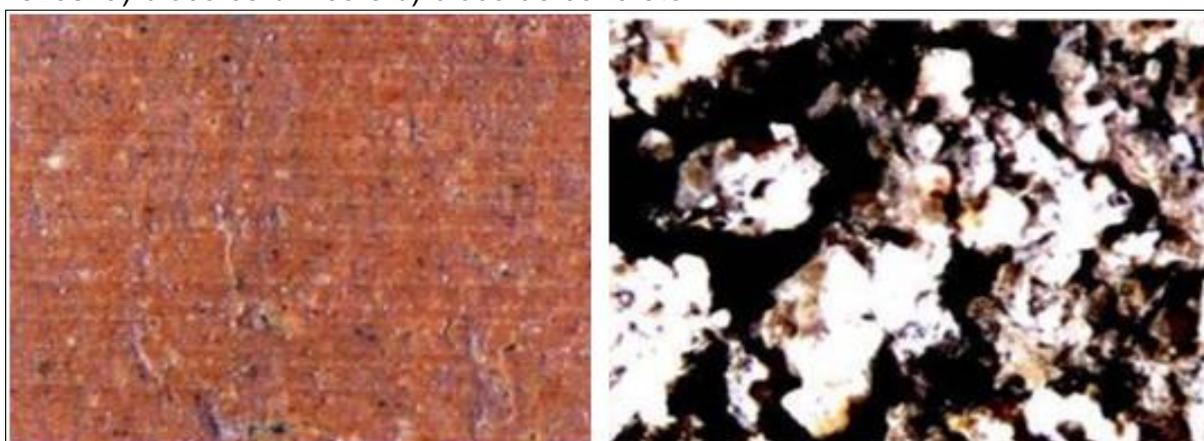
Recena (2012) explica que a rápida evaporação da água de amassamento ocasiona a redução do volume da argamassa, ainda no estado plástico. O autor complementa que, nesta etapa, o sistema ainda não apresenta resistência mecânica suficiente para equilibrar os esforços gerados, então, estes esforços se dissipam através do processo de fissuração. Nesta situação, se a argamassa apresenta alta capacidade de retenção, enquanto ocorre de maneira lenta a perda da água de amassamento, há um progressivo ganho de resistência que garante a argamassa uma menor variação de volume e assim reduz a probabilidade do surgimento de fissuras.

De acordo com Carasek (2007), a aderência da argamassa no estado endurecido é um fenômeno essencialmente mecânico que depende da penetração da argamassa nos poros do substrato. Ao ocorrer o contato entre a argamassa no estado

plástico e a superfície absorvente, parte da água de amassamento penetra pelos poros e cavidades do substrato.

Scartezini (2002) expressa que o substrato influencia, sem dúvidas, na aderência dos revestimentos. O autor comparou a resistência à aderência de dois substratos diferentes (concreto e cerâmico) através da técnica de micrografia (Figura 2). Observou que a superfície de um bloco de concreto possuía maior rugosidade superficial e uma textura diferenciada em relação ao bloco cerâmico. Segundo o autor, essas características favoreceram o intertravamento da argamassa e permitiram uma melhor penetração da pasta aglomerante no bloco.

Figura 2 – Vista da superfície por meio de lupa estereoscópica com aumento de 50 vezes: a) bloco cerâmico e b) bloco de concreto



(a)

(b)

Fonte: Scartezini (2002)

Para Caraseck (2007), o tipo e as características físicas do cimento podem influenciar nos valores de aderência. A autora afirma que quanto mais fino o cimento, maior a resistência a aderência. No entanto, a retração e a fissuração ocorrem de maneira mais fácil. Também ressalta que quanto maior o módulo de finura das areias maior será a resistência de aderência obtida, e para se obter bons resultados de aderência a areia deve possuir uma distribuição granulométrica contínua.

Scartezini (2002) menciona que, quanto maior o tamanho dos grãos de cimento, menor será a quantidade de poros finos no interior da argamassa. Ou seja, maior será a quantidade de poros ativos do substrato que irão absorver água e, conseqüentemente, irão promover uma maior deposição de produtos da hidratação

na interface argamassa/substrato, contribuindo assim para a melhor ancoragem da argamassa.

Alguns autores (SANTOS, 2008; CARASEK, 2011; MARTINSET *et al.*, 2016, entre outros) são enfáticos ao afirmarem que é fundamental que a argamassa de revestimento possua elevada resistência para evitar situações extremas como descolamento e queda de pedaços do revestimento

A avaliação da resistência de aderência à tração de revestimentos é definida segundo a NBR 13528 (ABNT, 1995) e consiste em avaliar a aderência do revestimento. Aderência é a propriedade da argamassa de resistir às tensões atuantes na interface com o substrato e avaliar a resistência a tensão máxima aplicada por uma carga perpendicular à superfície da argamassa sobre o substrato. Outro método de ensaio para avaliar o mesmo critério segue a NBR 15258 (ABNT, 2005), o qual estabelece um substrato padrão para a aplicação de argamassas, além de alguns cuidados adicionais de condição de laboratório.

### **2.2.3 Resistência mecânica**

No entendimento de Caraseck (2007), o revestimento de argamassa também deve apresentar capacidade de absorver pequenas deformações sem ruptura ou por meio de microfissuras, de maneira a não comprometer sua estanqueidade, aderência e durabilidade. Esta capacidade de absorver deformações está diretamente ligada com a resistência mecânica e o módulo de elasticidade das argamassas. Ioppi (1995) percebeu um decréscimo da resistência à tração e compressão com o aumento da relação agregado/cimento.

Selmo (1989) destaca que esforços como o desgaste superficial, impactos ou movimentações higroscópicas são exemplos de solicitações que exigem resistência mecânica dos revestimentos, pois geram tensões internas que tendem a desagregá-los. Um dos principais problemas nos revestimentos, na opinião de Caraseck (2007), está associado a resistência mecânica da argamassa, e a baixa resistência superficial, que traduz na pulverulência, prejudicando a fixação das camadas de acabamento.

## **2.3 Nanociência e nanotecnologia**

A nanotecnologia trata da manipulação, controle e produção de materiais e sistemas em escala nanométrica, normalmente delimitadas entre 1 e 100 nm. Na área

de materiais a nanociência e a nanotecnologia possuem um grande potencial ainda não explorado. Com a aplicação destes materiais em escala manométrica poderão ser desenvolvidas novas cerâmicas, polímeros, borrachas, entre outros materiais com propriedades superiores as existentes. Durlley (2011, apud LIMA NETO, 2013) explica que o desejo de compreender e controlar a organização e as propriedades destes materiais promoveram o envolvimento de diversas áreas do conhecimento.

O surgimento desta tendência recente de desenvolvimento de nanotecnologia abriu uma nova possibilidade para o melhoramento dos materiais cimentícios como concretos e argamassas, e atualmente as adições em nano escala mais utilizadas são a nanossílica (NS) e os nanotubos de carbono (NTC). Algumas universidades nacionais (UFMG, USP, UFPR, UFSC) e internacionais (LNEC) tem se dedicado ao estudo das propriedades do cimento e do concreto compostos com estes materiais.

### **2.3.1 Nanotubos de carbono (NTCs)**

Couto (2006) comenta que a descoberta dos nanotubos de carbono aconteceu no início da década de 90, por meio do trabalho realizado por Sumio Iijima, sendo definido como cilindros formados apenas por átomos de carbono e se apresentam em escala nanométrica. Estes átomos se enrolam em forma de cilindro e, segundo o Centro de desenvolvimento de tecnologia nuclear (CDTN), esta ligação carbono-carbono é a mais forte encontrada na natureza. Para Li *et al.* (2005), dependendo da sua estrutura, os NTCs podem ser condutores ou semicondutores metálicos. Além disso, podem ter uma capacidade de deformação elástica de cerca de 12% (propriedade interessante para argamassa de assentamento), 60 vezes maior que a do aço.

Embora o NTC seja utilizado em várias indústrias, uma das barreiras encontradas para sua utilização é seu elevado custo e baixa oferta. Outra barreira é com relação a dispersão homogênea dos NTCs a serem incorporados na matriz, especialmente quando se trata de produção em grande escala.

#### **2.3.1.1 Características dos NTCs**

Marcondes (2012) cita que há vários modos de ligação dos átomos de carbono para a formação dos NTCs, afirmando ainda que essas formas de ligação é que são

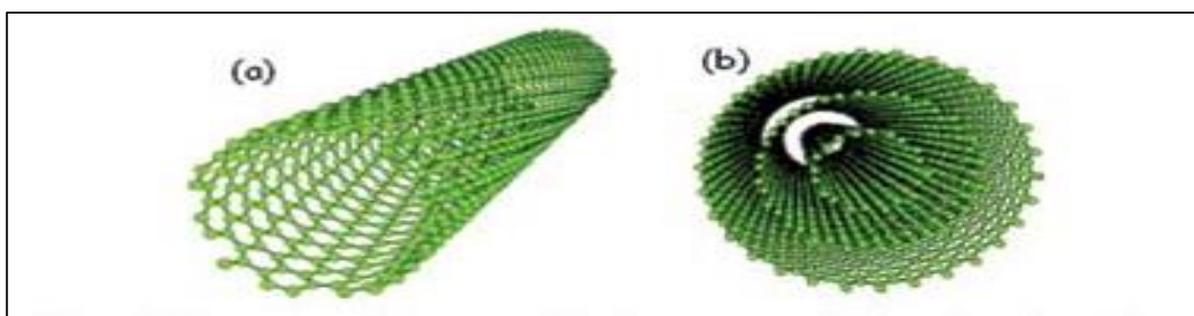
responsáveis pelo desempenho do material. Para a formação de NTCs, uma folha de grafeno é enrolada em dimensões nanométricas com cavidade oca.

Do ponto de vista estrutural, há dois tipos de NTC: os de paredes simples, constituídos por uma única folha de grafeno enrolada em si mesmo, e os de paredes múltiplas, este sendo um conjunto de nanotubos de carbono coaxiais, com várias folhas de grafeno enroladas. De acordo com Zarbin (2007), os NTCs de paredes simples são formados por uma única folha de grafeno e apresentam diâmetro variando entre 1 e 5 nm. Entretanto, os NTCPM múltiplas são constituídos por 2 até 40 camadas de grafeno concêntricas, são mais espessos quando comparados aos de paredes simples, apresentam diâmetros de 10 a 50 nm e comprimentos maiores que 10 micrometros e, segundo Herbst *et al.* (2004), são mais fáceis de serem sintetizados, o que possibilita sua aplicação em grande escala.

Os NTCs, na visão de Lima Neto (2013) podem desempenhar papel parecido com o dos cabos de aço, reduzindo a porosidade (possibilita sua utilização em obras submarinhas), aumentando a resistência mecânica, entre outras características.

Através da Figura 3 é possível perceber a estrutura dos dois tipos de nanotubos de carbono existentes.

Figura 3 – Representação esquemática da estrutura de nanotubos de carbono, (a) nanotubo de parede simples e (b) nanotubo de parede múltipla



Fonte: Zarbin (2007)

Ao desenvolver uma pesquisa com NTCs é de suma importância caracterizar os mesmos pois o fator de forma pode ou não interferir nos resultados. Na Tabela 1 é possível observar as características dos NTCs de paredes múltiplas utilizados em alguns estudos que serviram como base para o presente.

Tabela 1 – Caracterização dos nanotubos de carbono utilizados em estudos de matrizes cimentícias

Autores	Tipo	Diâmetro	Comprimento	Fator de forma
		d (nm)	L (µm)	L/d
Lemes (2016)	NTCPM	10 - 30	10 - 30	300 - 1000
Melo <i>et al.</i> (2011)	NTCPM	10 - 100	800 - 900	8000 - 90000
Batiston (2012)	NTCPM	40 - 60	0,5 - 2	17 - 50
		40 - 70	5 - 15	125 - 375
		8 - 15	10 - 50	666 - 6250
		20 - 30	10 - 30	333 - 1500
Morais (2012)	NTCPM	5 - 60	5 - 30	500 - 1000
Marcondes (2012)	NTCPM	9,50	1,5	157,9

NTCPM – Nanotubos de carbono de paredes múltiplas

Fonte: Elaboração Própria

### 2.3.1.2 Métodos de síntese de nanotubos de carbono

O custo da utilização de nanotubos em materiais compósitos está diretamente relacionado ao método de síntese do mesmo, o custo varia em função do tipo do método de síntese utilizado e dos níveis de purificação. Vaisman *et al.* (2006) afirmam que o mecanismo de síntese e crescimento dos nanotubos de carbono alteram o seu grau de pureza. Para os autores, o entendimento da síntese resulta na obtenção de materiais mais puros, o que, por sua vez, reduz a necessidade de pós-tratamentos diminuindo seu custo final.

Tanto os nanotubos de carbono de paredes simples (NTCPS) quanto os nanotubos de carbono de paredes múltiplas (NTCPM) são produzidos a partir do mesmo método, o que os difere é que para se obter NTCPS é necessária mais cautela com os parâmetros de produção e purificação. Estes também são produzidos em quantidade bem menor que os NTCPM, o que torna seu custo mais elevado.

De acordo com Sólorsano (2008), a formação dos nanotubos de carbono é dada na tentativa de minimizar o excesso de energia dos átomos que se encontram na periferia da folha de grafeno. Quando observado um plano de grafeno com poucos átomos, a concentração de energia relativa da borda para os átomos internos é consideravelmente grande, devido a este excesso de energia há a formação de tubos fechados como forma de minimizá-la.

Os processos de funcionalização provocaram uma leve redução na viscosidade e na tensão de escoamento se comparadas com misturas com nanotubos não tratados. Esse fato está ligado com a melhoria da interação dos nanotubos com a água, que melhora a dispersão e, conseqüentemente, facilita a mobilidade das partículas na pasta (BATISTON,2012).

Existem vários métodos para produzir nanotubos de carbono, dentre eles destacam-se três, a ablação por laser, a descarga de arco e a Deposição Química a Vapor (CVD - *Chemical Vapor Deposition*). Cada método possui suas próprias características que resulta na formação de nanotubos com estrutura e pureza diferentes.

A ablação por laser baseia-se em vaporizar um eletrodo de grafite fazendo uso de laser de alta potência. O gás rico em carbono é contido por um invólucro de quartzo aquecido e os nanotubos se depositam nas regiões mais frias do equipamento, nas paredes do reator e no coletor. Embora o custo de produção possa ser maior que no método de descarga por arco, a ablação por laser produz menos subprodutos diminuindo a necessidade de purificação posterior (MARCHIORI, 2007).

O método de síntese por arco produz nanotubos em larga escala, entretanto, também é produzida uma elevada quantidade de partículas indesejadas e carbono amorfo que demandam um processo de purificação para obtenção dos nanotubos. Este método consiste, basicamente, na aproximação de dois eletrodos de grafite, entre eles forma-se um arco elétrico. A temperatura do plasma gerado pelo arco elétrico atinge cerca de 3000°C e vaporiza o carbono dos eletrodos. Em seguida a este processo, os átomos de carbono começam a se acumular no catodo, e na presença de metais catalisadores inicia-se o crescimento dos nanotubos de carbono (ROCHA, 2005).

A CVD utiliza gás rico em carbono, para produção de nanotubos de carbono. Este gás é decomposto a temperaturas em torno de 500°C. Este método possibilita o crescimento de nanotubos alinhados ao substrato permitindo um maior controle sobre

os parâmetros de crescimento. Esta técnica é bastante empregada devido à alta produção e menor necessidade de purificações posteriores (MARCHIORI, 2007). Entretanto, os nanotubos sintetizados por CVD apresentam maior quantidade de defeitos o que pode restringir algumas aplicações potenciais.

Apesar de os nanotubos de carbono produzidos pelo método CVD apresentarem mais defeitos estruturais, de acordo com Hu *et al.* (2006), sua produção é vantajosa por permitir uma produção contínua em larga escala. Os NTC que serão utilizados nesta pesquisa foram produzidos a partir deste processo.

### **2.3.2 Propriedades de matrizes cimentícias com incorporação de NTCs**

A produção de nanocompósitos pode melhorar o desempenho no retardamento ao fogo, com o uso de uma quantidade relativamente baixa de nanopartículas (KASHIWAGI *et al.*, 2005). Outros benefícios é que nanocompósitos produzidos com polímeros e que contenham silicatos em camadas constituem uma nova geração de compósitos avançados com melhores propriedades mecânicas, propriedades de barreira reforçadas contra gás e de retardamento ao fogo (RAY, 2003).

A porosidade é reduzida com a incorporação de nanotubos de carbono na matriz de cimento. Isso pode ser comprovado por testes realizados, em que argamassas contendo 0,5% de NTC tiveram uma porosidade de 10,8%, aproximadamente 64% menor do que na amostra de controle apenas com cimento (Li *et al.*, 2005). É devida a formação de pontes de aderência que se acredita que a adição de NTCs ao cimento proporcione a produção de argamassas e concretos com maiores resistências, menor porosidade e, por consequência, mais duráveis (MAKAR *et al.*, 2005).

Sobolev *et al.* (2008) relatam que a ação benéfica das nanopartículas na microestrutura e no desempenho de materiais à base de cimento pode ser explicada pelos seguintes fatores:

- ✓ nanopartículas bem dispersas aumentam a viscosidade da fase líquida;
- ✓ melhoram a resistência à segregação;
- ✓ as nanopartículas preenchem os vazios entre os grãos, tornando a estrutura mais densa (efeito *filler*);
- ✓ agem como centros de cristalização na hidratação do cimento, acelerando, portanto, este processo;

- ✓ favorecem a formação de pequenos cristais, como o hidróxido de cálcio, e pequenos grupos uniformes de silicato de cálcio hidratado;
- ✓ as nanopartículas melhoram a estrutura da zona de transição, resultando em melhores ligações entre agregados e pasta de cimento.

## **2.4 Dispersão de nanotubos em matrizes cimentícias**

Quando adicionado NTC a matrizes cimentícias espera-se que os mesmos melhorem o desempenho da matriz. Para que isso ocorra é necessário que os nanotubos sejam dissipados da forma mais homogênea. Segundo Melo (2009), quando a dispersão é bem realizada, os NTCs misturam-se à pasta de forma homogênea, fazendo interligações com o silicato de cálcio hidratado e com o próprio grão da mistura, sem ocorrer aglomerações pontuais. Isso leva a uma matriz mais densa, que contribui para a obtenção de um novo material mais resistente.

Em seu estudo, Marcondes (2012) realizou inicialmente a dispersão de NTCs em diversos meios aquosos a fim de encontrar a solução que apresentasse melhor dispersão. Através de uma análise hierárquica o autor concluiu que os melhores resultados foram obtidos através das amostras que continham a mistura de água, NTCs e aditivo - a base de policarboxilato.

Conforme o autor, no processo de dispersão a mistura foi agitada em um agitador mecânico e depois submetida à sonificação em um aparelho de ultrassom (frequência nominal de 40kHz e potência de 100W) onde permaneceram por cerca de 60 minutos. A temperatura da água variou entre 20° e 30° C, somente após 30 minutos é que a mistura dispersada foi utilizada na moldagem.

Com o objetivo de distribuir os nanotubos de maneira homogênea na mistura, Batiston (2012) também utilizou o ultrassom para dispersar a mistura. Previamente foi realizada a mistura de NTCS, água e aditivo, e, após, a mesma permaneceu sob ação de um agitador mecânico por cerca de 30 segundos e, em seguida, foi colocada na cuba de ultrassom por 5 minutos. O autor utilizou a mistura de NTC logo após a dispersão a fim de evitar o máximo a aglomeração do material. Em seu estudo, Lemes (2016) também utilizou a cuba de ultrassom para auxiliar na dispersão nos NTCs, mas o tempo de aplicação das ondas foi de 2 horas e durante o processo a autora teve o cuidado em manter a temperatura da água de imersão entre 20° e 30°C - trocando a água assim que a temperatura excedesse 30°C.

Para ajudar a separar os nanotubos de carbono, Morais (2012) optou por adicionar solventes orgânicos à mistura (20% de polivinilpirrolidona). Primeiramente o autor dividiu a mistura em seis pequenas porções e cada uma foi sonicada por 4 horas, após, as porções foram misturadas novamente e sonicadas novamente por um dia e meio com objetivo de obter uma mistura uniforme.

A nanotecnologia tem aberto oportunidades para o desenvolvimento de novos produtos com propriedades e características muitas vezes superiores a materiais usuais. Estas características podem ser utilizadas no desenvolvimento de materiais altamente utilizados na construção civil, no entanto fatores como a síntese, estocagem, manuseio e incorporação destes materiais trazem desafios aos pesquisadores e a necessidade de uma análise profunda de processos e adequações de procedimentos. A potencialidade da nanotecnologia só será acessível a comunidade com custo/benefício quando estes desafios forem vencidos.

## **2.5 Estudos de matrizes cimentícias com adição de nano tubos de carbono**

Atualmente, alguns estudos foram desenvolvidos com a utilização de NTCs adicionados em matrizes cimentícias (LEMES, 2016; MELO *et. al*, 2011; BATISTON, 2012; BORBA *et al.*, 2013; MORAIS, 2012; MARCONDES, 2012; entre outros).

Lemes (2016) estudou a incorporação de NTC, com paredes múltiplas em argamassas. Os NTCs foram adicionados nas misturas nos teores de 0,30%, 0,50% e 0,70%, em relação a massa de cimento. O traço de estudo foi composto basicamente por cimento (CP V-ARI) e areia (média), na proporção de 1:3. A relação água cimento foi fixada em 0,48 e um aditivo superplastificante (Glenium 51) foi incorporado às misturas no teor de 0,7% em relação a massa de cimento. Neste estudo a autora analisou propriedades como índice de consistência, densidade de massa, teor de ar incorporado, resistência à tração na flexão e à compressão, propriedades térmicas, absorção por imersão e investigação da microestrutura (MEV).

Lemes (2016) obteve as seguintes conclusões: a medida que o teor de NTC foi aumentado nas argamassas, propriedades como índice de consistência, trabalhabilidade, densidade de massa decaíram. Em contrapartida, a autora percebeu um aumento no teor de ar incorporado com a variação de NTCs nas misturas. O traço de 0,3% de NTC apresentou um aumento na resistência a tração na flexão quando comparado com a argamassa padrão (de referência). O mesmo teor apresentou

melhores resultados de absorção. Ficou concluído que pode haver uma faixa ótima para a incorporação de nano partículas em compostos a base de cimento. Segundo a autora essa faixa está situada entre 0,3% e 0,5% de NTC.

Melo *et. al* (2011) adicionaram NTCPM em argamassas e verificaram o desempenho das misturas através de ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, investigação da microestrutura (MEV) e ensaio de massa específica (BET). A porcentagem de adição de NTCs foi estabelecida em 0,30% e 0,50% em relação a massa de cimento. O traço utilizado apresentou a relação 1:3 e foi composto por cimento CP V- ARI e areia do IPT. A relação água/ cimento foi estabelecida em 0,48 e o teor de aditivo (ADIMENT MC), à base de melamina-formaldeído, foi estipulado em 1,5% da massa de cimento. Após as desmoldagens, as amostras foram mantidas em cura úmida até a realização dos ensaios.

Melo *et.al* (2011) concluíram que para propriedades de resistência à compressão e módulo de deformação o desempenho das amostras com aditivo à base de melamina formaldeído não foi positivo. Apesar do baixo desempenho obtido para os ensaios de resistência à compressão axial e tração por compressão diametral, as amostras com 0,30% de NTC obtiveram melhores resultados quando comparados com o traço de 0,50% NTC. Através da análise microestrutural os autores identificaram feixes de nanotubos ligando uns grãos aos outros, que preencheram os poros existentes na pasta formando assim uma estrutura mais densa.

Batiston (2012) analisou o desempenho de pastas de cimento com a adição de NTCs nos teores de 0,05% e 0,10% de NTC em relação a massa de cimento. O autor realizou análise de calorimetria, parâmetros reológicos, desempenho mecânico (resistência à compressão axial), além do comportamento térmico através da difusidade térmica. Para a produção das misturas utilizou cimento CP I- S 32, pelo fato do mesmo reduzir a quantidade de adições reativas evitando a influência de outros componentes na interação da matriz com o NTC. Como aditivo, o autor utilizou superplastificante a base de policarboxilato (GLENIUM 51) no teor de 0,10% da massa de cimento. A relação a/c fixada em 0,30 com o objetivo de reduzir a porosidade no desempenho da matriz.

No estudo de Batiston (2012) foram analisados teores e modo de funcionalização distintos de NTC. Os NTCs funcionalizados com ácido nítrico e sulfídrico apresentaram melhor dispersão. O aumento da difusidade, segundo o autor,

é devido aos NTCs serem altamente condutores. Com relação aos parâmetros reológicos houve aumento da viscosidade e tensão de escoamento em todas as misturas compostas por nanotubo não funcionalizado.

Para Batiston (2012) esses resultados estão relacionados com a mobilidade das partículas na pasta. Com relação ao desempenho mecânico das misturas (resistência à compressão axial), o autor observou que com relação a resistência à tração, as amostras com presença de NTCs obtiveram resultados superiores as suas referências. Quando analisada a difusidade térmica, o autor percebeu melhores resultados nas amostras onde a funcionalização fora realizada com ácido sulfídrico e nítrico.

Borba *et al.* (2013) avaliaram os efeitos provocados pela adição de NTC em argamassas de reforço, o teor definido de paredes múltiplas foi 0,30% da massa de cimento. O traço estudado utilizou a proporção 1:3 composta basicamente por cimento (CP V-ARI) e uma composição de areia fina e média. A relação água cimento foi fixada em 0,35 e a dosagem de aditivo foi diferenciada para cada traço. Para os traços de referência e com nanotubos foi utilizado respectivamente 1,5% e 3,5% de aditivo superplastificante (Tec Flow 8000) em relação a massa de cimento.

No estudo, os supracitados autores analisaram propriedades como resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, absorção por imersão, densidade de massa e resistência a aderência à tração na flexão. Os resultados alcançados demonstraram não haver uma diferença significativa nos ensaios de resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e resistência a aderência à tração na flexão das argamassas com adição de NTC quando comparadas às argamassas de referência. Ao analisar os resultados de absorção por submersão o autor concluiu que as argamassas com NTC absorveram mais que as argamassas referência e com relação a densidade de massa não houve alteração significativa nos resultados.

Morais (2012) realizou análise experimental em produtos cimentícios, na qual os teores estudados foram 0,20%, 0,40% e 0,50% de NTCPM substituídos em relação a massa de cimento. O autor utilizou um traço com relação 1:3, cimento CEM I 52,5 R VNC – EM 197,1, areia fina e relação água/ cimento de 0,50. O teor de aditivo superplastificante (ADVA Flow 401) estipulado foi 1,0% com relação a massa de cimento, sendo este à base de policarboxilato. o referido autor verificou o desempenho das argamassas através de ensaios de resistência à compressão axial, resistência à

tração por compressão diametral, flexão, análise da microestrutura (MEV), módulo de elasticidade e densidade relativa. Moraes (2012) concluiu que a mistura de 0,40% de NTCPM em argamassas apresentou melhor eficiência em relação a mistura de referência, alcançando incremento cerca de 40% na resistência à compressão, 30% na resistência à tração, 25% no módulo de elasticidade dinâmico e 15% na resistência à flexão. Os resultados de massa específica relativa e aparente assim como a análise através do MEV e porosidade indicaram que o melhor desempenho foi obtido pelo compósito fabricado com 0,40% de NTCPM.

Em seus estudos, Marcondes (2012) incorpora NTCPM em concretos. Estudou o teor de 0,30% de NTCPM com relação a massa de cimento, definida a relação água/cimento de 0,55 com consumo de cimento de 352 Kg/m<sup>3</sup>. Para melhor trabalhabilidade da mistura foi utilizado aditivo superplastificante a base de policarboxilato (Tec Flow 8000), nos teores de 1% e 2% em relação a massa de cimento. O cimento utilizado foi o cimento Portland - CP V ARI, areia natural (enquadrada na zona utilizável), agregado graúdo (brita 1).

Marcondes (2012) estudou 4 traços, sendo um traço de referência (sem NTC), um traço com dispersão de nano tubos por ultrassom, outro traço sem dispersão (no qual o NTC foi misturado cimento), e por fim um traço com o NTCPM disperso comercialmente. O autor realizou ensaios mecânicos (resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral), além de migração de cloretos, absorção de água por imersão, pelo método do cachimbo. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial e de tração por compressão diametral mostraram que as amostras com dispersão de NTCPM proporcionaram um ganho de 36% e 19%, respectivamente em relação ao traço referência.

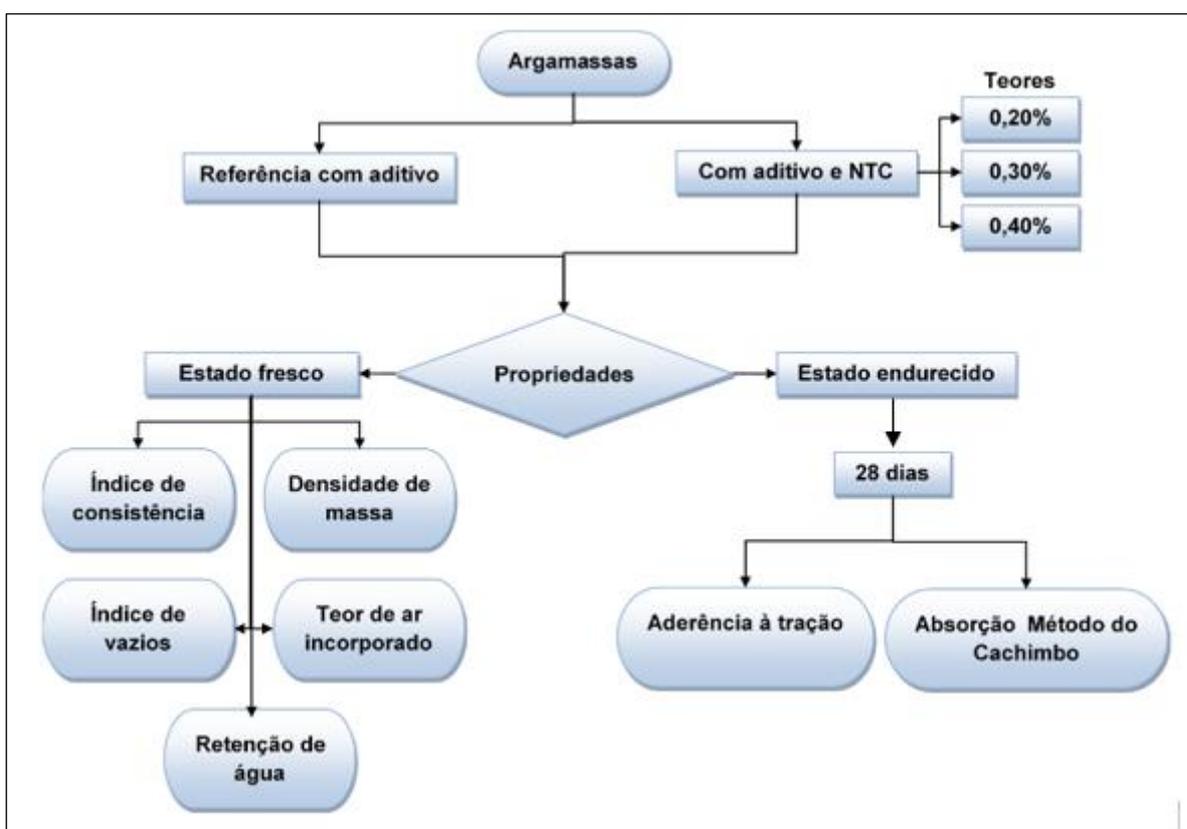
O autor observou através do ensaio de abatimento do tronco de cone que a reologia do concreto foi influenciada pelos NTCs, uma vez que houve redução do abatimento das misturas com a adição. A absorção, por imersão e permeabilidade à água reduziram com a adição de NTC.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão descritos os materiais e métodos que foram empregados para o desenvolvimento da pesquisa. O programa experimental foi dividido em cinco etapas. A primeira etapa correspondeu aos ensaios de caracterização dos materiais que foram utilizados na pesquisa. A dosagem, moldagem e cura dos traços foram realizadas na segunda etapa. Na terceira etapa da pesquisa, foram analisadas as argamassas no seu estado fresco, através dos ensaios de índice de consistência, densidade de massa, teor de ar incorporado e retenção de água.

Na quarta etapa foi realizada a moldagem dos corpos de prova e aplicação da argamassa no substrato padrão. A quinta etapa contemplou a caracterização das argamassas no estado endurecido, através das análises de absorção pelo método do cachimbo (CSTC,1982), resistência potencial de aderência à tração (NBR 15 258) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). A Figura 4 apresenta o fluxograma do programa experimental desenvolvido nessa pesquisa.

Figura 4 – Esquema do programa experimental



Fonte: Elaboração própria.

### 3.1 Materiais

Neste tópico os itens 3.1.1 a 3.1.6 estão apresentados os materiais utilizados no desenvolvimento deste estudo. Dentre os materiais utilizados destacam-se: o cimento Portland, areia, aditivo, água, as placas de substrato padrão de concreto e os nanotubos de carbono.

#### 3.1.1 Cimento Portland

O cimento Portland utilizado na produção das argamassas foi o CP V-ARI, produzido pela empresa Itambé. A caracterização físico-química e mecânica do material foi fornecida pelo fabricante do produto e estão apresentados Tabela 2.

A escolha deste cimento se justifica pelo mesmo não possuir adições pozolânicas em sua composição. De acordo com Chaipanich *et al.* (2010), os materiais pozolânicos podem interagir com os NTCs e interferir assim nos resultados, além disso os autores afirmam que a reação entre o CP V-ARI e o aditivo minimiza o retardamento de pega. Ademais, a fim de comparar e complementar os resultados deste estudo com a bibliografia, optou-se por utilizar o mesmo tipo de cimento.

Tabela 2 – Composição do Cimento CP V-ARI

Ensaio	Unidade	Resultados	Exigências
<b>Ensaio Químicos</b>			
Óxido de Magnésio – MgO	%	4,02	≤6,5
Trióxido de Enxofre - SO <sub>3</sub>	%	3,21	≤4,5
Perda ao Fogo	%	3,34	≤4,5
Resíduo Insolúvel	%	0,72	≤1
<b>Ensaio Físicos</b>			
Expansibilidade à quente	mm	0,27	≤5,0
Início de Pega	min	193	≥60
Fim de Pega	min	240	≤600
Água de consistência normal	%	29,8	não aplicável
Área específica (Blaine)	cm <sup>2</sup> /g	4.374	≥3.000
Índice de finura - # 200	%	0,04	≥6,0
<b>Resistência à Compressão</b>			
Resistência à Compressão - 1 dia	MPa	23	≥14
Resistência à Compressão - 3 dias	MPa	37,7	≥24
Resistência à Compressão - 7 dias	MPa	45,2	≥34
Resistência à Compressão - 28 dias	MPa	54,6	não aplicável

Fonte: Dados fornecidos pela empresa Itambé

### 3.1.2 Areia

Na composição dos traços de argamassa foi utilizada areia natural da ABNT, oriunda do rio Tietê e que atende às especificações da NBR 7214/82 (ABNT, 1982). Este material é comercializado em embalagens de 25kg, separados em frações granulométricas, de acordo com a abertura de malha das peneiras normatizadas. A composição da areia média se deu a partir da pesagem da porcentagem das frações de material retido na peneira com abertura de malha de #2,36mm, caracterizada como maior particulada mistura, atendendo os limites da zona ótima de utilização.

A caracterização do agregado miúdo foi realizada de acordo como procedimento recomendado pelas normas NBR NM 248 (ABNT, 2003) Agregados – Determinação da composição granulométrica e NBR NM 52 (ABNT, 2009): Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. A Tabela 3 apresenta os resultados de composição granulométrica.

Tabela 3 – Caracterização do Agregado Miúdo

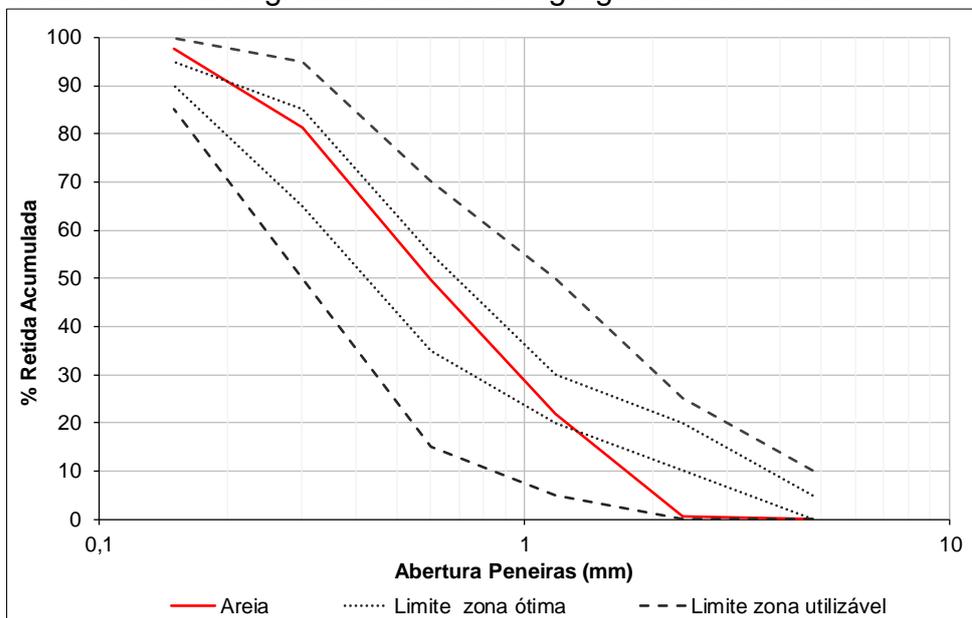
Abertura das peneiras (mm)	% Retida	% Retida Acumulada
9,5	0	0
6,3	0	0
4,75	0	0
2,36	0,46	0,46
1,18	21,24	21,71
0,6	28,05	49,76
0,3	31,64	81,40
0,15	16,15	97,56
Fundo	2,44	100,00
Total	100	-
<b>Diâmetro máximo (mm)</b>		2,36
<b>Módulo de Finura</b>		2,51
<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>		2,63

Fonte: Elaboração Própria

O módulo de finura obtido foi de 2,51, de acordo com Bauer (2010) a areia como finura média. O Gráfico 1 apresenta a curva granulométrica do material utilizado,

juntamente com os limites normativos especificados pela NBR NM 7211 (ABNT, 2009).

Gráfico 1 – Curva granulométrica do agregado miúdo natural



Fonte: Elaboração própria.

De acordo com o Gráfico 1, observa-se que a curva granulométrica do agregado miúdo se enquadra na zona utilizável.

### 3.1.3 Aditivo

O aditivo incorporado na mistura das argamassas é o GLENIUM 51, um superplastificante de terceira geração, baseado em uma cadeia de éter poli carboxílico modificado que atua como dispersante do material cimentício, proporcionando superplastificação e alta redução da quantidade de água, aumentando a trabalhabilidade da matriz cimentícia sem alterar o tempo de pega. Diferentemente de outros aditivos superplastificantes tradicionais (a base de naftaleno sulfonato ou melamina sulfonada) seu mecanismo de ação melhora sensivelmente a dispersão das partículas de cimento.

Na Tabela 4 estão apresentadas as especificações técnicas fornecidas pelo fabricante.

Tabela 4 – Especificações técnicas do aditivo

<b>Dados Técnicos</b>			
Função	Aditivo super plastificante de terceira geração		
Base Química	Éter policarboxílico		
Aspecto	Líquido		
Cor	Branco Turvo		
Ação secundária	Redutor de água		
Solubilidade em água	Total		
<b>Teste</b>	<b>Método BASF</b>	<b>Especificação</b>	<b>Unidade</b>
Aparência	TM 761B	Líquido branco turvo	Visual
Ph	TM 112B	5-7	-
Densidade	TM 103B	1,067-1,107	g/cm <sup>3</sup>
Sólidos	TM613B	28,5-31,5	%
Viscosidade	TM 117	<150	cps

Fonte: Dados fornecidos pela empresa BASF.

### 3.1.4 Água

Na produção das argamassas foi utilizada água potável proveniente do sistema de abastecimento de água de Alegrete/RS.

### 3.1.5 Substrato padrão

As argamassas foram aplicadas sobre um substrato padrão a fim de verificar a funcionalidade de diferentes argamassas sob condições específicas existentes (com porosidade, rugosidade e absorção normatizados). A Figura 5 apresenta as placas de substrato padrão de concreto, com dimensões de 25cm x 50cm e espessura de 20mm, confeccionados e ensaiados de acordo com os procedimentos da NBR 1408-2 (ABNT, 2015).

Figura 5 – Substrato padrão

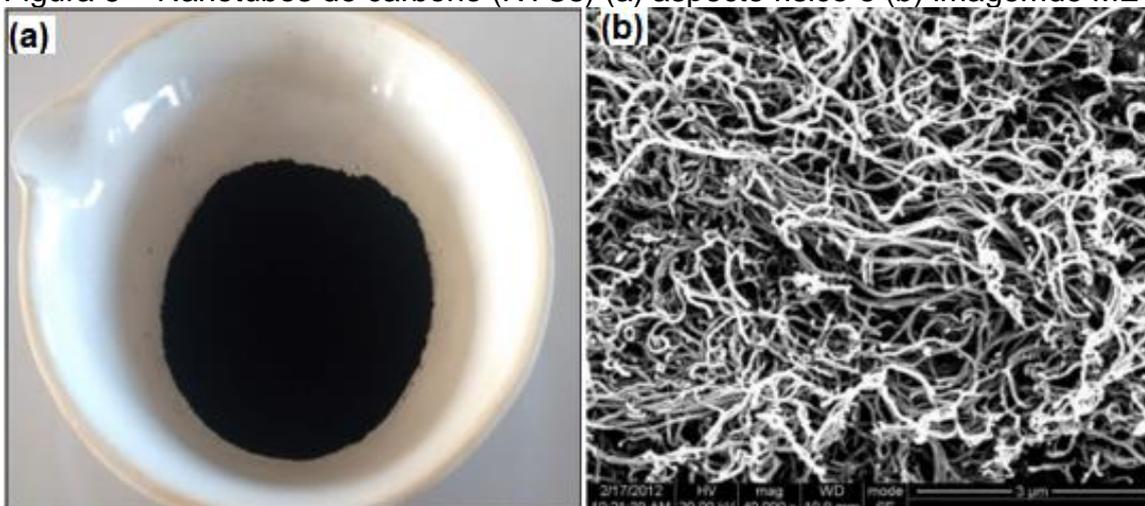


Fonte: Acervo da autora.

### 3.1.6 Nanotubos de carbono (NTC)

Os NTCs utilizados são de paredes múltiplas, sem nenhum tratamento superficial, sintetizados pelo método de deposição química a vapor ou também conhecida como CVD- *Chemical Vapor Deposition*- comercialmente são nomeados de TNIM4. Os mesmos foram adquiridos da empresa *Timesnano*, localizada na China. A Figura 6 apresenta o aspecto físico deste material e o aspecto microscópico do material.

Figura 6 – Nanotubos de carbono (NTCs) (a) aspecto físico e (b) imagem de MEV



Fonte: Lemes (2016).

As propriedades dos nanotubos utilizados nesta pesquisa estão apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Propriedades dos nanotubos de carbono

<b>Características do Nanotubo de Carbono</b>	
Pureza (%)	90
Diâmetro Externo (mm)	$1 \times 10^{-6}$ a $30 \times 10^{-6}$
Diâmetro Interno (mm)	$5 \times 10^{-6}$ a $10 \times 10^{-6}$
Comprimento (mm)	0,010 a 0,030
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	2,1
Fator de Forma (L/d)	300 a 1000
Área Superficial (m <sup>2</sup> /g)	>140
Condutividade Elétrica (s/cm)	>100
Coloração	Preto

Fonte: Dados fornecidos pela empresa Timesnano.

### 3.2 Procedimento de dosagem e mistura das argamassas

Para o desenvolvimento do programa experimental foi estabelecido um traço de referência de argamassa, para permitir a comparação deste com argamassas com adição de NTC. O traço de argamassa padrão foi fixado em 1:3 (cimento: areia) e com relação água/cimento de 0,48, de acordo com as prescrições da NBR 7215 (2019). Foram confeccionados quatro traços diferentes de argamassas, o primeiro traço foi um traço composto por cimento, areia, água e aditivo. Os demais traços variaram-se porcentagem de NTCs adicionadas na mistura sendo 0,20%, 0,30% e 0,40% de NTC em massa adicionados respectivamente.

Inicialmente o objetivo era analisar se haveria alguma influência do aditivo no comportamento das argamassas, no entanto ao moldar a argamassa sem aditivo não foi possível obter um índice de consistência dentro do limite normativo e também não foi possível a moldagem da placa. Então, foram redefinidos os traços e nomenclaturas utilizados no estudo, os mesmos apresentam uma relação de 1:3 em massa, a relação dos traços desenvolvidos está descrita na Tabela 6.

Tabela 6 – Traço em massa para a argamassa de dosagem 1:3 em massa

Nomenclatura	Cimento	Areia	NTC (%)	a/c	Aditivo (%)
AR	1	3	-	0,48	0,7
AN20	1	3	0,2	0,48	0,7
AN30	1	3	0,3	0,48	0,7
AN40	1	3	0,4	0,48	0,7

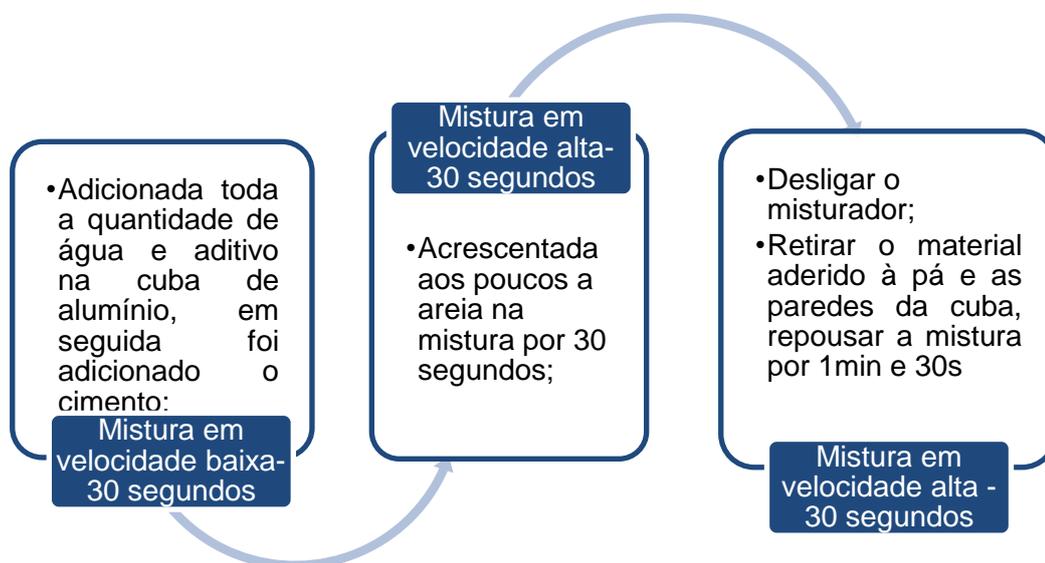
**AR:** argamassa de referência (sem nanotubos);  
**AN20:** argamassa contendo NTCs no teor de 0,20% do peso do cimento;  
**AN30:** argamassa contendo NTCs no teor de 0,30% do peso do cimento;  
**AN40:** argamassa contendo NTCs no teor de 0,40% do peso do cimento.

Fonte: Elaboração própria.

### 3.2.1 Mistura da argamassa de referência

As etapas de execução da produção da argamassa de referência (AR) foram executadas de acordo com as recomendações da NBR 13276 (ABNT, 2016): Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. A mistura dos materiais para a produção da argamassa referência seguiu a sequência apresentada na Figura 7.

Figura 7 – Etapas de produção da argamassa referência



Fonte: Elaboração própria

### 3.2.2 Mistura da argamassa com nanotubos de carbono (NTCs)

De acordo com a metodologia adotada por Marcondes (2012), Borba *et al.* (2013) e Lemes (2016), é extremamente importante realizar a dispersão dos NTCs como forma de reduzir o desvio padrão entre as amostras. Os procedimentos de dispersão adotados foram baseados nos estudos dos autores citados, os NTCs foram adicionados às argamassas em dispersão aquosa, a fim de distribuir os nanotubos de forma mais uniforme em toda a mistura cimentícia.

Os NTCs foram dispersos utilizando o equipamento comercialmente encontrado como lavadora ultrassônica, modelo USC-1400A, com frequência ultrassônica de 40kHz. O procedimento utilizado para realizar a dispersão foi o método indireto, o qual consiste em adicionar água no equipamento e submergir os béqueres com os NTCs dispersos em solução aquosa.

Após a pesagem dos componentes, diluiu-se o aditivo em água em um béquer. Seguidamente os NTCs foram adicionados à mistura. A Figura 9 apresenta as etapas de execução da dispersão dos nanotubos de carbono. No decorrer do processo a temperatura da água de imersão foi controlada, variando entre 20 e 30°C de modo que, toda vez que a temperatura ultrapassava 30°C a água de imersão era trocada.

Figura 8 – Etapas de execução da dispersão dos NTCs



Fonte: Elaboração Própria.

Os procedimentos para a produção das argamassas, realizados após a dispersão da solução, foram os mesmos utilizados no traço referência. De acordo com Folya *et al.* (2016) o ultrassom é essencial para na dispersão dos nanotubos de carbono. Ele cria tensões de cisalhamento entre os mesmos, o que facilita a entrada do tensoativo entre eles portanto separando-os.

### **3.2.3 Moldagem e cura dos corpos de prova**

A resistência potencial de aderência à tração de argamassas e o ensaio de absorção pelo método do cachimbo foram realizados na argamassa aplicada sobre o substrato padrão normatizado. Portanto, antes de executar-se o ensaio foi necessário moldar a placa, este processo iniciou realizando a imprimação do substrato com argamassa, posteriormente, na data do ensaio, foram delimitados os corpos de prova. A Figura 9 apresenta o processo de preparação das amostras. Antes de iniciar a fixação do gabarito, o substrato foi posicionado sobre uma base plana e firme e a superfície foi limpa com pincel de cerdas de náilon. O gabarito possui as mesmas dimensões da placa com profundidade uniforme para aplicação de argamassa de  $18\pm 2$  mm, segundo as especificações da NBR 15258 (ABNT,2005).

Figura 9 - Aplicação da argamassa sobre o substrato padrão



Fonte: Elaboração própria.

Após 24 horas foi retirado o gabarito de maneira cuidadosa para não afetar a argamassa aplicada, os substratos revestidos permaneceram em laboratório até a data de ruptura (28 dias).

### 3.3 Caracterização das argamassas no estado fresco

Nesta seção, nos itens 3.3.1 ao 3.3.3 estão apresentados os ensaios para a caracterização das argamassas no estado fresco, de acordo com o programa experimental deste trabalho.

#### 3.3.1 Ensaio do índice de consistência

Este ensaio foi realizado seguindo prescrições da NBR 13276 (ABNT, 2016). A execução do ensaio ocorreu no laboratório respeitando condições de temperatura e umidade relativa estipuladas por norma, sendo respectivamente de  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$  e  $60\pm 5\%$ .

Os materiais utilizados para a realização do ensaio foram: balança com resolução de 0,1g, mesa de consistência, molde de tronco cônico, soquete metálico, trena e misturador mecânico.

Após a realização da mistura da argamassa e umedecimento do molde e da mesa de consistência, o molde foi centralizado sobre a mesa e o preenchimento ocorreu em três camadas de argamassa, de acordo com a norma, aplicando em cada uma delas respectivamente 15 (quinze), 10 (dez) e 5 (cinco) golpes com o soquete. O material excedente foi rasado com o auxílio de uma régua.

Em seguida, o molde troncocônico foi retirado e então foi acionada a manivela para que a mesa subisse e caísse 30 vezes durante a faixa de tempo de 30 (trinta) segundos. Após a última queda, efetuou-se a leitura do espalhamento da argamassa com uma régua metálica. Efetuou-se as leituras em três diâmetros diferentes ao longo do perímetro, todas as etapas efetuadas neste procedimento estão demonstradas na Figura 10.

Figura 10 – Etapas de realização do ensaio de índice de consistência



Fonte: Elaboração própria.

Este ensaio foi realizado a fim de estudar a influência do teor de NTC na consistência das argamassas. A fim de estipular um padrão a relação água/cimento foi fixada em 0,48.

### 3.3.2 Ensaio de densidade de massa e teor de ar incorporado

A densidade de massa e o teor de ar incorporado foram determinados de acordo com as prescrições da NBR 13278 (ABNT, 2005). Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos- Determinação da densidade de massa e teor de ar incorporado. Utilizou-se para a execução do ensaio um recipiente cilíndrico de aço inox em condições estipuladas por norma, o mesmo foi pesado antes do início do ensaio ( $m_v$ ).

Após o preparo da argamassa, com o auxílio de uma colher, foram adicionadas três porções de argamassa formando três camadas de alturas aproximadamente iguais. Em cada camada foram aplicados 20 (vinte) golpes com a espátula na posição vertical para eliminar os vazios presentes entre a argamassa e a parede do recipiente, por fim, foram efetuadas três quedas no recipiente, o excesso de argamassa foi retirado através do rasamento da superfície e o conjunto pesado ( $m_c$ ).

A densidade de massa da argamassa ( $d$ ) foi determinada através da equação 1.

$$d = \frac{m_c - m_v}{v_r} 1000 \quad \dots(1)$$

Onde:

$d$  é a densidade massa da argamassa no estado fresco, em Kg/m<sup>3</sup>;

$m_c$  é a massa do recipiente cilíndrico contendo a argamassa de ensaio, em g;

$m_v$  é a massa do recipiente cilíndrico vazio, em g;

$v_r$  é o volume do recipiente cilíndrico, em cm<sup>3</sup>.

O teor de ar incorporado na argamassa ( $A$ ) é determinado pela equação 2

$$A = 100 \left( \frac{d}{d_t} \right) \quad \dots(2)$$

Onde:

$A$  é o teor de ar incorporado, expresso em porcentagem (%)

$d$  é o valor da densidade de massa da argamassam, em g/cm<sup>3</sup>;

$d_t$  é o valor da densidade de massa teórica da argamassa, em g/cm<sup>3</sup>, sem vazios.

A densidade de massa teórica ( $d_t$ ) deve ser calculada pela equação 3.

$$d_t = \frac{\sum m_i}{\sum m_i / \gamma_i} \quad \dots(3)$$

Onde:

$m_i$  é a massa seca de cada componente da argamassa, somado a massa de água;

$\gamma_i$  é a massa específica de cada componente da argamassa.

### 3.3.3 Ensaio de retenção de água

O ensaio de retenção de água foi determinado de acordo com os procedimentos estabelecidos pela NBR 13 277 (ABNT, 2005) - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos- Determinação da retenção de água. Os materiais utilizados para a realização deste ensaio foram funil de Bunchner com bomba de vácuo, discos de papel, soquete metálico, régua metálica, balança e cronômetro.

O material de ensaio foi preparado de acordo com as prescrições da norma. Antes de preencher o prato com argamassa até pouco acima da borda o conjunto: funil/papel filtro úmido e prato foi pesado e determinou-se  $m_v$ . Após a argamassa foi adensada e o excesso da mesma retirado. O conjunto foi pesado antes de ser aplicada a sucção ( $m_a$ ). Por fim, imediatamente após a aplicação da sucção o conjunto foi pesado novamente e determinou-se a sua massa ( $m_s$ ). As etapas detalhadas de realização do ensaio estão apresentadas na Figura 11.

Figura 11 – Etapas de execução do ensaio de retenção de água



Fonte: Elaboração própria.

A retenção de água ( $R_a$ ) é determinada através da equação 4.

$$R_a = \left[ \frac{(m_a - m_s)}{AF (m_a - m_v)} \right] 100 \quad \dots(4)$$

Sendo:

$$AF = \frac{m_w}{m - m_w}$$

Onde:

$R_a$  é a massa do conjunto com argamassa, em g;

$m_s$  é a massa do conjunto após a sucção, em g;

$m_v$  é a massa do conjunto com vazio, em g;

AF é o fator de água/argamassa fresca;

$m_w$  é a massa total de água acrescentada à mistura, em g;

$m$  é a soma das massas dos componentes anidros no caso de argamassa de obra, em g;

### 3.4 Caracterização das argamassas no estado endurecido

Nesta seção, nos itens 3.4.1 ao 3.4.3 estão apresentados os ensaios para a caracterização das argamassas no estado endurecido, de acordo com o programa experimental deste trabalho.

#### 3.4.1 Absorção de água pelo Método do Cachimbo

Para avaliar a capacidade de estanqueidade das argamassas com diferentes teores de NTCs foi utilizado o método do cachimbo. Este método foi proposto pelo *Centre Scientifique et Technique de La Construction- CSTC* e pela *Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches- RILEM*.

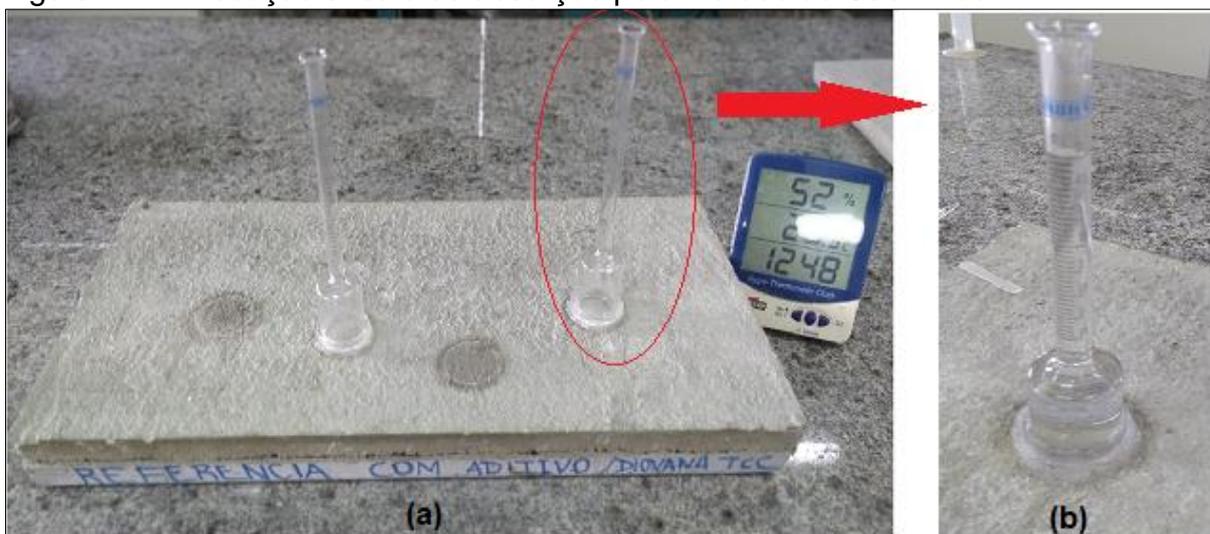
O cachimbo de piso é um tubo de vidro, graduado em décimos de milímetros. Possui uma borda plana e circular no fundo. A absorção de água de um revestimento argamassado é avaliada sob uma pressão inicial de 92 mm de coluna água, que corresponde à ação estática de um vento com velocidade aproximadamente de 140 km/h, onde a altura da coluna de água corresponde à pressão exercida de modo que 1 mm corresponde 10 Pa(6).

De acordo com o método proposto pela *CSTC* o cachimbo foi fixado junto ao revestimento argamassado e então preenchido com e a coluna de água até o nível zero. A diminuição da altura de água ao longo do tempo foi utilizada como indicativo de vulnerabilidade do material à penetração de água.

Parara realização do ensaio foram utilizados os seguintes materiais: pisseta plástica, silicone em bisnaga, cachimbo de vidro confeccionado conforme

recomendações do CSTC e cronômetro. Primeiramente o cachimbo foi fixado na superfície argamassada com silicone, após a secagem do silicone, com o auxílio da pisseta, o cachimbo foi preenchido de água até a referência, o nível zero, e acionou-se o cronômetro. A leitura da diminuição do nível da água em  $\text{cm}^3$  foram efetuadas a cada minuto até completar 15 minutos de ensaio, conforme proposto por Selmo (1989). A Figura 12 apresenta os procedimentos utilizados neste ensaio. Cada placa foi ensaiada em 4 pontos diferentes.

Figura 12 – Execução ensaio de absorção pelo Método do Cachimbo



Fonte: Elaboração própria.

### 3.4.2 Resistência potencial de aderência à tração

A metodologia de determinação da resistência potencial de aderência à tração de argamassas para revestimento de paredes e tetos descrita pela NBR 15 258 de 2005. Este ensaio foi realizado atendendo o tempo mínimo de cura de 28 dias da argamassa de revestimento para cada uma das composições estudadas. Adotou-se para cada traço de revestimento a execução de 12 corpos de prova no formato circular.

A primeira fase do ensaio foi efetuar o corte com a serra copo na argamassa com o objetivo de delimitar os corpos de prova, todas as recomendações prescritas em normas foram atendidas. Após o corte do revestimento foi realizada a colagem das pastilhas com resina epóxi, a secagem da mesma seguiu o tempo estipulado pelo fabricante a fim de que a fixação da pastilha fosse de forma adequada.

A última etapa do ensaio consistiu na aplicação do esforço de tração, onde o aparelho de arranchamento foi acoplado a pastilha, executando o esforço de tração de forma perpendicular à seção transversal do corpo de prova com taxa de carregamento a ser definida, até a ruptura da amostra. A carga de ruptura foi anotada, o corpo de prova foi medido e a forma de ruptura anotada.

A forma de ruptura leva em consideração se a ruptura ocorreu:

- No substrato (S);
- Na interface substrato/argamassa (S/A);
- Na argamassa (A);
- Ou foi falha na colagem da peça metálica (F).

Por fim, foi efetuado o cálculo de aderência a tração, a qual foi determinada através da equação 5.

$$R_a = \frac{P_i}{A_i} \quad \dots(5)$$

Onde:

$R_a$  é a resistência potencial de aderência à tração, em megapascals (MPa);

$P_i$  é a carga de ruptura, em Newton (N);

$A_i$  é a área da pastilha, em milímetros quadrados (mm<sup>2</sup>).

As etapas deste ensaio estão descritas através da Figura 13.

Figura 13 – Etapas de execução do ensaio de arrancamento



Fonte: Elaboração própria.

### 3.4.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Após a finalização dos ensaios, com o objetivo de observar a disposição e o comportamento dos NTCs adicionados às argamassas em estudo, foram coletadas amostras das argamassas. As mesmas foram analisadas no microscópio eletrônico de varredura da marca ZEISS EVO – MA10 do Laboratório de Microscopia da Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA, campus Alegrete (Figura 14).

Figura 14 – Microscópio eletrônico de varredura



Fonte: Elaboração Própria.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção estão apresentados e analisados os resultados obtidos nesta pesquisa referentes ao comportamento das argamassas, referência e com adição de nanotubos de carbono, no estado fresco e endurecido. Nos itens 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 apresentam respectivamente os resultados de caracterização das argamassas no estado fresco.

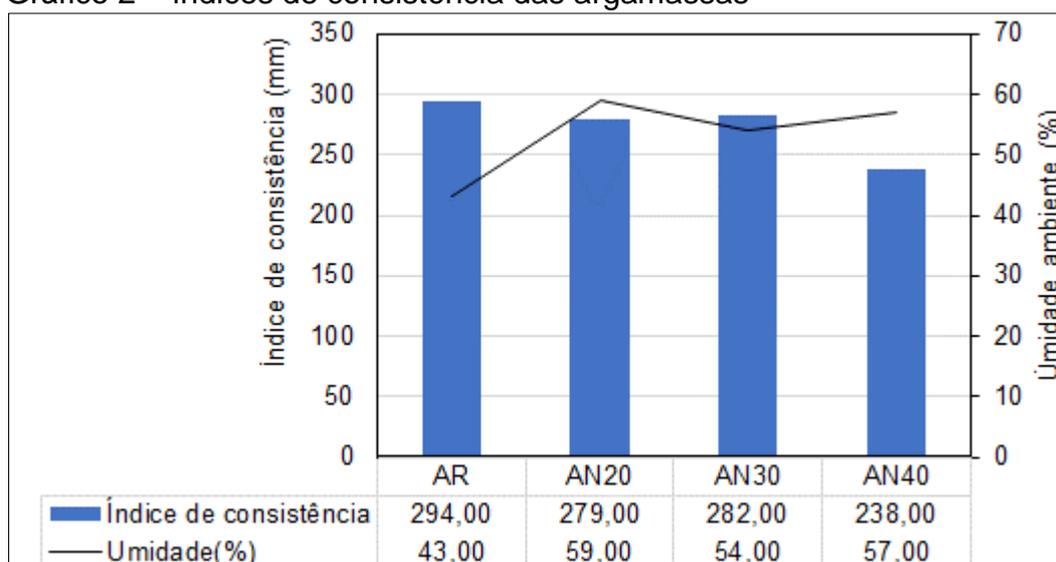
### 4.1 Caracterização das argamassas no estado fresco

Este subitem está apresentada a caracterização das argamassas no estado fresco, onde foram estudadas propriedades como índice de consistência, densidade de massa e teor de ar incorporado e retenção de água.

#### 4.1.1 Índice de consistência

O Gráfico 2 apresenta os índices de consistência dos quatro traços estudados, os resultados foram obtidos através da realização do ensaio seguindo a NBR 13726 (ABNT, 2002), que sugere que sejam realizadas três medidas de índice de consistência a cada moldagem. O índice de consistência ideal foi fixado em  $250 \pm 30$  mm.

Gráfico 2 – índices de consistência das argamassas



Fonte: Elaboração própria.

De acordo com o Gráfico 2 é possível perceber uma tendência de perda da consistência das argamassas com o aumento do teor de adição de NTCs nas misturas. Verifica-se que quanto maior a quantidade de finos incorporados nas argamassas, menor o índice de consistência e, por consequência, menor a sua trabalhabilidade considerando a mesma relação água/cimento e a mesma quantidade de aditivo.

Com a adição de 0,20% de NTC, ocorreu uma redução de 5,1% do índice de consistência em relação à argamassa referência, com o traço de 0,30% de NTC, a redução foi de 4% e com o traço de 0,40% de NTC, o índice de consistência foi de 19% maior em relação ao traço referência.

#### 4.1.2 Densidade de massa e teor de ar incorporado

Foram executados para cada traço um ensaio de densidade de massa e teor de ar incorporado. Os resultados dessas propriedades são apresentados na Tabela 7.

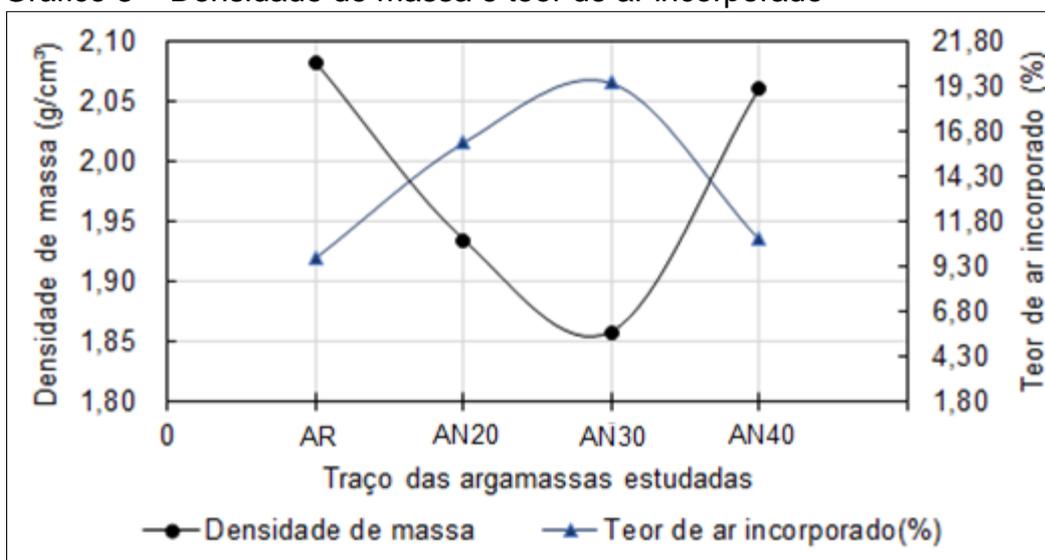
Tabela 7 – Densidade de massa e teor de ar incorporado

Parâmetros	AR	AN20	AN30	AN40
Densidade de massa (g/cm <sup>3</sup> )	2,08	1,93	1,86	2,06
Teor de ar incorporado (%)	9,78	16,18	19,51	10,82

Fonte: Elaboração própria.

Analisando a Tabela 7 verifica-se, ao comparar as argamassas com NTC com a argamassa referência, que quanto maior a porcentagem de adição de NTCs menor o valor de densidade de massa. No entanto, é possível verificar que ocorre um aumento no teor de ar incorporado com o aumento da porcentagem de adição de NTCs. O Gráfico 3 apresenta a correlação entre a densidade de massa e o índice de vazios entre as argamassas estudadas.

Gráfico 3 – Densidade de massa e teor de ar incorporado



Fonte: Elaboração própria.

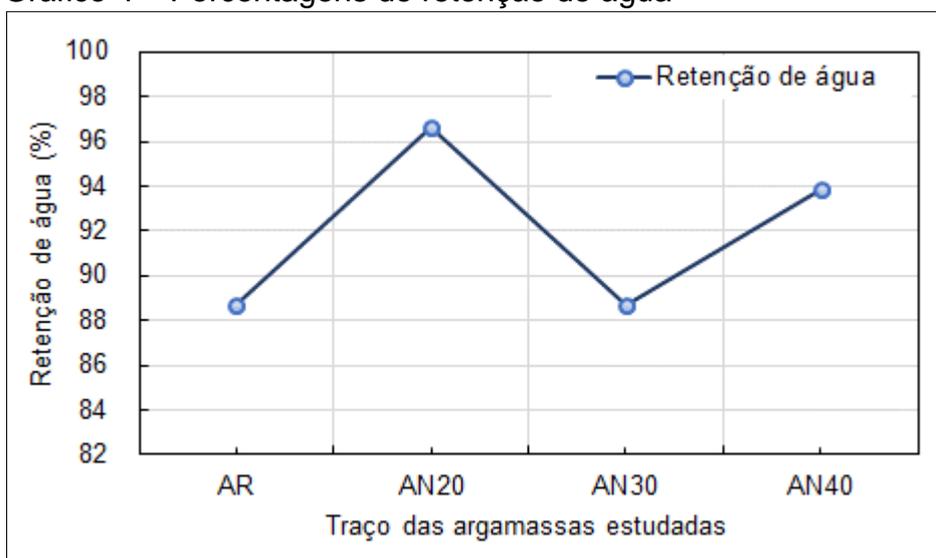
Os resultados apresentados no Gráfico 3 confirmam que existe uma relação inversamente proporcional entre a densidade de massa e o teor de ar incorporado. É possível perceber que quanto menor a densidade de massa, maior o teor de ar incorporado. Um fator que pode ter influenciado nestes resultados é a concentração de NTCs durante a dispersão, pois foi mantida a mesma quantidade de água para as diferentes teores de NTCs. Acredita-se que para a argamassa AN40, a quantidade de água tenha sido insuficiente para dispersar em sua totalidade os NTCs na solução.

Conforme a NBR 13281/01 (ABNT,2005), a qual classifica as argamassas de acordo com a densidade de massa no estado fresco, pode-se verificar que a argamassa de referência é classificada como D5 pois apresenta densidade de massa maior que  $1,8\text{g/cm}^3$  e inferior a  $2,20\text{g/cm}^3$ . As argamassas AN20 e AN30 classificam-se como D4 pois os valores obtidos através do ensaio de densidade de massa se enquadram no intervalo de  $1,6$  a  $2,0\text{g/cm}^3$ . E por fim, a argamassa AN40 também foi classificada, assim como a AR, como D5.

#### 4.1.3 Retenção de água

A retenção de água foi determinada de acordo com os procedimentos estabelecidos pela NBR 13277 (ABNT,2005), a qual prescreve que o ensaio seja realizado até 15 minutos após a moldagem, para cada traço estudado. O Gráfico 4 expressa o comportamento resultados de retenção de água obtidos através da realização deste ensaio.

Gráfico 4 – Porcentagens de retenção de água



Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 8 apresenta os resultados do ensaio de retenção, bem como a temperatura e umidade no momento de realização do ensaio.

Tabela 8 – Retenção de água das argamassas

Parâmetros	AR	AN20	AN30	AN40
Retenção de água (%)	89	97	89	94
Temperatura (°C)	25,10	18,30	20,00	23,00
Umidade (%)	43	59	54	57

Fonte: Elaboração própria.

De acordo com a NBR 13281 (ABNT, 2005), as argamassas se enquadram respectivamente: argamassa referência classificada como U3 e U4, a argamassa com adição de 0,20% de NTC foi classificada como U5 e U6, a argamassa com 0,30% de NTC se enquadrou na classe U3 e U4 e a argamassa com adição de 0,40% de NTC como classe U4 e U5.

#### 4.2 Caracterização das argamassas no estado endurecido

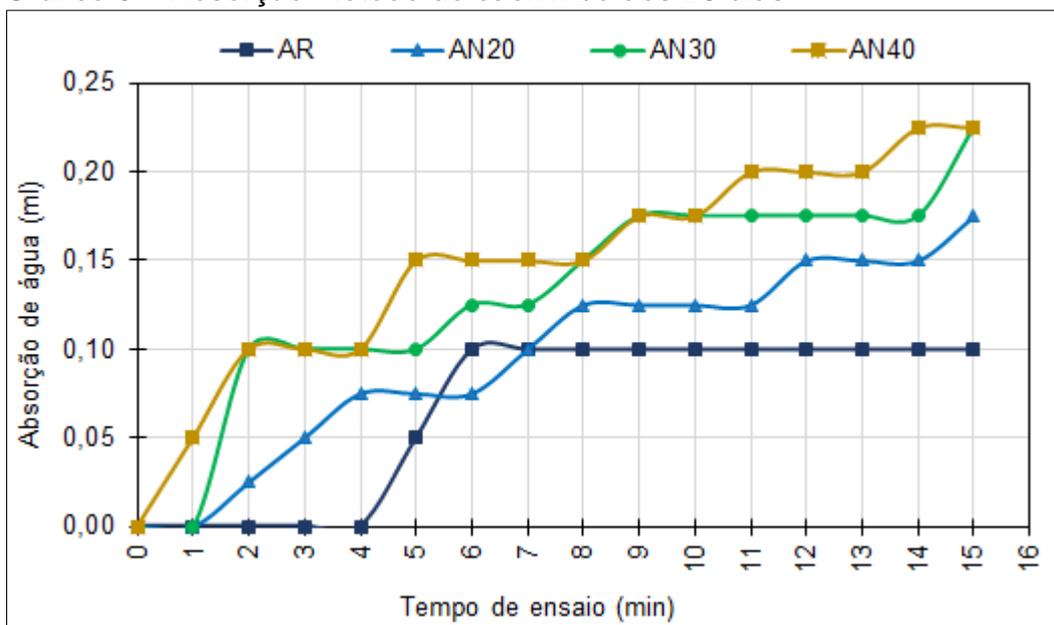
Neste subitem está apresentada a caracterização das argamassas no estado endurecido, onde foram estudadas propriedade como absorção de água através do Método do cachimbo e resistência potencial de aderência à tração.

#### 4.2.1 Absorção de água – Método do cachimbo

Foram realizados 32 ensaios sobre o revestimento argamassado, destes, 16 foram executados seguindo o intervalo de tempo estipulado pela norma CSTC (1982), o restante dos ensaios fora realizado até que toda a coluna d'água fosse absorvida pelo revestimento. Assim pode-se obter dados para analisar o tempo de 15 minutos (normalizado) e um intervalo de tempo maior que o estipulado por norma.

A seguir estão apresentados, na forma de gráficos, os resultados médios obtidos. O Gráfico 5 apresenta o aumento da permeabilidade do revestimento obtida com o ensaio do cachimbo, na idade de 28 dias, para todas as argamassas estudadas e aplicadas sobre o substrato padrão.

Gráfico 5 – Absorção método do cachimbo aos 28 dias



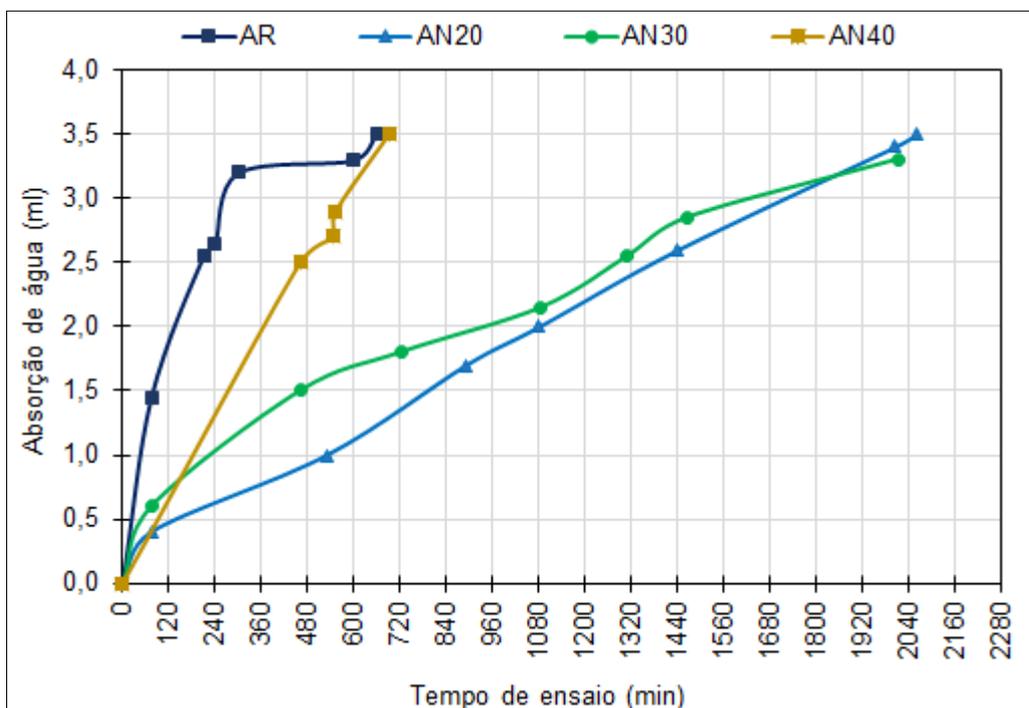
Fonte: Elaboração própria.

Observa-se através do Gráfico 5 a tendência do aumento da absorção de água para os traços com presença de NTC a decorrer do tempo de ensaio. No entanto, a argamassa referência apresentou crescimento da absorção até aproximadamente os 6 minutos de ensaio, após a absorção foi estabilizada em 0,10 mL até o fim dos 15 minutos de ensaio.

Ao final do ensaio realizado de absorção estipulado pela CSTC (1982) observa-se que a absorção é inversamente proporcional ao percentual de nanotubos de carbono nas argamassas. As maiores absorções foram observadas nos traços AN40 e AN30 seguidas dos traços AN20 e AR.

No Gráfico 6 estão apresentados os resultados de ensaios das placas. Cada substrato padrão revestido pela argamassa de revestimento foi submetido ao ensaio de absorção pelo método do cachimbo.

Gráfico 6 – Absorção 3,5 mL método do cachimbo



Fonte: Elaboração própria.

Através dos resultados apresentados no Gráfico 6 percebe-se que os traços AR e AN40 absorveram mais água nas primeiras horas. Comparados com os outros teores estudados, AN20 e AN30, o intervalo de diferença para absorção total das 3,5 mL foi cerca de 22 horas.

Os traços AN20 e AN30 apresentaram comportamento muito semelhante, praticamente, para ambos a duração do ensaio foi de aproximadamente 34 horas. Apesar do aumento no teor de ar de ar incorporado dessas argamassas em relação as demais (Gráfico 3), acredita-se que ocorreu alguma alteração na conexão dos poros, o que pode explicar a redução da absorção total de 3,5 mL (Método do Cachimbo). Ao estender o período de ensaio estipulado por norma foi possível perceber quais traços realmente absorvem mais rápido o mesmo volume de água.

#### 4.2.2 Resistência potencial de aderência

Neste estudo o número de amostras foi definido de acordo com as dimensões de uma placa cujo a distância mínima entre cada amostra foi estipulada pela NBR 15258 (ABNT,2005), buscou-se reduzir o coeficiente de variação entre as amostras, no entanto, como é evidenciado nas bibliografias, os mesmos são elevados. De acordo com Temp (2014), a elevada dispersão dos resultados está relacionada ao tipo de argamassas e substratos.

Desta forma, para esta variável foram avaliados 12 corpos de prova para cada um dos diferentes teores de substituição estudados, foram ensaiadas 4 argamassas aplicadas sobre o substrato padrão. Sendo essas os traços referência, 0,20%, 0,30% e 0,40% de NTC.

Após a realização do ensaio, levantamento das resistências de aderência do revestimento, efetuou-se a classificação das possíveis tipo de ruptura do conjunto através das nomenclaturas descritas no Quadro 4.

Quadro 4 – Tipologia de ruptura

Tipos de Ruptura	
<b>(S)</b>	Ruptura no substrato
<b>(S/A)</b>	Ruptura na interface substrato – argamassa
<b>(A)</b>	Ruptura na argamassa
<b>(A/F)</b>	Ruptura na interface cola-argamassa
<b>(F)</b>	Ruptura na cola- pastilha

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 15 apresenta dois, dos quatro tipos de ruptura obtidos nos corpos de prova ensaiados sendo respectivamente no substrato padrão e na interface argamassa-cola, representados em (a) e (b).

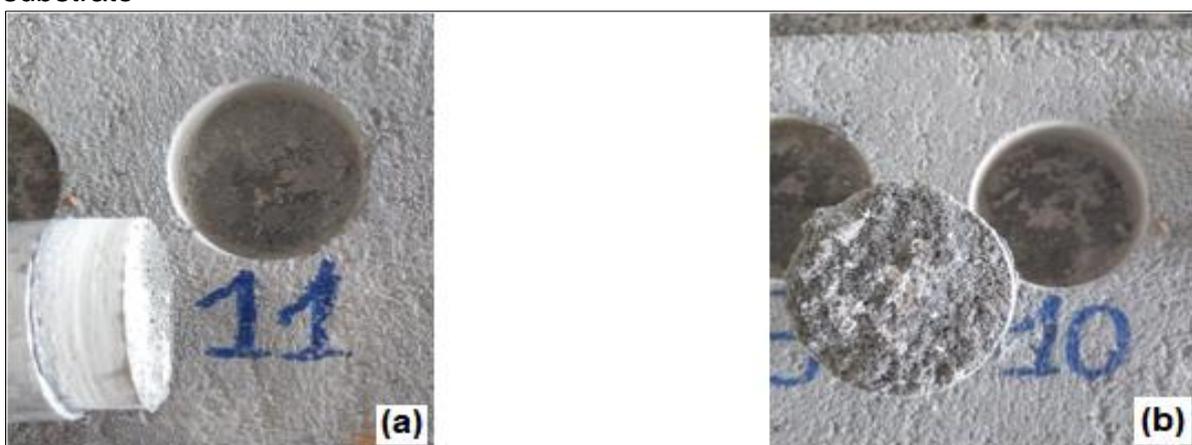
Figura 15 – Tipos de ruptura (a) no substrato e (b) na interface argamassa-cola



Fonte: Elaboração própria.

Outras formas de rupturas encontradas neste estudo foram as apresentadas na Figura 16 (a) e (b) onde apresentam respectivamente ruptura na argamassa e na interface argamassa/substrato.

Figura 16 – Formas de ruptura (a) na argamassa e (b) na interface argamassa-substrato



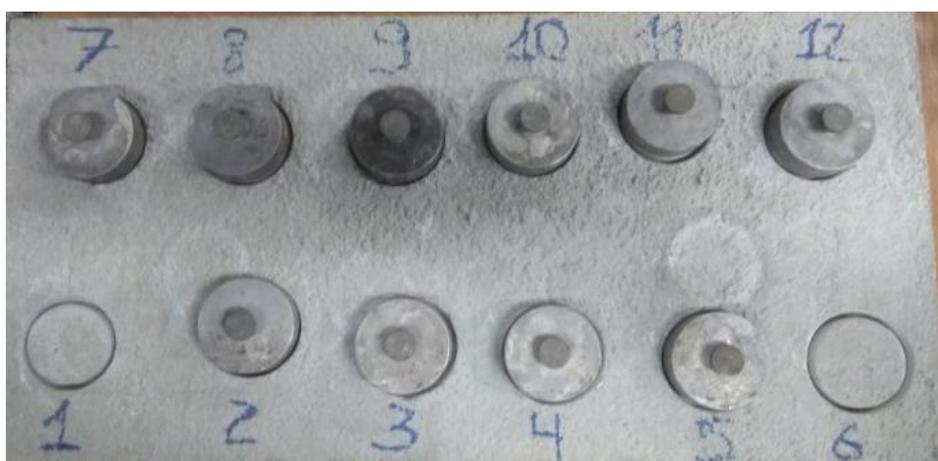
Fonte: Elaboração própria.

A fim de avaliar os dados obtidos, alguns valores foram retirados, estes foram os quais sofreram erro de execução do ensaio bem como valor de resistência muito disperso das demais amostras.

Na Tabela 9 estão apresentados os resultados obtidos durante a realização do ensaio de aderência à tração da argamassa correspondente ao traço referência. Percebe-se que a média da resistência obtida foi de 1,85 MPa, observando um desvio padrão amostral de 0,806 e coeficiente de variação de 43,48%

Tabela 9 – Resultados do ensaio de resistência à tração do revestimento - Traço referência

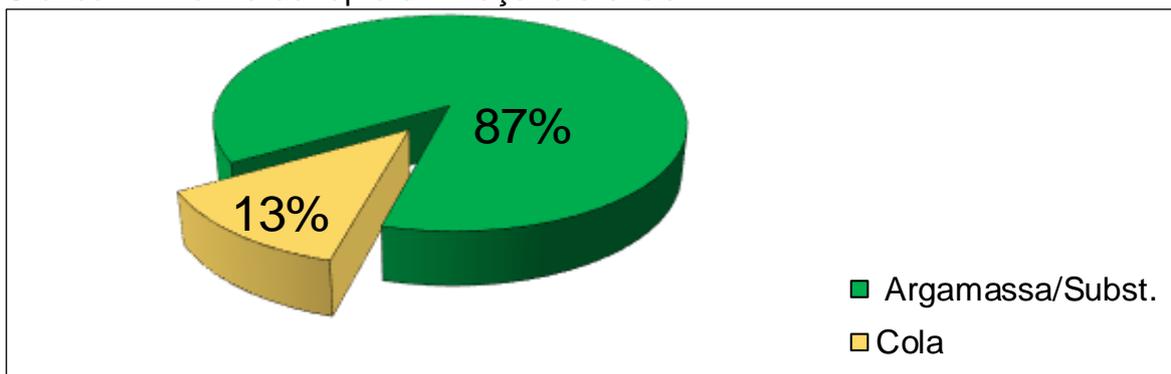
Substrato Padrão- Argamassa Traço de Referência					
Tipo	Corpo de Prova	Seção (mm <sup>2</sup> )	Carga (N)	Resistência de Aderência (MPa)	Forma de Ruptura
	1*	Amostra não ensaiada			
	2	1829,70	4128,75	2,26	S/A
	3	1804,00	2334,07	1,29	S/A
	4	1823,70	1627,96	0,89	S/A
	5	1809,80	2785,19	1,54	S/A
	6*	Amostra não ensaiada			
	7	1502,40	3765,89	2,51	F
	8	639,00	2039,86	3,19	F
	9	639,00	1873,14	2,93	F
	10	1803,80	2334,07	1,29	S/A
	11	1812,10	2049,66	1,13	S/A
	12	1805,30	2696,93	1,49	S/A
Resistência Média (MPa)				1,85	
Desvio-Padrão				0,81	
Coeficiente de Variação				43,48%	



Fonte: Elaboração própria.

As formas de ruptura foram basicamente de duas formas, como pode ser observado no Gráfico 7. Nota-se que a ruptura na interface argamassa/substrato apresenta maior ocorrência ao longo da realização dos ensaios, sendo essas: 67% da forma S/A (interface argamassa-substrato), 33% da forma F (ruptura cola).

Gráfico 7 – Forma de ruptura - Traço referência



Fonte: Elaboração própria.

Observando através do Gráfico 7 , constata-se que o traço de referência não apresenta apenas uma forma de ruptura característica. Nota-se que a ruptura na interface argamassa/substrato apresenta maior ocorrência ao longo da realização dos ensaios, sendo essa 87% com resistência média de 1,64 MPa. Outra forma de ruptura encontrada ao ensaiar a argamassa referência aplicada sobre o substrato padrão a porcentagem de ruptura na cola foi de aproximadamente 14% apresentando tensão média de 2,51 MPa.

Os resultados de aderência para o traço com 0,20% de adição de NTC encontram-se na Tabela 10.

Tabela 10 – Resultados do ensaio de resistência à tração do revestimento - Traço 0,20% NTC

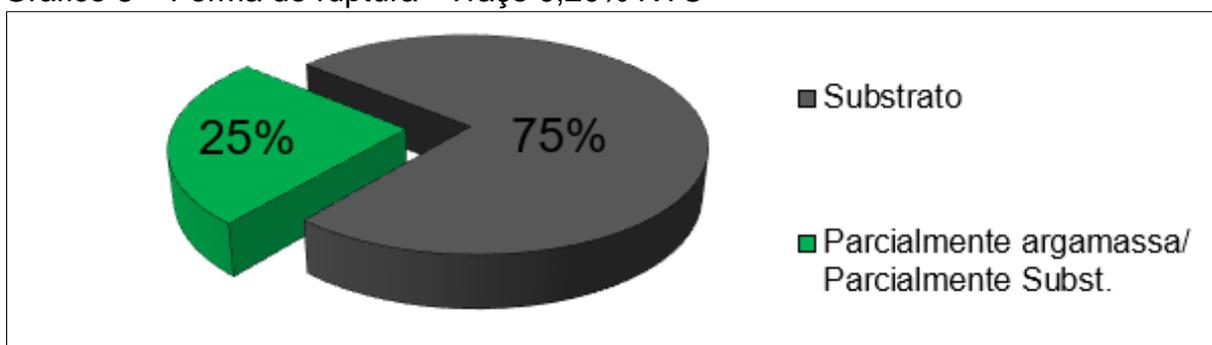
Substrato Padrão- Argamassa Traço 0,2% NTC					
	Corpo de Prova	Seção (mm <sup>2</sup> )	Carga (N)	Resistência de Aderência (MPa)	Forma de Ruptura
Tipo	1	1963,49	2412,52	1,23	F
	2	1543,66	2461,56	1,59	S
	3	1629,78	3285,34	2,02	S
	4	1534,85	2932,29	1,91	S
	5	1538,79	2167,35	1,41	S
	6	1488,90	2961,71	1,99	S
	7	1583,13	2726,35	1,72	S
	8	1543,89	2402,72	1,56	S
	9	1602,23	2030,05	1,27	S
	10	1609,34	3157,85	1,96	S
	11	1533,92	2275,22	1,48	S
	12	1531,38	2157,54	1,41	S/A
Resistência Média (MPa)				1,63	
Desvio-Padrão				0,28	
Coeficiente de Variação				17,50%	



Fonte: Elaboração própria.

As formas de ruptura foram basicamente de duas formas, como pode ser observado no Gráfico 8. Nota-se que a ruptura no substrato apresenta maior ocorrência ao longo da realização dos ensaios, sendo essas: 75% da forma S (substrato) atingindo resistência média de 1,63 MPa, o restante dos tipos de ruptura considerados for a da forma S/A (argamassa - substrato) com 1,66 MPa de resistência.

Gráfico 8 – Forma de ruptura - Traço 0,20% NTC



Fonte: Elaboração própria.

Na Tabela 11 estão apresentados os dados obtidos durante a realização do ensaio de aderência à tração da argamassa correspondente ao traço com 0,30% de adição de NTCs. Percebe-se que a média da resistência obtida foi de 1,80, observando um desvio padrão amostral de 0,50 e coeficiente de variação de 29,46%.

Tabela 11 – Resultados do ensaio de resistência à tração do revestimento - Traço 0,30% NTC

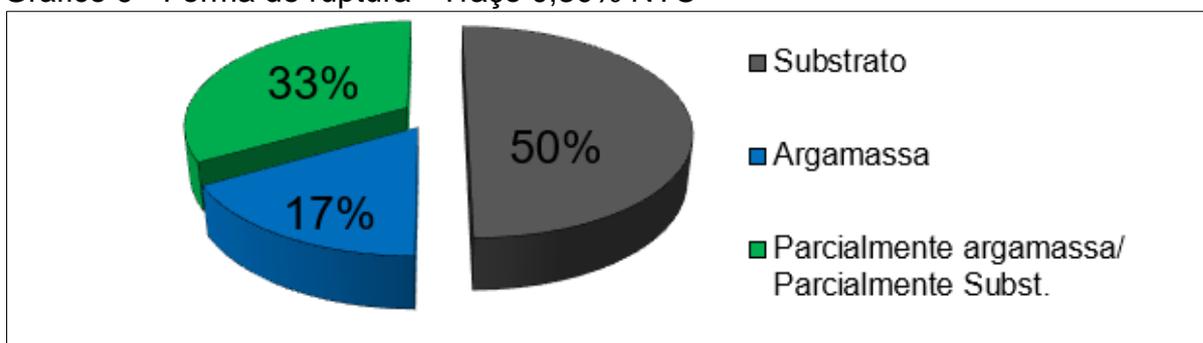
Substrato Padrão- Argamassa Traço 0,3% NTC						
	Corpo de Prova	Seção (mm <sup>2</sup> )	Carga (N)	Resistência de Aderência (MPa)	Forma de Ruptura	
Tipo	1	1963,50	1284,72	0,65	F	
	2	1901,42	3854,15	2,03	S	
	3	1546,21	3687,43	2,38	S	
	4	1682,44	2814,61	1,67	S	
	6	1771,56	3236,31	1,83	A	
	7	1780,02	3962,03	2,23	A	
	8	1773,30	3510,91	1,98	S/A	
	9	1732,00	2814,61	1,62	S	
	10*	Amostra não ensaiada				
	11*	Amostra não ensaiada				
	12*	Amostra não ensaiada				
	Resistência Média (MPa)				1,80	
Desvio-Padrão				0,53		
Coeficiente de Variação				29,46%		



Fonte: Elaboração própria.

As formas de ruptura foram basicamente de duas, como pode ser observado no Gráfico 9. Nota-se que a ruptura no substrato apresenta maior ocorrência ao longo da realização dos ensaios, sendo essas: 50% da forma S (substrato) com resistência média de 1,77 MPa, 33% da forma S/A com resistência média de 2,10 MPa (argamassa - substrato) e 17% das rupturas ocorreram na argamassa e obtiveram resistência média de 1,83 MPa.

Gráfico 9 - Forma de ruptura - Traço 0,30% NTC



Fonte: Elaboração própria.

Na Tabela 12 estão apresentados os dados obtidos durante a realização do ensaio de aderência à tração da argamassa correspondente ao traço com 0,40% de adição de NTCs. Percebe-se que a média da resistência obtida foi de 1,33 MPa, observando um desvio padrão amostral de 0,39 e coeficiente de variação de 29,54%.

Tabela 12 – Resultados do ensaio de resistência à tração do revestimento - Traço 0,40% NTC

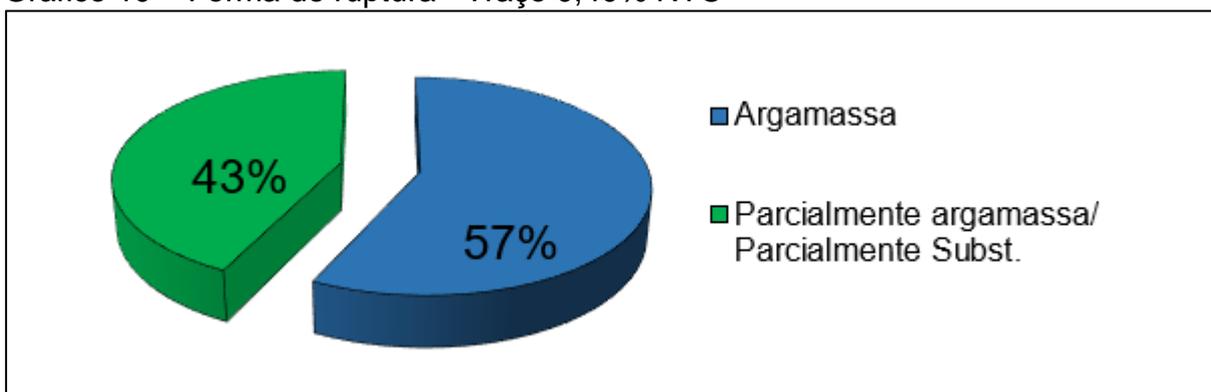
Substrato Padrão- Argamassa Traço 0,4% NTC					
	Corpo de Prova	Seção (mm <sup>2</sup> )	Carga (N)	Resistência de Aderência (MPa)	Forma de Ruptura
Tipo	1	1837,056	1814,30	0,99	A
	2	1891,39	2069,28	1,09	A
	3	1869,87	3089,21	1,65	A
	4	1831,74	3461,87	1,89	A
	5	1812,58	1480,86	0,82	S
	6	1863,49	2285,03	1,23	S/A
	7	1986,60	1824,10	0,92	S
	8	1861,45	2285,03	1,23	A
	9	1842,88	3658,01	1,99	A
	10	1900,65	2353,68	1,24	S/A
	11	1816,10	2844,03	1,57	A
Resistência Média (MPa)				1,33	
Desvio-Padrão				0,39	
Coeficiente de Variação				29,54%	



Fonte: Elaboração própria.

As formas de ruptura foram basicamente de duas formas, como pode ser observado no Gráfico 10

Gráfico 10 – Forma de ruptura - Traço 0,40% NTC



Fonte: Elaboração própria.

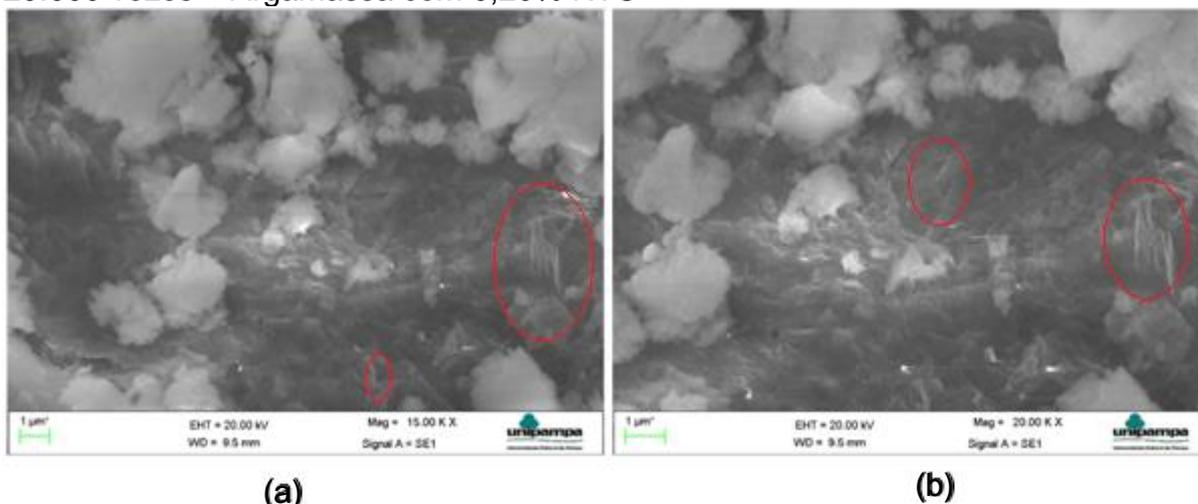
Nota-se que a ruptura na argamassa apresenta maior ocorrência ao longo da realização do ensaio, sendo essas: 57% da forma A (argamassa), com tensão média de 1,32 MPa, e 43% da forma parcialmente A e parcialmente S (parcialmente A/S) com resistência média de 1,45 MPa.

#### 4.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Através da microscopia eletrônica de varredura foi possível estudar a superfície das amostras de argamassa AR, AN20, AN30 e AN40, onde principal objetivo era entender o comportamento das argamassas com e sem adição de NTCs, identificar os produtos da hidratação do cimento e, se possível identificar os NTCs. As micrografias obtidas no ensaio foram de diferentes magnitudes, as argamassas foram retiradas de pontos aleatórios dos corpos de prova e serão discutidas a seguir.

A Figura 17 (a) e (b) ilustram as imagens produzidas a partir da amostra da argamassa AN20.

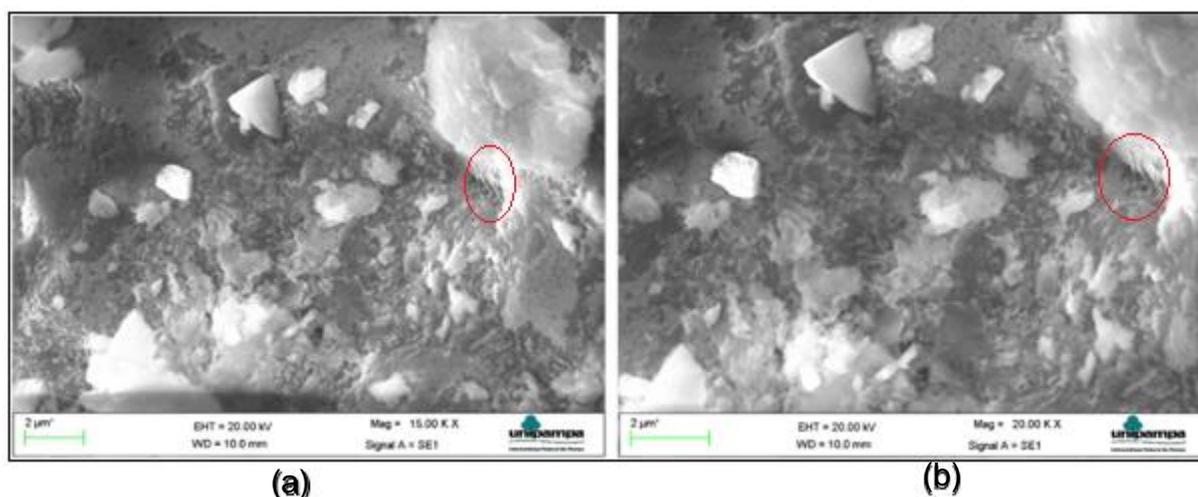
Figura 17 - Imagem MEV com (a) ampliação de 15.000 vezes e (b) ampliação de 20.000 vezes – Argamassa com 0,20% NTC



Fonte: Elaboração própria.

Para o traço com teor de adição de 0,20% de NTC foi identificada a presença de NTCs nas imagens analisadas. A Figura 18 ilustra as imagens produzidas a partir da amostra da argamassa AN30, é possível identificar algumas fibras, nas imagens analisadas, as mesmas estão em destaque.

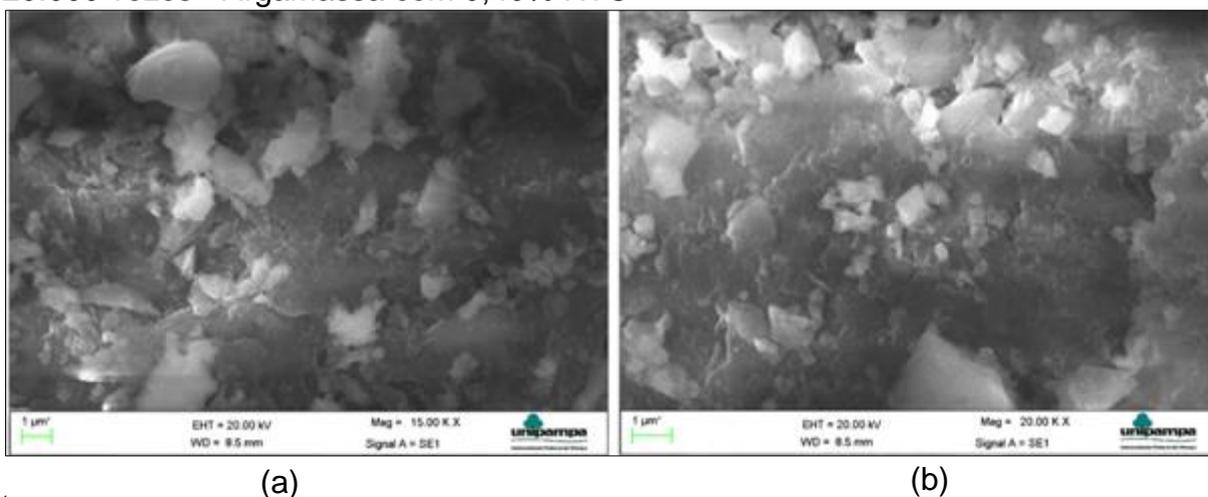
Figura 18 - Imagem MEV com (a) ampliação de 15.000 vezes e (b) ampliação de 20.000 vezes - Argamassa com 0,30% NTC



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 18 ilustra as imagens do MEV produzidas a partir da amostra da argamassa AN40. Foi possível notar a presença de algumas fibras distribuídas na matriz cimentícia. Entretanto, não é possível identificar com clareza as ligações formadas entre os NTCs e a matriz.

Figura 19 - Imagem MEV com (a) ampliação de 15.000 vezes e (b) ampliação de 20.000 vezes - Argamassa com 0,40% NTC



Fonte: Elaboração própria

Para a captura de imagens da amostra das Figura 17 à Figura 19 foram obtidas através de um fragmento do corpo de prova retirado do interior de uma amostra. É importante ressaltar que a captura de imagens por meio de MEV é considerada uma prática puramente qualitativa, sua análise permite a constatação da disposição dos NTCs no interior do material cimentício além de identificar alguns produtos da hidratação do cimento. Em geral os NTCs apresentaram uma excelente dispersão, não foi constatada, através das figuras, grandes aglomerações de micropartículas.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho foi elaborado baseado na dissertação de mestrado de Lemes (2016) e do trabalho de conclusão de curso de Schineider (2018) com o intuito de complementar os estudos realizados pelas autoras. O objetivo foi alcançado visto que todos os ensaios referentes a argamassa de revestimento foram aplicados as argamassas produzidas com adição de NTCs.

Neste sentido, as principais conclusões deste trabalho podem ser observadas a seguir:

- ✓ Com relação aos ensaios de caracterização das argamassas no estado fresco, os valores de índice de consistência não obtiveram o mesmo comportamento de Schineider (2018). O traço AN30 obteve um resultado discrepante. Estes resultados podem ter sido influenciados pelas condições de temperatura e umidade do ambiente nos dias dos ensaios. Para manter a trabalhabilidade das argamassas seria necessário aumentar o consumo de água ou do aditivo. Neste caso, optou-se por fixar esses fatores para conseguir comparar os resultados com a bibliografia consultada;
- ✓ A retenção de água de todos os traços permaneceu no intervalo estipulado de acordo com Centro Científico Técnico de Construção- CSTB (1993, *apud* Oliveira, 2017), a  $R_a$  tem que ser maior que 80%. Em geral os traços obtiveram uma boa retenção de água, pois quanto maior a porcentagem de retenção, mais lentamente ocorre o processo de hidratação do cimento e conseqüentemente a possibilidade de surgir fissuras devido a retração térmica é menor. Acredita-se que para a resistência potencial a tração em argamassas com e sem NTCs não apresentaram variação considerável de resultados. No entanto, quanto analisadas as superfícies de ruptura, observou-se que as argamassas com adição de NTCs romperam na sua maioria na interface argamassa/substrato, o que é considerado um fator positivo para este tipo de ensaio.
- ✓ A retenção de água é outro fator que pode interferir nos resultados. A aderência ao substrato é prejudicada quando a argamassa não apresenta boa trabalhabilidade aliada a baixa retenção de água. No presente estudo, em geral, as argamassas com adição de NTCs apresentaram melhor desempenho

frente as propriedades analisadas quando comparadas a mistura referência (sem NTCs).

- ✓ O ensaio de absorção através do método do cachimbo foi realizado considerando dois intervalos de tempo diferentes, pois a variação de um traço para o outro-considerando o tempo de ensaio prescrito por norma- foi pequena (0,1 mL). A execução do ensaio considerando a análise do tempo em que a argamassa levou para absorver os 3,5 mL (capacidade total do cachimbo) possibilitou uma análise mais específica do comportamento das misturas. Os traços AN20 e AN30 apresentaram os melhores resultados visto que, o ideal é que a argamassa não absorva muita água para não comprometer seu desempenho.
- ✓ Os resultados obtidos através do ensaio de aderência apresentaram um elevado desvio padrão, como já era esperado. Dessa forma, a adição de 0,20% de NTC apresentou melhores resultados pois atende as solicitações de uma argamassa de revestimento e apresenta menor consumo de material (em relação a argamassa 0,30 NTC) . Analisando a correlação dos resultados em ANEXO, é possível perceber que a argamassa com adição de 0,20% de NTC apresenta bom desempenho, frente as propriedades estudadas, com menor consumo de nanotubos.
- ✓ No presente estudo, as argamassas com adição de NTCs apresentaram baixa absorção de água. A referida propriedade é um dos requisitos para argamassas utilizadas em revestimento.

## ANEXOS

Tabela 13 - Correlação das propriedades estudadas

Traço	Aderência			Retenção (%)	Consistência (mm)
	% de ruptura	Superfície de ruptura	Tensão (MPa)		
AR	86	A/S	1,64	89	294
	14	Cola	2,51		
0,2 NTC	75	Subs.	1,63	97	279
	25	A/S	1,66		
0,3 NTC	50	Subs.	1,77	89	282
	17	Arg.	1,83		
	33	A/S	2,10		
0,4 NTC	57	Arg.	1,32	94	238
	43	A/S	1,45		

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16541**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_. **NM 52**: Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente. São Paulo, 2009.

\_\_\_\_. **NBR 248**: Agregados– Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_. **NBR 15.839**: Argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos - Caracterização reológica pelo método Squeeze-Flow. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_. **NBR 13.276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_. **NBR 13.277**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da retenção de água”, Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_. **NBR 13.278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e teor de ar incorporado”, Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_. **NBR 1408-2**: Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas. Parte 2: Execução do substrato-padrão e aplicação da argamassa para ensaios, Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_. **NBR 15.261**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear). Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_. **NBR 15.258** - Argamassa para assentamento de paredes e revestimentos de paredes e tetos – Determinação da resistência potencial de aderência à tração - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2005

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

\_\_\_\_. **Incorporação de nanotubos de carbono em matriz de cimento Portland**. 2012. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2012.

BORBA, A. P. B., MATSUNAGA, A. S., & FRAN CZAK, L. R. **Uso de nanotubos de carbono na confecção de argamassas de reparo: efeito nas propriedades mecânicas e absorção de água**. 2013. Trabalho final de curso em Engenharia Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2013.

CARASEK, H. Argamassas. In: ISAIA, G. C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. 1º ed. São Paulo: Instituto Brasileiro de Concreto, 2007. p. 863-904.

CARASECK, H., CASCUDO, O., DOS SANTOS, M. S. J.; LEMES, N. (2011). **Avaliação em obra da resistência superficial de revestimentos de argamassa**. Revista ALCONPAT, v. 1, n. 2, p. 115-134, 2011.

CARDOSO, F. A. **Método de formulação de argamassas de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

COUTO, G. G. **Nanopartículas de níquel: síntese, caracterização, propriedades e estudo de sua utilização como catalisadores na obtenção de nanotubos de carbono**. 2006. Dissertação (Mestrado em Química) – Departamento de Química, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2006.

ELO, V. S. **Nanotecnologia aplicada ao concreto: efeito da mistura física de nanotubos de carbono em matrizes de cimento Portland**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2009.

FRANCISCON, M. **Tecnologia da argamassa**. 2007. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil, Universidade São Francisco, Itatiba, SP, 2007.

GLEIZE, P. J. P. Nanociência e nanotecnologia dos materiais cimentícios. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. v.2, São Paulo: IBRACON, 2011.

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

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

IOPPI, P. R. **Estudo da aderência de argamassas de revestimento em substratos de concreto**. 1995. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC. ,1995.

KASHIWAGI, Takashi et al. Nanoparticle networks reduce the flammability of polymer nanocomposites. **Nature materials**, v. 4, n. 12, p. 928, 2005.

KRUGER, P.; CABRAL, L. A.; CLEMENTE DE SOUZA, V. F. Confecção de Argamassa Utilizando Areia Residual do Processo de Fundição. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 5, n. 3, p. Páginas 45-53, 2013

LE MAROIS, G. Enjeux et perspectives économiques des nanomatériaux. **Séminaire OMNT/nanomatériaux** Paris, 2004.

LEMES, S. P. da S. **Caracterização do comportamento mecânico e térmico de argamassas de cimento Portland com adição de nanotubo de carbono.** 115 p. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete, Alegrete, RS, 2016.

LI, G. Y.; WANG, P. M.; ZHAO, X. **Mechanical behavior and microstructure of cement composites incorporating surface-treated multi-walled carbon nanotubes Carbon.** n. 43, p. 1239-1245, 2005. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com>. Acesso em: 25 mai. 2018.

LIMA NETO, E. R.– Aspectos relevantes da nanotecnologia e a sua aplicação na construção civil. **Revista On-Line IPOG**, 2013. Disponível em: <https://www.ipog.edu.br/revista-especialize-online/edicao-n62013/aspectosrelevantes-da-nanotecnologia-e-a-sua-aplicacao-na-construcao-civil/>. Acesso em 01/jun 2018.

MAKAR J.M.; BEAUDOIN J.J. Carbon nanotubes and their application in the construction industry. International Symposium on Nanotechnology in Construction, Royal Society of Chemistry. **Anais [...]**, p 331-341, 2003.

MAKAR, J.; MARGESON, J.; LUH, J. **Carbon nanotube / cement composites – early results and potential applications.** In: 3RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONSTRUCTION MATERIALS: PERFORMANCE, INNOVATIONS AND STRUCTURAL IMPLICATIONS. 2005. Vancouver, B.C. Disponível em: <http://www.irc.nrc-cnrc.gc.ca/ircpubs>. Acesso em: 21 mai. 2018.

MARCHIORI, R. **Produção por ablação a laser e caracterização de nanotubos de carbono.** 2007. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC. 2007.

MARCONDES, C. G. N. **Adição de nanotubos de carbono em concretos de cimento Portland – Absorção, permeabilidade, penetração de cloretos e propriedades mecânicas.** 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Construção Civil, Universidade Federal do Paraná. Curitiba,PR. 2012.

MARTINS, D. V. A. ; SOARES, L. M. **Avaliação do desempenho de revestimentos de argamassa com fibras de papel kraft provenientes de embalagens de cal.** 2016. Trabalho de Conclusão de Curso– Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 2016.

MELO, V. S. **Nanotecnologia aplicada ao concreto: efeito da mistura física de nanotubos de carbono em matrizes de cimento Portland.** [s.l.] Universidade Federal de Minas Gerais, MG, 2009.

MELO, V. S., Calixto, J. M., Ladeira, L. O., & Oliveira, S. Desempenho de argamassas de cimento Portland contendo nanotubos de carbono e aditivo de melamina. **CONSTRUINDO**, v. 3, n. 01, 2011.

MORAIS, J. F. **Aplicação da nanotecnologia na indústria da construção: análise experimental em produtos cimentícios com nanotubos de carbono.** 2012. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ. 2012.

OLIVEIRA, Valéria Costa de. **Estudo comportamental da formulação, dos requisitos, e das propriedades das argamassas estabilizadas de revestimento.** 2017. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção civil)- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade de Brasília. Brasília,DF, 2017.

RAY, S. S.; OKAMOTO, M. Polymer/layered silicate nanocomposites: a review from preparation to processing. **Progress in polymer science**, v. 28, n. 11, p. 1539-1641, 2003.

RECENA, F. A. P. **Conhecendo Argamassas**, 2ª Ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2012, 188 p. 2016.

ROCHA, C.G. **Propriedades físicas de nanotubos de carbono.** 2005. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação - Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, RJ, 2005.

SANTOS, Marcelo. **Ensaio de aderência das argamassas de revestimento.** 2008. Monografia - ao Curso de Especialização em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG. 2008.

SCARTEZINI, L. M. B. **Influência do tipo e preparo do substrato na aderência dos revestimentos de argamassa: estudo da evolução ao longo do tempo, influência da cura e avaliação da perda de água da argamassa fresca.** 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2002.

SCHNEIDER, T. V., **Estudo das propriedades físicas e mecânicas de argamassas reforçadas com nanotubos de carbono.** 2018. Trabalho final de curso em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pampa, Alegrete, RS, 2018.

SELMO, S. M. S. **Dosagem de argamassa de cimento Portland e cal para revestimento externo de fachadas dos edifícios.** 1989. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 1989.

SILVA, N. G. **Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária.** 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2006.

SOBOLEV, K. e SHAH, S. P. (Ed.). **Nanotechnology of concrete: recent developments and future perspectives.** United States of America: American Concrete Institute, 2008. SP-254, p. 93-120.

SÓLORSANO, G. Developing nano-structured materials by controlling solid-state phase transformation and synthesis. **Notas de aula**. Disponível em: <http://www.ica.ele.puc-rio.br/nanotechnotasAula9.pdf>. Acesso em 12/09/2017.

VAISMAN, L.; WAGNER, D. H.; MAROM, G. **The role of surfactants in dispersion of carbon nanotubes advances in colloid and interface science**, v. 128, n. 130, p. 37-46, 2006.

ZARBIN, A. JG. **Química de (nano) materiais**. Química Nova, v. 30, n. 6, p. 1469, 2007.