

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS  
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia  
de Materiais



Dissertação

**Adição de Nanotubos de Carbono de Paredes Múltiplas em  
Argamassas de Revestimento**

Rogério Daltro Knuth

Pelotas, 2014

**Rogério Daltro Knuth**

**Adição de Nanotubos de Carbono de Paredes Múltiplas em  
Argamassas de Revestimento**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Pelotas, como requisito à obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientadora: Profa. Dra. Margarete Regina Freitas Gonçalves

Pelotas, 2014

**Banca Examinadora:**

---

Profa. Dra. Margarete Regina Freitas Gonçalves (Orientadora)  
Doutora em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

---

Profa. Dra. Alice Gonçalves Osorio  
Doutora em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

---

Prof. Dr. Charlei Marcelo Paliga  
Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

## Dedicatória

Este trabalho é dedicado *in memoriam* aos meus pais, Guido Knuth e Erna Zarnott Knuth, aos meus irmãos e as razões do meu viver minha esposa Glaucia e a nossa querida filha Fernanda, por todo o amor que representam em minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

Acima de todas as coisas agradeço a Deus, por me conceder as bênçãos de saúde e sabedoria, a persistência e compreensão nos momentos mais difíceis, e, portanto, permitindo assim, a conclusão deste trabalho.

A minha orientadora professora Dr.<sup>a</sup> Margarete Regina Freitas Gonçalves que, desde o início, mostrou-se muito mais que apenas orientadora, pois, com toda sua dedicação, apoio, explicações, e acima de tudo, como grande motivadora, para à conclusão de toda a pesquisa.

Ao Prof. Dr. Neftali Lenin Villarreal Carreño, por ter possibilitado o desenvolvimento desta pesquisa mediante o fornecimento dos nanotubos de carbono, e demais materiais, pois, sem os quais, não seria possível o desenvolvimento deste trabalho e também pela sua enorme ajuda no campo científico ao longo do programa experimental.

Ao Prof. Dr. Antônio Shigueaki Takimi, agradeço a sua compreensão e pela construção do conhecimento, paciência e, principalmente, sua disponibilidade em todos os momentos em que precisei de seu apoio nas etapas deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Darci Alberto Gatto, Prof. Dr. Cesar Antônio Oropesa Avellaneda e a Profa. Dra. Mônica Regina Garcez, pelo empréstimo de seus laboratórios e equipamentos os quais foram imprescindíveis para a conclusão desta pesquisa.

Ao coordenador do Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais Prof. Dr. Sergio da Silva Cava, pelo seu profissionalismo e comprometimento com o curso, e aos demais professores, pela construção do conhecimento empregado ao longo da jornada.

Aos meus colegas de mestrado Ricardo Marques e Gian Francesco pelo apoio relevante prestado neste trabalho.

As funcionárias Juliana e Sandra da Engenharia de Materiais, Roseméri da Engenharia Industrial Madeireira por estarem sempre disponíveis para ajudarem nas atividades que envolveram este trabalho.

Aos bolsistas, Oscar da Engenharia de Materiais, Flávio, Guilherme Baptista, Guilherme Maron, Mauricio da Engenharia Civil e ao Roberto da Engenharia Industrial Madeireira.

E a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

## RESUMO

KNUTH, Rogério Daltro. **Adição de Nanotubos de Carbono de Paredes Múltiplas em Argamassas de Revestimento**. 2014. 103f. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

Atualmente, a nanotecnologia tem proporcionado inovações tecnológicas significativas nas diversas áreas da ciência e engenharias. Um material que vem se destacando nessas áreas é o nanotubo de carbono. Nanotubos de carbono são cilindros formados por estruturas de carbono, que podem se apresentar em uma única camada, denominados de nanotubos de carbono de paredes simples (NTCPS), ou em várias camadas sobrepostas, que são os nanotubos de carbono de paredes múltiplas (NTCPM). Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi o de analisar o comportamento de uma argamassa de revestimento produzida com nanotubos de carbono de paredes múltiplas, adicionados na quantidade de 0,3% em relação à massa do cimento, e comparar o seu desempenho com uma argamassa industrializada, ambas aplicadas nas mesmas condições de trabalho. Para o presente estudo foi necessário funcionalizar e dispersar os NTCPM. Para a funcionalização utilizou-se os ácidos sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) e nítrico ( $HNO_3$ ) e a dispersão foi por ultrassom. Os NTCPM funcionalizados foram neutralizados com hidróxido de amônio ( $NH_3$ ). Foram realizados ensaios de caracterização física e mecânica no estado fresco e no estado endurecido, nas argamassas de revestimento com NTCPM e industrializada. Para a identificação das interfaces formadas entre as argamassas testadas e os seus substratos, fez-se análise da microestrutura formada e de composição química elementar por microscopia eletrônica de varredura. Os resultados obtidos mostraram que a argamassa com NTCPM apresentou melhor desempenho que a argamassa industrializada, no tocante a densidade, consistência, trabalhabilidade, resistência à tração e resistência a compressão axial. Isso indica que as melhorias foram provocadas pela presença dos NTCPM.

**Palavras-chave:** nanotubos de carbono, propriedades físicas e mecânicas, microestrutura, argamassas de revestimento.

## ABSTRACT

KNUTH, Rogério Daltro. **Addition of Carbon Nanotubes in Multiple Walls Mortar Coating**. 2014 103f. Master's - Graduate Program in Materials Science and Engineering. Federal University of Pelotas, Pelotas.

Currently nanotechnology has provided significant technological innovations in various fields of science and engineering. A material that has been outstanding in these areas is the carbon nanotube. Carbon nanotubes are cylinders composed of carbon structures, which may be present in a single layer, called carbon nanotubes simple walls (SWNT), or multiple overlapping layers, which are multi-walled (MWNT) carbon nanotubes. In this context, the aim of this study was to analyze the behavior of a mortar coating produced with multi-walls carbon nanotubes, added in the amount of 0.3% in the mass of cement, and compare its performance with a mortar industrialized, both applied in the same working conditions. For the present study it was necessary to functionalize and disperse the MWNT. For functionalization sulfuric acid ( $H_2SO_4$ ) and nitric ( $HNO_3$ )<sup>1</sup>. Functionalized MWNT were neutralized with ammonium hydroxide ( $NH_3$ ). Tests of mechanical and physical characterization were performed on fresh and hardened state<sup>2</sup>. For the identification of the interface formed between the tested mortars and their substrates, analysis were made of the formed microstructure and elemental chemical composition were made by scanning electron microscopy. The results showed that the mortar with MWNT performed better than the industrialized mortar, with respect to density, consistency, workability, tensile strength and resistance to axial compression. This Indicates that improvements were caused by the presence of MWNT.

**Keywords:** carbon nanotubes, physical and mechanical properties, microstructure, mortar coating.

---

<sup>1</sup> Was used, and MWNT were ultrasonically dispersed.

<sup>2</sup> Of industrialized and MWNT mortar coating.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Gráfico da resistência à compressão de argamassas de cimento, cal e areia (1:1:6), dosadas com diferentes tipos de cimento. ....	20
Figura 2 - Variação da retenção de água para diferentes tipos argamassas. ....	28
Figura 3 - Representação esquemática do mecanismo de aderência.....	31
Figura 4 - a) Nanotubos de carbono de parede simples (NTCPS); b) Nanotubos de carbono de parede múltiplas (NTCPM). ....	37
Figura 5 - Representação esquemática da síntese de NTC pelo método de descarga por arco. ....	38
Figura 6 - Representação do aparato experimental de ablação a laser. ....	39
Figura 7 - Representação esquemática de um reator CVD.....	40
Figura 8 - Microfissura em uma pasta de cimento aditivada com 2% de NTC. ....	42
Figura 9 - Comprimento médio de NTC em função do tempo de dispersão com ácido. ....	45
Figura 10 - Representação esquemática de um microscópio eletrônico de varredura - MEV. ....	46
Figura 11 - Tipos de elétrons gerados por microscópio eletrônico de varredura- MEV. ....	47
Figura 12 - (a) Espalhamento elástico (Rayleigh) (b) espalhamento Raman Stokes e (c) espalhamento Raman anti-Stokes. $E$ - energia incidente, $E_0$ energia no estado fundamental, $E_1$ - energia no estado vibracional 1, $E'$ - energia espalhada, $E_n$ - enésimo nível de energia. ....	49
Figura 13 - Fluxograma com as etapas de desenvolvimento do trabalho. ....	51
Figura 14 - Processo de funcionalização; (a) ultrassom de banho, (b) medição do pH (c) ultrassom de ponta.....	56
Figura 15 - Argamassadeira utilizada na produção das argamassas de revestimento. ....	59
Figura 16 - Ensaio de Consistência (a) em repouso; (b) posterior aos golpes.....	60
Figura 17 - Equipamento utilizado para o ensaio de resistência à tração na flexão..	61
Figura 18 - Ensaio de resistência à compressão; (a) Prensa utilizada, (b) Corpos de prova de AI e ANTCPM.....	62
Figura 19 - Processo de extração das amostras dos substratos (ANTCPM e AI). ....	63

Figura 20 - Paredes usadas para a aplicação das argamassas de revestimento NTCPM e AI; (a) cerâmico; (b) concreto. ....	63
Figura 21 - Aplicação da argamassa de revestimento no substrato (a) execução; (b) revestimento pronto.....	64
Figura 22 - Difratoograma do Cimento Portland CPV – ARI .....	66
Figura 23 - Difratoograma de raios X da argamassa industrializada utilizada.....	68
Figura 24 - Espectro Raman de NTCPM funcionalizados com ácidos sulfúrico e nítrico, comparados com NTCPM não funcionalizados.....	70
Figura 25 - Interfaces: (a) argamassa NTCPM, (b) chapisco e (c) tijolo cerâmico. ...	74
Figura 26 - Interfaces: (a) bloco de concreto, (b) chapisco e (c) argamassa com NTCPM.....	75
Figura 27 - Argamassa (a) micrografia; (b) composição química elementar obtida na interface ANTCPM – chapisco, no ponto 2. ....	75
Figura 28 - Argamassa (a) micrografia; (b) composição química elementar obtida na interface AI - Chapisco, no ponto 4. ....	76
Figura 29 - Argamassa chapisco (a) micrografia; (b) composição química elementar, ponto 2. ....	76
Figura 30 - Argamassa AI: (a) micrografia; (b) composição química elementar, ponto 2. ....	77
Figura 31- Argamassa ANTCPM: (a) micrografia; (b) composição química elementar, ponto 2. ....	77
Figura 32 - Micrografia de uma amostra da argamassa com NTCPM: Identificação de constituintes. ....	78
Figura 33 - Micrografia de uma amostra da argamassa com NTCPM: Identificação dos NTCPM.....	79

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos agregados, módulo de finura.....	21
Tabela 2 - Ensaio que relacionam a propriedade avaliada com o parâmetro reológico das argamassas.....	25
Tabela 3 - Classificação das argamassas industrializadas. ....	36
Tabela 4 - Classificação de argamassas industrializadas de assentamento e revestimento de paredes e tetos. ....	36
Tabela 5 - Composição química do cimento Portland CPV- ARI.....	52
Tabela 6 - Propriedades físicas e mecânicas do cimento Portland CPV – ARI.....	53
Tabela 7 - Distribuição granulométrica da areia.....	53
Tabela 8 - Propriedades físicas da areia.....	54
Tabela 9 - Características dos NTCPM.....	54
Tabela 10- Características físicas e mecânicas da argamassa industrializada.....	57
Tabela 11 - Composição da argamassa ANTCPM.....	58
Tabela 12 - Composição de argamassa industrializada (AI). ....	59
Tabela 13 - Composição da argamassa do chapisco.....	64
Tabela 14 - Compostos identificados no cimento Portland CP V- ARI.....	67
Tabela 15 - Compostos identificados na argamassa industrializada.....	68
Tabela 16 - Razão $I_D/I_G$ média de três amostras de NTCPM funcionalizados e não funcionalizados.....	70
Tabela 17 - Caracterização das argamassas de revestimento no estado fresco .....	71
Tabela 18 - Densidade de massa das argamassas de revestimento testadas .....	72
Tabela 19 - Valores de absorção das argamassas. ....	72
Tabela 20 - Resistência à tração na flexão das argamassas testadas.....	72
Tabela 21 - Fatores de forma de nanotubos de carbono .....	73
Tabela 22 - Resistência à compressão axial das argamassas testadas .....	73

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Ácido sulfúrico -  $\text{H}_2\text{SO}_4$

Ácido nítrico -  $\text{HNO}_3$

Aluminato tri cálcico -  $\text{C}_3\text{A}$

American Society for Testing and Materials - ASTM

Análise química qualitativa por dispersão de energia - EDS

Análise térmica diferencial - ATD

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT

Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear – CDTN

Chemical Vapour Deposition - CVD

Cimento Portland V - Alta resistência inicial - CP-V ARI

Corpo-de-prova - CP

Difração de Raios X - DRX

Ferro - Fe

Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo - IPT

Mega-Pascal - MPa

Microscopia eletrônica de varredura - MEV

Nanotubos de carbono - NTC

Nanotubos de carbono de paredes múltiplas - NTCPM

Nanotubos de carbono de paredes simples - NTCPS

Norma brasileira - NBR

Norma Mercosul - NM

Resistência à compressão -  $f_{ck}$

Silicato de cálcio hidratado - C-S-H

Silicato tri cálcico -  $\text{C}_3\text{S}$

Universidade Federal de Pelotas - UFPEL

Universidade Federal do Rio Grande - FURG

Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	14
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	16
2.1 Objetivo Geral.....	16
2.2 Objetivos Específicos .....	16
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	17
3.1 Argamassas de Revestimento.....	17
3.1.1 Materiais Constituintes .....	19
3.1.2 Propriedades .....	24
3.2 Argamassas industrializadas.....	35
3.3 Nanotubos de Carbono (NTC).....	37
3.3.1 Obtenção de Nanotubos de carbono (NTC).....	38
3.3.2 Incorporação de NTC em argamassas cimentícias.....	41
3.3.3 Métodos de Dispersão de NTC .....	43
3.3.4 Técnicas de Caracterização de NTC.....	45
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	51
4.1 Obtenção e Caracterização dos materiais utilizados.....	52
4.1.1 Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CPV- ARI) .....	52
4.1.2 Areia.....	53
4.1.3 Aditivo plastificante.....	54
4.1.4 Nanotubos de Carbono de Paredes Múltiplas .....	54
4.1.5 Argamassa Industrializada .....	56
4.1.6 Água.....	57
4.1.7 Tijolos maciços cerâmicos.....	57
4.1.8 Blocos de concreto .....	57
4.2 Obtenção das argamassas de revestimento .....	58

4.3 Caracterização das argamassas de revestimento ANTCPM e AI .....	60
4.4 Aplicação das argamassas de revestimento ANTCPM e AI.....	63
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>66</b>
5.1 Caracterização do cimento Portland CP V- ARI.....	66
5.2 Caracterização da argamassa industrializada.....	67
5.3 Caracterização dos nanotubos de carbono de parede múltiplas.....	69
5.4 Caracterização das argamassas de revestimento ANTCPM e AI .....	71
5.4.1 Argamassas no Estado Fresco .....	71
5.4.2 Argamassas no Estado Endurecido .....	71
5.5 Análise microestrutural e de composição química .....	74
<b>6. CONCLUSÕES .....</b>	<b>80</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>81</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>90</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>103</b>

# 1. INTRODUÇÃO

A argamassa é um dos produtos de maior utilização na construção civil, estando presente no revestimento e assentamento de alvenarias. Quando utilizadas como revestimentos, estas são fundamentais para a durabilidade dos edifícios, pois desempenham as funções de revestir e de proteger de maneira uniforme as alvenarias e estruturas de concreto contra agentes agressivos externos.

Apesar do intenso uso, é frequente a ocorrência de manifestações patológicas nas argamassas de revestimentos causadoras de prejuízos a sua vida útil e também responsável por graves acidentes provocados pelo seu descolamento. Esses problemas estão relacionados a inexistência de projeto de execução, desconhecimento das características dos materiais empregados, utilização de materiais inadequados, não observância de Normas Técnicas, erros de aplicação e falhas na manutenção (BAUER, 1997).

De acordo com Carasek (2007), a deterioração prematura dos revestimentos de argamassa é decorrente de manifestações patológicas, resultantes de processos físicos, mecânicos, químicos e biológicos que frequentemente se sobrepõem sendo necessário considerar também as suas interações. As manifestações patológicas se evidenciam através de efeitos físicos nocivos, tais como a desagregação da massa, descolamento do revestimento, vesículas, fissuração e aumento da porosidade e da permeabilidade. A diminuição da incidência destes pode contribuir significativamente para a redução dos custos de operação e de manutenção dos revestimentos e de toda a cadeia da indústria da construção civil.

Atualmente, no mercado da construção civil predomina o emprego das argamassas de revestimento industrializadas, que apresentam maior trabalhabilidade e desempenho por serem constituídas de materiais adequados e com controle de características tais como tamanho e quantidade de partículas.

Estudos recentes na área de ciência e engenharia de materiais, envolvendo a nanociência e a nanotecnologia, vêm proporcionando o desenvolvimento de novos produtos cerâmicos, cimentícios, poliméricos, etc., com propriedades superiores aos originais a partir de novas estruturas ou aperfeiçoamento das já existentes. Dentre os materiais pesquisados os nanotubos de carbono (NTC) vêm recebendo destaque.

Os NTC são formados por átomos de carbono em arranjo hexagonal, na forma de uma ou mais folhas de grafeno enroladas de maneira concêntrica, e são

conhecidos por sua elevada resistência mecânica, baixa densidade e flexibilidade. Quando formados por uma única camada são denominados nanotubos de paredes simples (NTCPS) e quando formados por duas ou mais camadas são denominados nanotubos de paredes múltiplas (NTCPM).

Quando utilizados em compósitos de argamassas, devido a sua escala nanométrica, os NTC possibilitam a redução da porosidade e o aumento da resistência mecânica. Em trabalhos recentes, os pesquisadores Melo (2009), Sobolev et al., (2008), Li et. al., (2008), Makar et al., (2005) demonstraram que a inserção de nanotubos de carbono de paredes múltiplas em matrizes cimentícias melhora significativamente as propriedades mecânicas do compósito analisado.

Esta nova realidade motivou o desenvolvimento da presente pesquisa que buscou estudar a influência da adição de NTC de paredes múltiplas (NTCPM) nas propriedades físicas e mecânicas de uma argamassa de revestimento constituída de cimento, areia graduada, aditivo plastificante e água.

O interesse no desenvolvimento desse trabalho está em pesquisar a eficiência da argamassa de revestimento com NTCPM na região Sul do estado do Rio Grande do Sul, considerando ser esta uma zona de clima temperado sujeita a constantes e bruscas variações de umidade e temperatura. Espera-se obter uma argamassa com propriedades físicas e mecânicas melhoradas, principalmente no tocante a porosidade e aderência, que é fator determinante da vida útil das argamassas de revestimento.

As novas características da argamassa aditivada com NTCPM serão comparadas as de uma argamassa industrial testada nas mesmas condições de trabalho.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral do presente trabalho foi o de avaliar as propriedades físicas e mecânicas de uma argamassa de revestimento, constituída de cimento, areia graduada, nanotubos de carbono de paredes múltiplas (NTCPM), aditivo plastificante e água.

### **2.2 Objetivos Específicos**

✓ Caracterizar química e fisicamente os NTCPM, adquiridos comercialmente para o desenvolvimento do trabalho.

✓ Obter argamassas compostas de cimento, areia graduada, 0,3% de NTCPM em relação à massa de cimento utilizada no compósito, aditivo plastificante e água.

✓ Caracterizar física e mecanicamente a argamassa aditivada com NTCPM.

✓ Aplicar a argamassa aditivada com NTCPM em dois diferentes substratos, um de tijolo cerâmico e outro de bloco de concreto.

✓ Aplicar a argamassa industrial nas mesmas condições de serviço da argamassa com NTCPM.

✓ Identificar a presença dos NTCPM na argamassa proposta, por microscopia eletrônica de varredura.

✓ Analisar comparativamente a formação e composição química elementar das interfaces formadas entre as argamassas aplicadas e os substratos.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Argamassas de Revestimento

As argamassas são compósitos utilizados na construção civil com propriedades de resistência mecânica e trabalhabilidade obtidas a partir da mistura física e homogênea de um ou mais aglomerantes (cimento e cal), de agregado miúdo (areia) e água, podendo ainda conter aditivos visando melhorar seu desempenho quanto a sua aplicação.

De acordo com a norma brasileira NBR 13281 (ABNT, 2005), argamassa é uma mistura homogênea de agregados inorgânicos e água, contendo ou não, aditivos e adições, com propriedades de aderência e endurecimento, podendo ser dosada em obra ou em instalações próprias (argamassas industrializadas).

As argamassas quando utilizadas como revestimento têm as funções de regularizar as superfícies, de servir como base para acabamentos decorativos, contribuindo para a estética da edificação, de proteger contra a ação do intemperismo, no caso de revestimentos externos, de integrar o sistema de vedação dos edifícios, contribuindo no isolamento térmico (~30%) e acústico (~50%), na estanqueidade à água (~70 a 100%), na segurança ao fogo e de resistência ao desgaste e abalos superficiais (CARASEK, 2007).

Segundo a NBR 13529 (ABNT, 2013), as argamassas são classificadas quanto:

- ✓ A natureza do aglomerante: argamassa aérea e hidráulica;
- ✓ O número de aglomerantes: argamassa simples e mista;
- ✓ O tipo de aglomerante: cal, cimento, cimento e cal;
- ✓ A função do revestimento: argamassa de chapisco, de emboço e de reboco;
- ✓ A forma de preparo ou fornecimento: argamassa dosada em central, preparada em obra, industrializada e mistura semi-pronta para argamassa;
- ✓ As propriedades especiais: argamassa aditivada, de aderência melhorada, colante, redutora de permeabilidade, de proteção radiológica, hidrófuga e termoisolante.

A composição e a dosagem das argamassas adotadas no Brasil seguem traços descritos em peso ou volume, especificados em normas nacionais, como a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), normas internacionais, como a *American Society for Testing and Materials* (ASTM), e cadernos de encargos do IPT (CINCOTTO e CARNEIRO, 1999).

Em relação à forma de preparo e ao fornecimento das argamassas, segundo Carvalho Jr. (2005), as argamassas podem ser preparadas em obra, dosadas em centrais ou industrializadas.

Quando as argamassas são preparadas no canteiro de obras, os materiais constituintes são adquiridos e estocados *in loco* até o momento de sua mistura física, que ocorre sem controle de qualidade. Contudo, elas apresentam um custo inferior às argamassas industrializadas ensacadas e às dosadas em central, se considerado apenas o valor do produto, sem análises dos benefícios tecnológicos agregados no processo de fabricação.

Nas argamassas dosadas mecanicamente em central, a manipulação de todos os materiais constituintes é em peso, proporcionando um melhor controle de qualidade. Estas são fornecidas em caminhões do tipo betoneira e devem seguir as recomendações do fabricante, quanto ao seu armazenamento e tempo para utilização.

As argamassas industrializadas, também, são dosadas mecanicamente e seus constituintes apresentam-se com tamanhos de partículas muito inferiores aos das argamassas de canteiro de obras e de central. Além disto, em sua composição ocorrem aditivos e adições (cinzas) que visam melhorar as suas propriedades físicas e mecânicas. Estas são fornecidas ensacadas e apresentam como vantagens de sua utilização:

- ✓ Precisão e uniformidade do traço, devido aos materiais constituintes serem dosados em peso;
- ✓ Controle de qualidade garantido pelo fabricante;
- ✓ Simplificação e organização do espaço físico, no tocante ao armazenamento dos materiais;
- ✓ Possibilidade de preparo próximo ao local da aplicação.

### 3.1.1 Materiais Constituintes

#### 3.1.1.1 Cimento

O cimento Portland é um composto formado de partículas angulares de clínquer, com dimensões que variam de 1 a 50  $\mu\text{m}$ , resultante da calcinação a 1450  $^{\circ}\text{C}$  de uma mistura de calcário e argila e eventuais corretivos químicos de natureza silicosa, aluminosa ou ferrífera (KIHARA e CENTURIONE, 2005).

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), os principais constituintes do cimento Portland são calcário ( $\text{CaCO}_3$ ), dolomita ( $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ ), sílica ( $\text{SiO}_2$ ), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), álcalis ( $\text{Na}_2 + \text{K}_2\text{O}$ ) e gesso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). As argilas são fontes de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e álcalis, compostos minerais necessários para um efeito mineralizante na produção de silicatos de cálcio. Os silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), formados pela hidratação do cimento Portland, são os principais responsáveis por sua característica adesiva e são estáveis em meios aquosos.

No Brasil, os cimentos são classificados e normatizados conforme as adições introduzidas na moagem do clínquer. Os tipos mais usuais são:

- ✓ Cimento Portland Comum - CP I; adição de gesso NBR 5732 (ABNT, 1991).
- ✓ Cimento Portland composto – CP II; adições de escória de alto-forno, pozolana e filler NBR 11578 (ABNT, 1997).
- ✓ Cimento Portland de alto-forno – CP III; adição de escória de alto-forno, apresentando baixo calor de hidratação NBR 5735 (ABNT, 1991).
- ✓ Cimento Portland pozolânico – CP IV; adição de pozolana, apresentando baixo calor de hidratação NBR 5736 (ABNT, 1999).
- ✓ Cimento Portland de alta resistência inicial – CP V; adições em maiores proporções de silicato tricálcico, que lhe confere alta resistência inicial e alto calor de hidratação NBR 5733 (ABNT, 1991).

De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland (2002), existem também alguns outros cimentos consumidos em menor escala, quer seja pela menor oferta ou pelas características especiais de sua aplicação, os quais são:

- ✓ Cimento Portland resistentes a sulfatos NBR 5737 (ABNT, 1992);

- ✓ Cimento Portland de baixo calor de hidratação NBR 13116 (ABNT, 1994);
- ✓ Cimento Portland branco NBR 12989 (ABNT, 1993);
- ✓ Cimento Portland destinado à cimentação de poços petrolíferos NBR 9831 (ABNT, 2008).

Segundo Cincotto e Bolorino (1997), o tipo de cimento altera as propriedades das argamassas. As autoras avaliaram os cimentos Portland CP II E, CP II F (com adição de filler), CP III, CP V ARI e CP V ARI RS na confecção de argamassas mistas de cimento, cal e areia, na proporção 1:1:6, em massa. As cales utilizadas foram as CH I (cálcica) e CH III (dolomítica). Em relação à resistência à compressão axial, os testes apresentaram valores mais baixos quando utilizado o CP II F e os mais elevados foram encontrados quando utilizado o CP V ARI, conforme ilustrado abaixo.

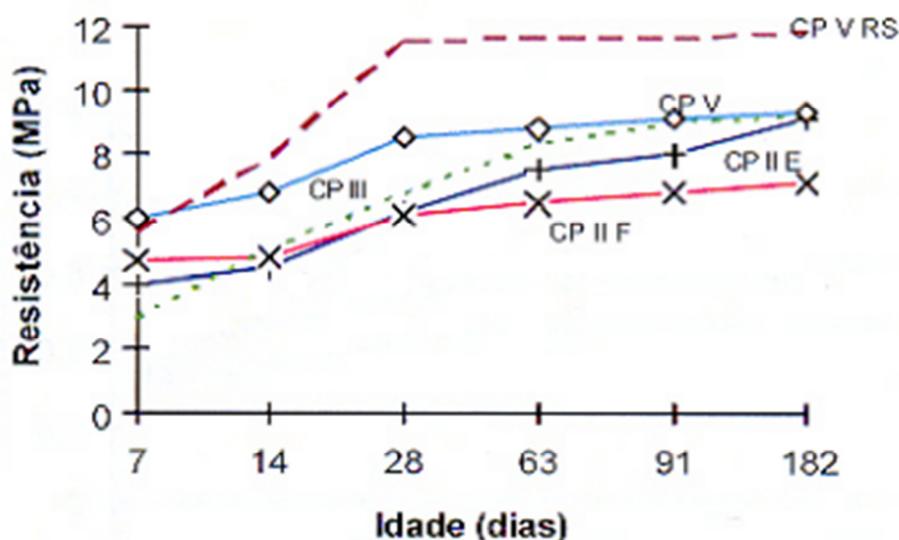


Figura 1 - Gráfico da resistência à compressão de argamassas de cimento, cal e areia (1:1:6), dosadas com diferentes tipos de cimento.

Fonte: CINCOTTO e BOLORINO, 1997.

### 3.1.1.2 Agregado Miúdo (areia)

São definidos como agregados miúdos ou areias os grãos que passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e que ficam retidos na peneira com

abertura de malha de 150  $\mu\text{m}$ , em ensaio realizado de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003) com peneiras definidas pela NBR NM ISO 3310-1 (ABNT, 2010) e a NBR 7211 (ABNT, 2009).

A areia não participa das reações químicas de endurecimento da argamassa, mas no estado fresco a sua granulometria e o formato dos seus grãos influencia na trabalhabilidade e na retenção de água. No estado endurecido influencia na resistência mecânica, na capacidade de deformação e na permeabilidade (CARNEIRO e CINCOTTO, 1999).

A análise granulométrica das argamassas é o principal método de ensaio utilizado para avaliar os diferentes tipos de agregados, suas dimensões e proporções. O método mais simples é o do peneiramento, conforme recomendações da norma NBR 7217 (1987) atualmente NBR NM 248 (ABNT, 2003). Além deste tem-se a análise por granulometria a laser, por sedimentação, etc.

A granulometria do agregado miúdo nas argamassas é quem regula a água de amassamento. A fração granulométrica do agregado miúdo abaixo da peneira ABNT 0,075 mm é denominada de material pulverulento e, desde que não esteja presente em excesso, pode contribuir para melhorar a trabalhabilidade das argamassas (LAND, 1987). Também, utiliza-se para definir o tipo de areia a ser empregada em argamassas o módulo de finura, que a classifica em areia fina, média ou grossa, conforme (Tab.1). O módulo de finura corresponde à soma das porcentagens retidas acumuladas de um agregado, em massa, nas peneiras da série normal, dividida por 100 (CINCOTTO e CARNEIRO, 1999).

Tabela 1 - Classificação dos agregados, módulo de finura.

Areia	Módulo de Finura
Grossa	$MF > 3,00$
Média	$3,00 \geq MF \geq 2,00$
Fina	$MF < 2,00$

Fonte: SELMO, 1986.

Deve-se tomar cuidado ao analisar somente o módulo de finura para classificar as areias, pois pode-se ter areias com mesmo módulo de finura, porém

com composição granulométrica diferente. Tal fato pode levar a produção de argamassas com propriedades distintas (TRISTÃO, 2005).

### 3.1.1.3 Água

A água tem função físico-química na argamassa visto que possibilita trabalhabilidade e reação química dos aglomerantes (CARASEK et al., 2001).

Quanto a sua dificuldade de remoção, os tipos de água presentes na pasta de cimento classificam-se em vapor de água, água capilar, água adsorvida, água interlamelar e água quimicamente combinada (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

✓ Vapor de água: os poros maiores são parcialmente preenchidos pela água. O espaço remanescente é ocupado por vapor de água, numa pressão em equilíbrio com a umidade relativa e a temperatura do ambiente.

✓ Água capilar: localizada nos grandes poros capilares. A água localizada em poros com diâmetro maiores que 50 nm é considerada como água livre da influência das forças atrativas das superfícies dos sólidos e sua remoção não provoca mudanças dimensionais. No entanto, a água nos poros de tamanho inferior a 50 nm será submetida às tensões capilares e sua remoção nas temperaturas e umidades normais poderá provocar retração.

✓ Água adsorvida: está sob a influência das forças superficiais dos sólidos da pasta de cimento, sendo responsável pela fluência destes materiais. Sua remoção é a principal causa da retração desses materiais durante a secagem.

✓ Água interlamelar: se associa à estrutura do C-S-H. A força de ligação é maior porque ela é influenciada por duas superfícies. Sua remoção é possível somente com uma secagem forte, e provocará uma grande contração.

✓ Água quimicamente combinada: faz parte da estrutura dos compostos hidratados da pasta de cimento, só pode ser retirada por altas temperaturas e causa a destruição dos compostos hidratados.

Para o uso das águas, a NBR 15900 (ABNT, 2009) especifica como regra geral para uso em concretos e argamassas as seguintes características:

- ✓ pH: entre 6,0 e 8,0;
- ✓ Matéria orgânica (em oxigênio consumido): = 5 mg/l;

- ✓ Resíduos sólidos: = 4000 mg/l;
- ✓ Sulfatos: = 300 mg/l;
- ✓ Cloretos: = 250 mg/l;
- ✓ Açúcar: = ausente.

A água utilizada nas argamassas deve ser dosada na quantidade certa porque ela define no estado fresco a consistência, o endurecimento e a aderência ao suporte, e no estado endurecido e a qualidade final das argamassas.

#### **3.1.1.4 Aditivos**

A NBR 13529 (ABNT, 2013) define aditivo como sendo um produto que é adicionado em pequena quantidade à argamassa, com a finalidade de melhorar uma ou mais propriedades no estado fresco ou endurecido.

Muitos são os aditivos utilizados em argamassas, dentre estes citam-se os hidrofugantes, os incorporadores de ar, os redutores de permeabilidade e os retentores de água. Os hidrofugantes e incorporadores de ar são os mais utilizados.

Os aditivos hidrofugantes são geralmente constituídos por finas partículas hidrófugas insolúveis, em geral sais metálicos de ácidos orgânicos (estearatos de cálcio, zinco, alumina, magnésio), obtidos na forma líquida ou em pó. Outros produtos tensoativos, cargas minerais e dispersantes, também, podem entrar na composição do hidrófugo para adaptar a sua atuação ao cimento. De maneira geral, esses aditivos reduzem a absorção da água da argamassa por capilaridade porque entopem os poros e os capilares, participam na hidratação dos aglomerantes e estabilizam o meio aquoso durante a “pega” (RODRIGUES, 1993; apud CARVALHO JR., 2005).

Os aditivos incorporadores de ar são constituídos por sais derivados da madeira, óleos ácidos vegetais, detergentes sintéticos, agentes sintéticos de trabalhabilidade e materiais miscelâneas, tais como resíduos de petróleo. Quando adicionados em pequenas quantidades à argamassa propiciam a criação de microbolhas de ar homogeneamente distribuídas, melhoram a trabalhabilidade e reduzem o consumo de água de amassamento, o que pode ajudar a reduzir o risco de fissuração (CARASEK, 2007). Os autores Sentone et al., (2009) explicam que as

microbolhas são responsáveis pelo aumento do volume de pasta e afastamento dos agregados, melhorando a fluidez. Outros benefícios gerados pela utilização deste aditivo são de possuírem a capacidade de isolamento termo-acústico.

Os aditivos redutores de permeabilidade e os retentores de água reduzem a evaporação e exsudação de água da argamassa fresca.

### **3.1.2 Propriedades**

Para que as argamassas de revestimento possam ter adequado desempenho e durabilidade é necessário atender as seguintes propriedades:

#### **3.1.2.1 Trabalhabilidade**

Trabalhabilidade é a característica das argamassas no estado fresco que determina a facilidade com que podem ser misturadas, transportadas, aplicadas, consolidadas e acabadas em uma condição homogênea. Uma argamassa é chamada trabalhável quando permite que o aplicador execute o serviço com boa produtividade, garantindo que o revestimento fique adequadamente aderido à base e apresente o acabamento superficial especificado.

Para Carasek (2007), a trabalhabilidade garante não só as condições de execução como, também, o adequado desempenho do revestimento em serviço. As propriedades da argamassa no estado endurecido são afetadas pela trabalhabilidade satisfatória no estado fresco, que garante a correta aplicação e aderência ao substrato.

As características físicas dos agregados influenciam na trabalhabilidade das argamassas, principalmente a granulometria e o índice de forma do agregado. Esta é alterada de forma positiva à medida que decresce o módulo de finura do agregado e o teor de grãos angulosos. A utilização da cal repercute favoravelmente na trabalhabilidade da argamassa (CINCOTTO, et al., 1995).

Segundo Cincotto e Bolorino (1997), a trabalhabilidade das argamassas é uma propriedade complexa, resultante da conjugação de diversas outras, tais como: consistência, plasticidade, retenção de água, coesão interna (forças físicas de atração existentes entre as partículas sólidas da argamassa e as ligações químicas

da pasta aglomerante), tixotropia (propriedade pela qual um material sofre transformações isotérmicas reversíveis, provocando a passagem do estado sólido para o estado gel-massa, tornando a pasta mais densa após a hidratação, recuperando, portanto, parcialmente as suas propriedades iniciais), densidade de massa e adesão inicial.

A Tab. 2 apresenta alguns testes amplamente utilizados para o estudo da trabalhabilidade das argamassas no estado fresco, correlacionando a consistência, a plasticidade e os parâmetros reológicos com a tensão de escoamento e viscosidade.

Tabela 2 - Ensaio que relacionam a propriedade avaliada com o parâmetro reológico das argamassas.

Ensaio	Norma	Propriedade	Parâmetro
Ensaio de penetração de cone	ASTM C 780	Consistência	Tensão de escoamento
Ensaio K-Slump	ASTM 1362	Consistência	Tensão de escoamento
Vane test ou ensaio de palheta	BS 1377 e ASTM D 4648	Consistência	Tensão de escoamento
Mesa de consistência	NBR 7215 NBR 3276	Consistência Plasticidade	Viscosidade

Fonte: BAUER, 2005.

As características reológicas das argamassas são determinadas em equipamentos denominados reômetros que fornecem os dados sobre a viscosidade e a tensão de escoamento do material analisado.

### 3.1.2.2 Plasticidade

Plasticidade é a propriedade pela qual a argamassa tende a conservar-se deformada após a retirada das tensões que provocaram a deformação.

Segundo Guimarães (2002), a plasticidade de um sistema é a expressão da possibilidade de uma pequena força externa causar o deslocamento de partículas em relação a outras, sem saírem de suas esferas de atração. No caso das argamassas, a plasticidade é definida como a característica que as tornam deslizantes e de fácil espalhamento, sem separação da água ou segregação do material sólido da mistura. Esta é influenciada pelos tipos e pelas quantidades de

aglomerantes e agregados, pelo tempo e pela intensidade de mistura e pela presença de aditivos como o incorporador de ar (CINCOTTO et al., 1995).

A plasticidade adequada para cada argamassa, de acordo com a finalidade e a forma de aplicação, demanda uma quantidade ótima de água, a qual significa uma consistência ótima que, por sua vez é função da proporção e da natureza dos materiais. Por ser um dos principais fatores condicionantes da propriedade trabalhabilidade, a plasticidade é algumas vezes confundida com a mesma (CARASEK, 2007).

Para a caracterização da plasticidade das argamassas utiliza-se o ensaio da mesa de consistência (*flow table*), conforme a NBR 7215 (ABNT, 1997), e são realizados os procedimentos de ensaio para a determinação do índice de consistência segundo a NBR 13276 (ABNT, 2005).

### **3.1.2.3 Consistência**

A consistência é a propriedade reológica pela qual a argamassa resiste à deformação, isto é, trata-se da maior ou menor facilidade da argamassa deformar-se sob a ação das cargas (CINCOTTO et al., 1995 apud SILVA, 2006; TRISTÃO, 1995; CARNEIRO, 1999).

Segundo Cruz (2008), a consistência de uma argamassa está diretamente relacionada à sua quantidade de água e a sua trabalhabilidade. A quantidade de água, por sua vez, pode influenciar as características do revestimento final, alterando a resistência de aderência, a permeabilidade à água e a capacidade de absorver deformações.

As argamassas podem ter a consistência seca, devido ao preenchimento da pasta entre os vazios dos grãos; plástica, que é o fenômeno evidenciado quando a pasta forma uma fina película e atua como lubrificante na superfície dos agregados, e fluida, quando os grãos estão imersos na pasta (SILVA, 2006). Ainda segundo o autor, a consistência é uma relação entre a água e o aglomerante, o aglomerante e o agregado miúdo, a granulometria do agregado miúdo e a natureza e a qualidade do aglomerante.

Os autores Cortes et. al., (2008), verificaram que um adequado índice de consistência foi atingido quando o volume de pasta exceder o volume de vazios dos agregados, levando-se em consideração a forma destes.

Para a avaliação da consistência da argamassa utiliza-se o ensaio da mesa de consistência (*flow table*) conforme a NBR 7215 (ABNT, 1997) e são realizados os procedimentos de ensaio para a determinação do índice de consistência segundo a NBR 13276 (ABNT, 2005). Porém, diversos autores criticam tal ensaio devido à falta de sensibilidade para medir a reologia da argamassa (GOMES et al., 1995; YOSHIDA; BARROS, 1995; JOHN, 2003; NAKAKURA, 2003; CARDOSO et al., 2005; BAUER et al., 2005).

Outros métodos utilizados para avaliar a consistência são: o método da penetração do cone, preconizado pela norma ASTM C780 (2009); o método *vane test* (ensaio de palheta); o ensaio de *dropping Ball*, prescrito pela norma BS 4551 (BSI, 2005), e, mais recentemente, devido principalmente à grande sensibilidade às variações do comportamento reológico da argamassa, vem sendo empregado o método *squeeze-flow*.

#### **3.1.2.4 Retenção de Água**

A retenção de água corresponde à propriedade que confere à argamassa a capacidade de não alterar sua trabalhabilidade, mantendo-se aplicável por um período adequado de tempo quando sujeita a solicitações que provoquem perda de água, seja por evaporação, sucção do substrato ou reações de hidratação, (FREITAS, 2010).

Além de interferir no comportamento da argamassa no estado fresco (como no processo de acabamento e na retração plástica), a retenção de água afeta também as propriedades da argamassa endurecida. Para que as reações químicas de endurecimento dos aglomerantes se efetuem de maneira apropriada, as argamassas dependem, em grande parte, de uma adequada retenção de água. A retenção de água é alterada em função da composição das argamassas (CARASEK, 2007). A Fig. 2 ilustra de forma qualitativa o aumento da retenção de água para diferentes tipos de argamassas.

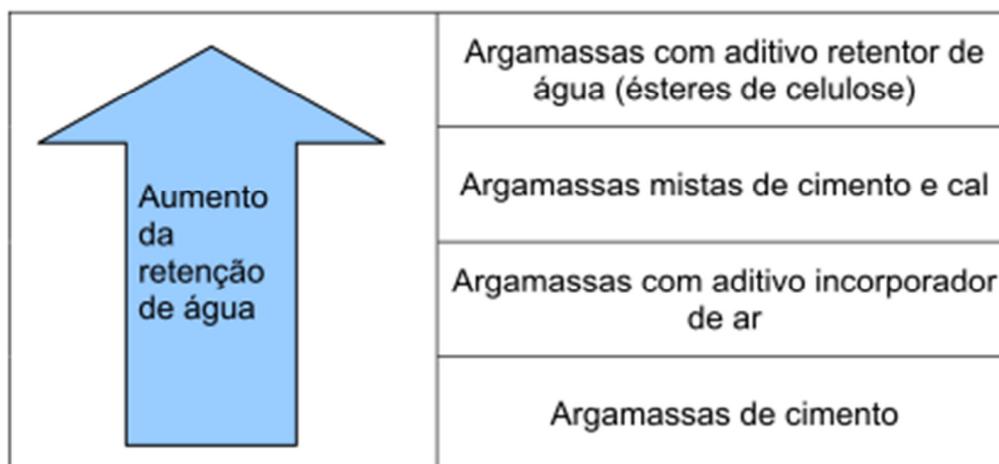


Figura 2 - Variação da retenção de água para diferentes tipos argamassas.  
Fonte: CARASEK, 2007.

As argamassas com cal apresentam características favoráveis de retenção de água pela elevada superfície específica da cal e pela grande capacidade de adsorção de seus cristais. A retenção de água influencia sobre as propriedades do estado endurecido, na medida em que determina as condições de hidratação do cimento e a carbonatação da cal, responsáveis pela evolução do processo de endurecimento. A resistência mecânica e de aderência do revestimento são afetadas pela retenção de água na medida em que esta interfere nas condições de contato da argamassa com a base (CINCOTTO, et.al., 1995).

A determinação da retenção de água das argamassas é por meio do funil de Büchner, de acordo com a norma NBR 13277 (ABNT, 2005).

Para argamassas de revestimento a retenção de água influencia no tempo disponível para a sua aplicação, regularização e desempenho, assim como afeta algumas propriedades no estado endurecido ao influenciar as reações dos aglomerantes durante a cura. Porém, esta propriedade pode variar em função das condições do ambiente e das características de absorção da base (MATTOS, 2001). A retenção de água também influencia na retração por secagem, que é uma das principais causas de fissuração das argamassas no estado endurecido, devido à velocidade de evaporação da água de amassamento, prejudicando a estanqueidade e a durabilidade do revestimento (CARNEIRO, 1999).

### **3.1.2.5 Retração**

A retração é resultado de fenômenos químicos e físicos que ocorrem quando há uma variação de volume da pasta aglomerante. Esta é relevante no desempenho das argamassas aplicadas, especialmente quanto à estanqueidade e durabilidade.

A retração nas argamassas acontece principalmente por causa da perda de água para o ambiente, por evaporação, e para a base de aplicação. A retração evolui durante a pega e, em condições normais de exposição ao ar, após o endurecimento das argamassas. A retração que ocorre com a argamassa ainda fresca é uma questão de contração volumétrica do material pela saída da água de mistura. Na argamassa endurecida, após a saída da água livre presente nos capilares, a retração é provocada pela perda da água adsorvida, isto é, perda da água que está fisicamente aderida à parede dos capilares da pasta. Em condições especiais severas de secagem, estudos sobre pastas de cimento descrevem também a retração pela saída de água interlamelar, presente entre as camadas da estrutura do silicato de cálcio hidratado (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

A retração é influenciada pela granulometria da areia, ou seja, quanto maior o volume de vazios a ser preenchido pela pasta, maior o teor de pasta e conseqüentemente maior a retração. Argamassas muito ricas em cimento estão mais sujeitas a tensões de tração que causarão fissuras. Os materiais pulverulentos (grãos com tamanho inferior a 0,075mm) têm grande influência sobre a retração das argamassas. Em geral, quanto maior o teor de finos, maior a retração, principalmente quando os grãos possuem dimensões inferiores a 0,005mm, chamados de argila. Estes finos requerem uma maior quantidade de água de amassamento, devido retração e fissuração (CARASEK, 2007). A determinação da retração por secagem e perda de massa de argamassas é normatizada pela NBR 15261 (ABNT, 2005).

### **3.1.2.6 Aderência**

A aderência é uma propriedade relevante na interação das argamassas de revestimento com o suporte, sendo determinante para o seu comportamento

mecânico e durabilidade, a qual será tanto mais elevada quanto maior for a compatibilidade do revestimento ao suporte.

Esta propriedade está associada à capacidade da argamassa em absorver tensões normais ou tangenciais na superfície de interface com o suporte, isto é, a capacidade para resistir a deslocamentos por tração e por cisalhamento, sem causar danos, tais como destacamentos (AGOSTINHO, 2008).

Segundo Carvalho Jr. (2005), a aderência da argamassa fresca e da argamassa endurecida é significativamente influenciada pelas condições da base, como a porosidade e absorção de água, resistência mecânica, textura superficial e pelas próprias condições de execução do assentamento de componentes da base. A capacidade de aderência da interface base-argamassa depende, ainda, da capacidade de retenção de água, da consistência e do teor de ar incorporado na argamassa.

De acordo com Carasek (2007), a aderência deriva da conjugação de três propriedades da interface argamassa-substrato:

- ✓ A resistência de aderência à tração;
- ✓ A resistência de aderência ao cisalhamento;
- ✓ A extensão de aderência, sendo esta correspondente à razão entre a área de contato efetivo e a área total possível de ser unida.

A aderência também é influenciada pelo tipo de cimento utilizado na argamassa. Quanto mais fino o cimento, maior é a aderência. Maior valor de resistência de aderência é obtido quando se emprega o cimento Portland de Alta Resistência Inicial em comparação aos demais cimentos Portland. No entanto, deve-se ter atenção com o uso desta informação, uma vez que em virtude de sua maior finura, cimentos de alta resistência inicial podem levar à retração e fissuração do revestimento de modo mais fácil do que outros cimentos, considerando-se o mesmo consumo (CARASEK, 2007).

As argamassas contendo cal preenchem mais facilmente e de maneira mais completa toda a superfície do substrato, propiciando maior extensão de aderência. Por sua vez, a durabilidade da aderência é propiciada pela habilidade da cal em evitar fissuras e preencher vazios, o que é conseguido através da reação de carbonatação que se processa ao longo do tempo. Esse aspecto particular da cal, conhecido como restabelecimento ou reconstituição autógena, representa uma das

vantagens do uso deste aglomerante nas argamassas de revestimento (CARASEK, 2007).

A análise da aderência das argamassas está relacionada à sua microestrutura. Através de estudos em nível microestrutural empregando microscópio eletrônico de varredura, Carasek (1996), confirmou que a aderência ocorre em função do intertravamento principalmente da etringita (um dos produtos da hidratação do cimento) no interior dos poros do substrato, conforme apresentado na Fig. 3.

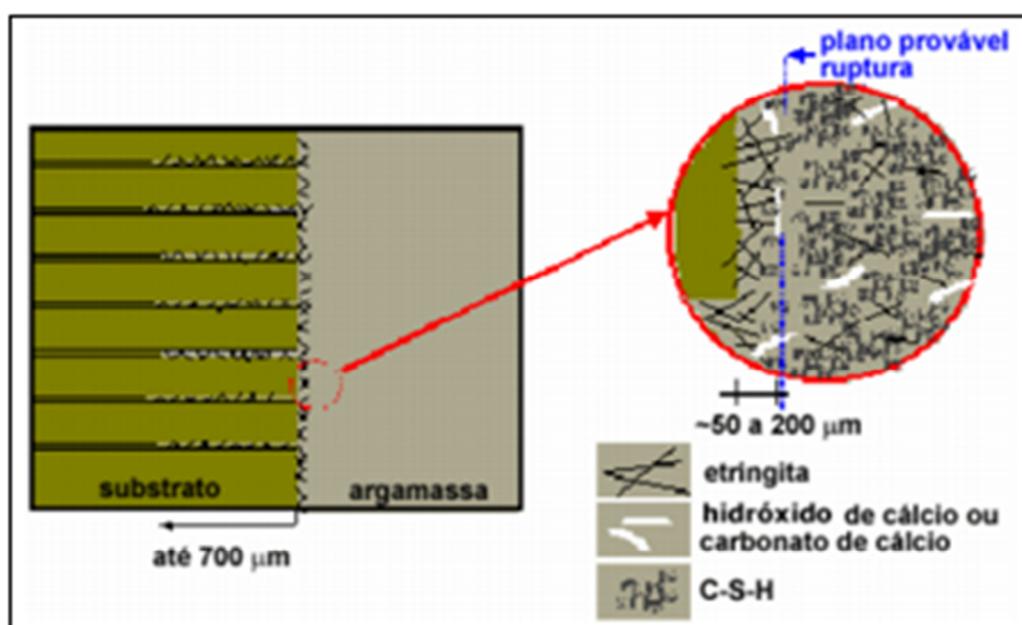


Figura 3 – Representação esquemática do mecanismo de aderência.  
Fonte: CARASEK, 1996.

Segundo Carasek (1996), o aumento local da concentração de etringita ( $C_6 AS_3H_{32}$ ) surge quando, ao se misturar o cimento Portland com água, a gipsita empregada como reguladora de pega do cimento dissolve-se e libera íons de sulfato e cálcio, que são os primeiros a entrar em solução, seguidos dos íons de aluminato de cálcio, provenientes da dissolução do aluminato de cálcio ( $C_3 A$ ) do cimento. Devido ao efeito de sucção ou absorção capilar causado pela base porosa, tais íons em solução são transportados para regiões mais internas do substrato formando no interior dos poros o trissulfoaluminato de cálcio hidratado, também denominado de etringita. A etringita preenche prioritariamente os poros capilares, o que explica a sua maior abundância na zona de contato argamassa/substrato e em poros

superficiais da base. Com menos espaço para precipitação, outros produtos de hidratação do cimento, como o C-S-H, por exemplo, ou mesmo produtos posteriores da carbonatação da cal como a calcita, aparecem em menor quantidade.

### 3.1.2.7 Módulo de Elasticidade

A definição de elasticidade foi fundamentada pelo cientista inglês Robert Hooke, em 1676, quando em seus estudos observou que para alguns materiais a força aplicada no sentido de alongamento do objeto e de sua extensão, até um determinado limite de solitação, se mantinham proporcionais. Contudo, em 1807, o físico inglês Thomas Young foi o primeiro a estabelecer o critério de módulo de elasticidade relacionando o comprimento de um objeto a tensão aplicada sobre o mesmo.

A deformação é uma propriedade das argamassas que influi no seu desempenho e o seu módulo avalia sua capacidade de deformação frente a esforços, sem que ocorram rupturas prejudiciais ao seu desempenho (fissuras visíveis), contudo não existem normas brasileiras para a sua definição.

Um revestimento de argamassa, quando submetido a tensões, deve ter a capacidade de absorver deformações sem sofrer ruptura ou fissuração que prejudiquem o seu desempenho, principalmente em relação à estanqueidade e a aderência. Esta característica está intimamente relacionada com o módulo de elasticidade da argamassa que é, em geral, diminuída por elevadas dosagens de cimento (CRUZ, 2008).

A definição do módulo de elasticidade (equação 1), segundo a lei de Hooke, é a relação entre a tensão ( $\sigma$ ) aplicada a um corpo e a deformação ( $\varepsilon$ ) resultante desta tensão.

$$E = \sigma / \varepsilon \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

E = módulo de elasticidade ou módulo de Young;

$\sigma$  = tensão aplicada;

$\varepsilon$  = deformação ou alongamento relativo.

### 3.1.2.8 Permeabilidade

A permeabilidade à água é uma propriedade que está relacionada com a função de estanqueidade da parede, que ganha bastante importância quando se trata de revestimentos de fachada. A umidade infiltrada pelas paredes poderá causar problemas que comprometem a saúde dos usuários e a estética do edifício, além de estar associada a manifestações patológicas como eflorescências, descolamentos e manchas de bolor e mofo (CARASEK, 2007).

A velocidade com que os líquidos e gases movem-se no interior de um material é determinada pela permeabilidade. A permeabilidade e a absorção capilar influenciam na durabilidade dos materiais, uma vez que os agentes agressivos do meio ambiente, como a água da chuva que incide nas fachadas, dependem dessas características para penetrar no seu interior. Um revestimento de fachada com elevada absorção de água pode permanecer úmido por um longo período de tempo e facilitar a deposição de partículas de poluição presentes na atmosfera, facilitando a proliferação de microorganismos (CHEW e PING, 2003 apud UEMOTO, et.al., 2009).

A granulometria do agregado, a natureza e o teor do aglomerante exercem particular influência sobre a permeabilidade. De modo geral, as argamassas de cimento são menos permeáveis, diminuindo com o aumento do teor de cimento. É diretamente proporcional à relação água/aglomerante(s) e inversamente proporcional à resistência da pasta aglomerante (CINCOTTO, et.al., 1995).

O método mais usual de avaliação da permeabilidade e da absorção de um revestimento é o do “cachimbo” proposto pelo *Centre Scientifique et Technique de la Construction – CSTC* e pela *Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux – RILEM*.

### 3.1.2.9 Resistência Mecânica

A resistência mecânica das argamassas de revestimento é definida como um estado de consolidação interna capaz de suportar esforços mecânicos das mais diversas origens que se traduzem por tensões simultâneas de tração, compressão e cisalhamento. Os esforços que geram as tensões nos revestimentos provêm de cargas estáticas ou dinâmicas decorrentes do tipo de uso da edificação e das

solicitações decorrentes de fenômenos térmicos ou climáticos que, por sua vez, dependem das condições de exposição das superfícies (CINCOTTO, et.al., 1995).

Segundo Carvalho Jr. (2005), a resistência mecânica das argamassas é influenciada basicamente pela natureza dos aglomerantes, dos agregados, da proporção aglomerante/agregado, da relação água/cimento da mistura fresca e pela técnica de execução do revestimento.

A resistência à compressão manifesta-se na argamassa a partir do seu endurecimento. O endurecimento em argamassas de cimento ocorre pelas reações de hidratação do cimento quando, na presença de água, os silicatos e aluminatos constituintes do cimento resultam em produtos hidratados na pasta endurecida. As propriedades mecânicas da pasta hidratada dependem da estrutura física dos produtos resultantes da hidratação, especialmente das forças físicas e químicas de coesão, da relação água/cimento e do teor do aglomerante (CINCOTTO, et.al., 1995). A resistência à tração por compressão diametral das argamassas é determinada pela NBR 7222 (ABNT, 2011).

A determinação da resistência de aderência à tração é normatizada pela NBR13528 (ABNT, 2010). O processo de ensaio descrito pela norma é realizado com uma pastilha de 50 mm que é colada sobre uma seção de argamassa previamente cortada e isolada do restante do revestimento até ultrapassar 5 mm do substrato, posteriormente submetida a uma tensão por equipamento mecânico ou hidráulico.

De acordo com Antunes (2005), a resistência à tração da argamassa é uma das componentes que definem a resistência de aderência à tração. A resistência à tração da argamassa representa o máximo valor que a resistência de aderência pode atingir, visto que os macro-defeitos na interface argamassa e substrato são os responsáveis pelos menores valores comumente observados para aderência. Ou seja, a resistência à tração da argamassa pode ser considerada como a máxima aderência potencial que o sistema pode atingir.

O ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento em argamassas não está normatizado no Brasil, contudo alguns trabalhos que utilizam o referido ensaio baseiam-se nas normas da RILEM (*Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux*), que apresenta dois métodos para a sua medição, os quais

são o MR-14: *Determination of the bond of renderings by shear tests* e o MR-20: *Determination of the bond strenght of rendering by torsion test*.

### **3.2 Argamassas industrializadas**

No Brasil, segundo a NBR 13529 (ABNT, 2013), argamassas industrializadas são definidas como constituídas de uma mistura seca de aglomerante, agregado e aditivo, a qual o usuário adiciona a quantidade de água requerida para proceder à mistura. São produtos provenientes de dosagem controlada, obtidos em instalações próprias (indústrias). Sua utilização deve atender as recomendações de preparo e aplicação do fabricante, garantindo, assim, o rendimento do produto e o desempenho esperado.

Para a caracterização e controle da qualidade das argamassas industrializadas são utilizadas as normas brasileiras NBR 13276 (ABNT, 2005) e NBR 13280 (ABNT, 2005), que tratam da determinação do teor de água para obtenção do índice de consistência padrão, retenção de água, massa por unidade de volume, resistência à compressão e massa aparente no estado endurecido das argamassas industrializadas utilizadas para revestimentos de paredes.

A NBR 13281 (ABNT, 1995) define e classifica as argamassas industrializadas. A Tab. 3 apresenta esta classificação. A partir de 31 de Outubro de 2005, esta norma foi reformulada e ampliada com mais sete requisitos para as argamassas industrializadas. A Tab. 4 apresenta os novos requisitos com seus devidos parâmetros classificatórios.

Tabela 3 – Classificação das argamassas industrializadas.

Características	Método de ensaio	Identificação	Limites
Capacidade de Retenção de Água	NBR 13277	Normal / Alta	$\geq 80$ e $\leq 90$
Teor de Ar Incorporado (%)	NBR 13278	A B C	< 8 $8 \leq e \leq 18$ > 18
Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	NBR 13279	I II III	$0,1 \leq e < 4$ $4 \leq e < 8$ > 8

Fonte: NBR 13281 (ABNT, 2005).

Tabela 4 – Classificação de argamassas industrializadas de assentamento e revestimento de paredes e tetos.

Classes	P	M	R	C	D	U	A
	MPa	Kg/m <sup>3</sup>	MPa	g/dm <sup>2</sup> /min <sup>1/2</sup>	Kg/m <sup>3</sup>	%	MPa
1	$\leq 2,0$	$\leq 1200$	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$	$\leq 1400$	$\leq 78$	$\leq 0,20$
2	1,5 a 3,0	1000 a 1400	1,0 a 2,0	1,0 a 2,5	1200 a 1600	72 a 85	$\geq 0,20$
3	2,5 a 4,5	1200 a 1600	1,5 a 2,7	2,0 a 4,0	1400 a 1800	0 a 90	$\geq 0,30$
4	4,0 a 6,5	1400 a 1800	2,0 a 3,5	3,0 a 7,0	1600 a 2000	86 a 94	
5	5,5 a 9,0	1600 a 2000	2,7 a 4,5	5,0 a 12,0	1800 a 2200	91 a 97	
6	> 8,0	> 1800	> 3,5	> 10,0	> 2000	95 a 100	

Fonte: NBR 13281 (ABNT, 2005).

Obs.: **P** - resistência à compressão; **M** – densidade de massa aparente no estado endurecido; **R** – resistência à tração na flexão; **C** – coeficiente de capilaridade; **D** – densidade de massa no estado fresco; **U** – retenção de água; **A** – resistência potencial de aderência à tração.

### 3.3 Nanotubos de Carbono (NTC)

Um dos primeiros cientistas a sintetizar nanotubos de carbono foi o pesquisador japonês Sumio Iijima, em 1991, utilizando-se de elevadas temperaturas – de 3.000 a 4.000<sup>o</sup> C - para a sua obtenção (LIJIMA, 1991 apud COUTO, 2006).

Conceitualmente, nanotubos de carbono (NTC) são definidos como cilindros formados por átomos de carbono com estruturas em arranjo hexagonal de tamanho nanométrico, sendo que seu comprimento pode variar bastante, em função da técnica utilizada para a produção do material.

Os pesquisadores Chaipanich et al., (2010), relatam que estas estruturas possuem uma resistência cerca de 100 vezes maior que a do aço e aproximadamente seis vezes mais leve, por possuir uma estrutura ideal formada por átomos de carbono.

Os NTC são utilizados nas mais diversas áreas de engenharia e são diferenciados entre si como sendo de parede simples (NTCPS), porque se constituem de uma única folha de grafeno enrolada Fig. 4a, e de paredes múltiplas (NTCPM), porque são formados por um conjunto de folhas de grafeno enroladas coaxialmente (Fig. 4b).

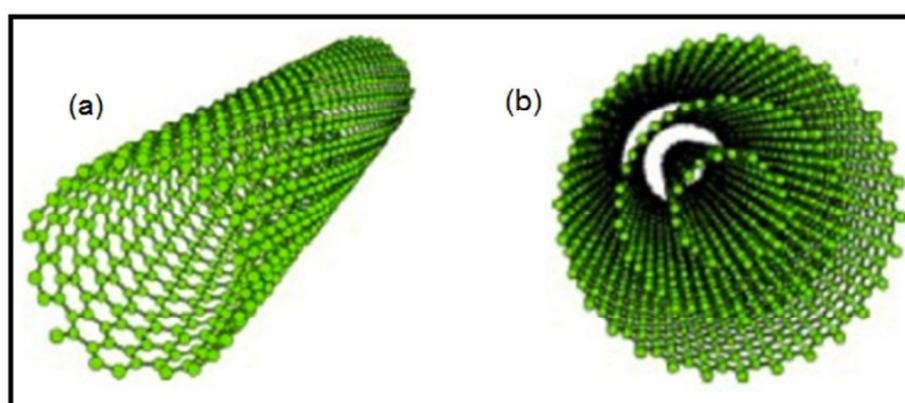


Figura 4 - a) Nanotubos de carbono de parede simples (NTCPS); b) Nanotubos de carbono de parede múltipla (NTCPM).  
Fonte: ZARBIN, 2007.

De acordo com Herbst et al., (2004), os nanotubos de paredes simples são os mais difíceis de serem sintetizados o que eleva o seu custo e, praticamente, impede sua aplicação em grande escala.

### 3.3.1 Obtenção de Nanotubos de carbono (NTC)

Atualmente, existem três métodos disponíveis para a obtenção dos NTC, sendo estes: Descarga por Arco, Ablação a Laser e Deposição Química de Vapor.

#### 3.3.1.1 Método de Descarga por Arco

O método de descarga por arco caracteriza-se por uma descarga de arco elétrico gerado entre dois eletrodos cilíndricos de grafite inseridos em uma câmara de aço que geralmente contém um gás inerte (Fig. 5). Na câmara os dois eletrodos são mantidos a uma distância pequena para facilitar a passagem de corrente e a geração de um plasma entre os eletrodos a uma temperatura aproximada de 3000° a 4000°C, para que finalmente o grafite seja sublimado e depositado nas paredes da câmara, dando assim origem aos nanotubos de carbono e outros subprodutos do carbono tais como fulerenos, carbono amorfo e fuligem (LIJIMA, 1991 apud COUTO, 2006).

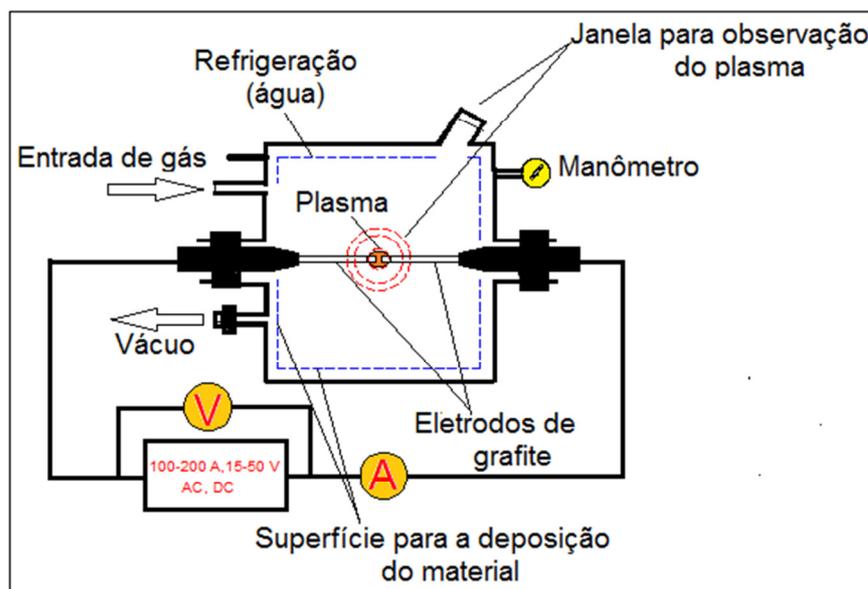


Figura 5 - Representação esquemática da síntese de NTC pelo método de descarga por arco.

Fonte: Adaptado de JOURNET, 1998.

No método de descarga por arco as correntes de alta intensidade aquecem os eletrodos, vaporizando o grafite que se condensa na forma de uma fuligem que

contém os nanotubos de carbono. Posteriormente, é realizado um complicado processo de purificação, cujo objetivo é separar os nanotubos de outras formas indesejáveis de materiais amorfos produzidos pelo processo (CAPAZ e CHACHAM, 2003).

Este método possibilita tanto a produção de NTC de parede simples como os de paredes múltiplas. Para a síntese de NTC de parede simples os eletrodos devem ser dopados com uma pequena quantidade de catalisadores metálicos tais como: ferro (Fe), níquel (Ni), cobalto (Co), molibdênio (Mo), entre outros, e para a síntese dos NTC de paredes múltiplas não há a necessidade de dopar os eletrodos.

### 3.3.1.2 Método de Ablação a Laser

O método de Ablação a Laser consiste na vaporização da superfície de um disco de grafite que é colocado dentro de um tubo de quartzo, conforme mostrado na Fig. 6, onde a temperatura é elevada para aproximadamente 1200°C (DRESSELHAUS et al., 2004). Posteriormente, o tubo é preenchido com gás inerte e o laser é focalizado sobre o alvo de grafite. O laser percorre toda a superfície do alvo com a finalidade de manter uma superfície de vaporização sempre lisa e uniforme.

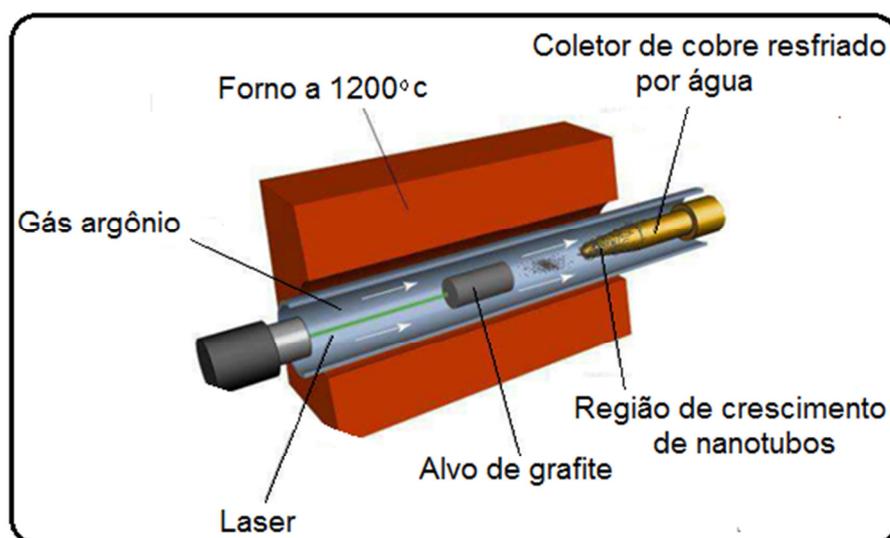


Figura 6 - Representação do aparato experimental de ablação a laser.  
Fonte: YAKOBSON, 1997.

O método é capaz de produzir nanotubos de paredes simples e de paredes múltiplas. Os nanotubos de paredes simples são obtidos quando dopamos o alvo de grafite com uma pequena quantidade de metal de transição, já os nanotubos de paredes múltiplas são obtidos quando o grafite puro é submetido à ablação, que é a remoção de carbono por aquecimento.

Este método apresenta alguns aspectos semelhantes ao método da descarga por arco elétrico, já que ambos utilizam o mesmo tipo de gás como atmosfera para o crescimento dos nanotubos e a mesma mistura de metais de transição como catalisadores.

### 3.3.1.3 Método da Deposição Química de Vapor

O método de deposição química de vapor (*Chemical Vapour Deposition – CVD*) ocorre em um reator, conforme mostrado na Fig. 7 e envolve a reação de decomposição de um precursor de carbono, normalmente um hidrocarboneto insaturado, na presença de um catalisador metálico (Fe, Co, Ni) em condições adequadas de temperatura em torno de 500<sup>o</sup> a 1000<sup>o</sup> C e taxa de aquecimento e atmosfera inertes. O catalisador empregado pode ser gerado *in situ* ou ser previamente suportado sobre um substrato adequado a sua presença (COUTO, 2006).

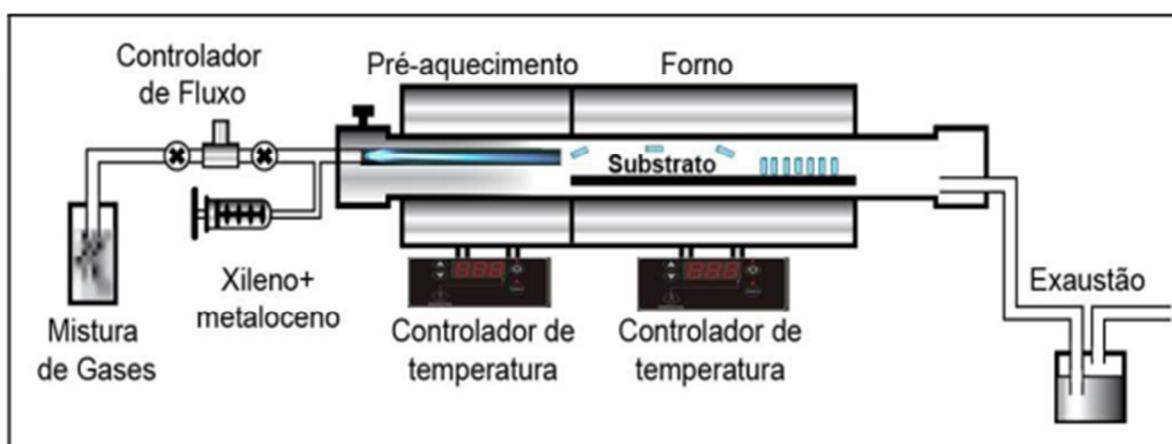


Figura 7 - Representação esquemática de um reator CVD.  
Fonte: ANDREWS, 1999.

A deposição química de vapor para a produção de nanotubos, quando comparado com os métodos de descarga por arco e ablação a laser, mostra-se um método mais barato porque requer uma temperatura de deposição mais baixa, de aproximadamente 500 a 1000°C.

A qualidade e a forma dos nanotubos crescidos dependem fortemente da temperatura. Para nanotubos de paredes múltiplas, as temperaturas típicas de crescimento são de aproximadamente de 600 a 750 °C e para nanotubos de paredes simples são de aproximadamente 850 a 1000 °C (MOISALA, 2003).

### **3.3.2 Incorporação de NTC em argamassas cimentícias**

Com o avanço da tecnologia alguns estudos realizados comprovam o bom desempenho dos nanotubos de carbono quando adicionadas a argamassas cimentícias. Em função de seu tamanho reduzido, escala nanométrica, estas partículas são responsáveis pelo preenchimento de vazios, reduzindo, portanto, a porosidade e, como consequência, propiciando uma melhora significativa nas propriedades das argamassas.

Os autores Li et al., (2004), em seus estudos sobre as propriedades mecânicas de argamassas de cimento aditivadas, constataram que a resistência à compressão dessas argamassas aumenta significativamente com a incorporação de nanopartículas. Segundo os autores os ganhos obtidos podem ser assim explicados:

- ✓ Quando uma pequena quantidade de nanopartículas é uniformemente dispersa na pasta de cimento, estas agem como um núcleo de ligação e de hidratação do cimento devido a sua alta atividade, o que é favorável para a resistência mecânica;
- ✓ As nanopartículas presentes entre os produtos hidratados impedem o crescimento de cristais, tais como o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (hidróxido de cálcio), o que favorece a resistência mecânica;
- ✓ As nanopartículas preenchem os poros da pasta de cimento, tornando-a mais densa e aumentando, assim, a resistência, de modo similar ao efeito da sílica ativa.

De acordo com Makar et al., (2005), existe a possibilidade dos nanotubos influenciarem no controle da fissuração, uma vez que, devido a seu tamanho, estes

se distribuem melhor e interrompem a propagação de fissuras e fazem com que as trincas geradas apresentem aberturas menores. Em seus experimentos os autores usaram a quantidade de 2% de NTCPM em relação à massa do cimento, uma relação água/cimento de 0,4 e dosagem de 1% de aditivo plastificante, também em relação à massa de cimento. Na Fig. 8 pode-se verificar a microfissura na pasta de cimento com três dias de hidratação, a distribuição dos NTCPM e, também, a presença dos NTC agindo como pontes de aderência.

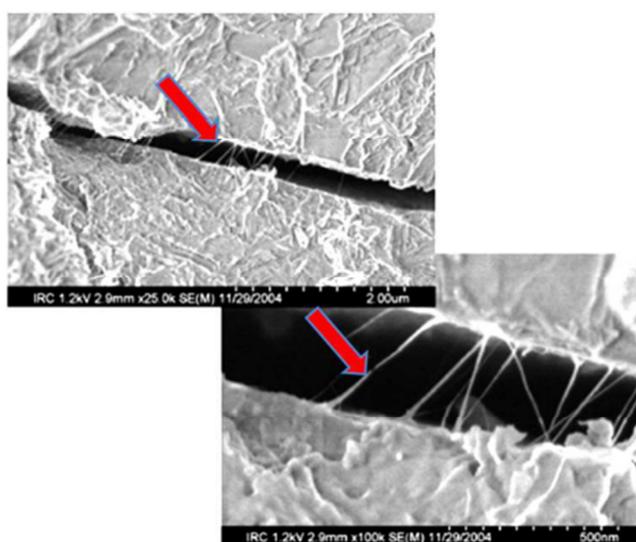


Figura 8 - Microfissura em uma pasta de cimento aditivada com 2% de NTC.  
Fonte: MAKAR (2005).

Em trabalhos mais recentes, os pesquisadores Sobolev et al., (2008), também, observaram a ação benéfica das nanopartículas na microestrutura e no desempenho de materiais à base de cimento. Para os autores as melhorias nas propriedades obtidas podem ser explicadas pelos seguintes fatores:

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

- ✓ As nanopartículas também 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.

Segundo Sanchez (2010), quando se alteram as dimensões de um material do tamanho macro para o nano, ocorrem mudanças significativas em sua condutividade elétrica, absorção ótica, reatividade química e nas propriedades mecânicas. Com a redução no tamanho, mais átomos localizam-se na superfície das partículas, implicando a uma mudança considerável na energia de superfície e na morfologia desta. Como resultado todos esses fatores alteram as propriedades básicas e a reatividade química dos nanomateriais.

Quanto ao desempenho mecânico, os pesquisadores Melo et al., (2010) estudaram a resistência à compressão e à tração por compressão diametral em argamassas constituídas de cimento Portland CP V – ARI, nanotubos de carbono de paredes múltiplas, obtidos pelo processo de decomposição química a vapor, e aditivo superplastificante a base de melamina-formaldeído. Os nanotubos foram purificados e depois funcionalizados utilizando-se ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ). Estes foram testados nas quantidades de 0,2; 0,3; 0,5; 0,75 % em relação à massa de cimento. Os resultados mostraram que o teor de 0,3% de NTCPM em relação à massa de cimento foi o que resultou em argamassa de melhor desempenho quanto à resistência à compressão e à tração por compressão diametral aos 28 dias, indicando haver um teor ótimo de adição deste material em matrizes de cimento Portland (WANSOM et al., 2006).

### **3.3.3 Métodos de Dispersão de NTC**

Os primeiros problemas que surgiram na adição de NTC em matrizes cimentícias foram os de distribuição destes na matriz e o de sua interação com os compostos resultantes da hidratação do cimento, visto que os NTC tendem a se aglomerar e repelir as moléculas de água, formando pontos frágeis e um aumento na porosidade do material (MELO et al., 2010). O desenvolvimento de pesquisas para a solução desses problemas levou a tratamentos superficiais dos NTC, por

funcionalização a base de ácidos sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) e nítrico ( $HNO_3$ ), e ao uso de tensoativos, (VAISMAN et al., 2006), para melhorar a sua interação com a água, uma vez que estes são hidrofóbicos.

A funcionalização com ácidos possibilita a adição de radicais carboxilas na superfície dos NTC, o que em meio alcalino pode melhorar a dispersão devido aos efeitos de eletro-repulsão. A presença destes radicais pode favorecer a interação dos nanotubos de carbono com o C-S-H, que é o principal composto do cimento hidratado (BATISTON, 2010).

Os autores Esumi et al., (1995) em estudos sobre o tratamento de NTC com ácidos concluíram que o uso de uma mistura de ácido sulfúrico e nítrico é mais eficiente devido ao maior poder de oxidação.

Nos trabalhos de Gleize (2005), que utilizou soluções de água e superplastificante a base de éter policarboxílico modificado e sódio dodecil sulfato, expostas ao ultrassom durante 15, 30, 60, 120 minutos, verificou-se que o tratamento foi ineficiente, pois os NTC decantavam logo após terem sido retirados do ultrassom voltando a se aglomerar, prejudicando a dispersão no cimento.

Já para os pesquisadores Wansom et al., (2006), que usaram para dispersar os NTC uma solução de água e super plastificante a base de policarboxilato, agitada manualmente, por 2 min, e colocada em um aparelho de ultrassom, por 5 min, o resultado foi positivo. Os autores conseguiram incorporar até 1% em volume de NTC ao cimento em pasta, usando uma relação água/ cimento de 0,45.

Quanto ao tempo de dispersão dos NTCPM por ácidos, muitas foram às experimentações. Os pesquisadores Li et al., (2005) mantiveram em um ultrassom a mistura durante 3h, Shaffer et al., (1998) por um tempo de 30 min e Marshall et al., (2006) utilizou tempos variáveis entre 2 e 14h, sendo que para cada tempo determinou a variação do comprimento dos nanotubos resultantes.

O experimento de Marshall et al., (2006) indicou a redução do comprimento dos NTC durante o tratamento químico (Fig. 9). Este encurtamento foi indicado pelos autores como causador da diminuição da resistência mecânica dos NTCPM e do seu desempenho como reforço da matriz cimentícia.

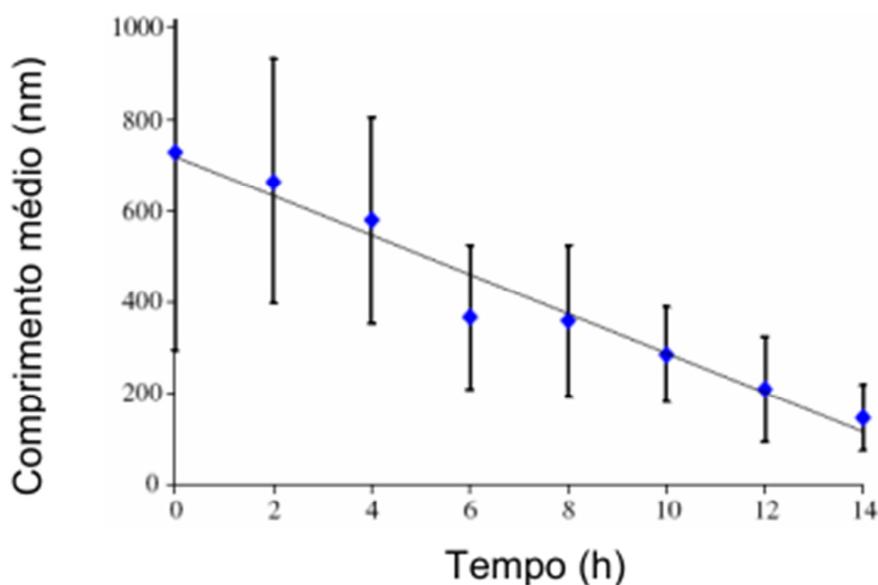


Figura 9 - Comprimento médio de NTC em função do tempo de dispersão com ácido. Fonte: MARSHALL et al., 2006.

Segundo os pesquisadores Koshio et al., (2001), o ultrassom também é uma tecnologia eficiente para a dispersão de NTC em meios como água, óleo ou polímeros. Para os autores, as forças de cisalhamento geradas pelo ultrassom superam as forças de ligação entre os nanotubos, sendo capaz de separá-los. Isto foi comprovado pelos pesquisadores Konsta et al., (2010), que conseguiram uma dispersão eficiente por meio da aplicação de energia ultrassônica e com a utilização de um surfactante. Os resultados mostraram que houve dispersão adequada com a aplicação desta energia.

### 3.3.4 Técnicas de Caracterização de NTC

A caracterização de microestruturas compostas com NTC pode ser feita por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e Microscopia Raman.

#### 3.2.4.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

O princípio da microscopia eletrônica de varredura (MEV) consiste na emissão de um feixe de elétrons por um filamento de tungstênio que concentrado, controlado e reduzido por um sistema de lentes eletromagnéticas, diafragmas e

bobinas, incide sobre a amostra, provocando uma série de emissões de sinais relacionados com a interação do feixe de elétrons incidente e a amostra (Fig. 10). Os sinais emitidos encontram-se sob a forma de elétrons (secundários, retroespalhados, absorvidos, transmitidos, difratados, etc.) e de fótons (fotoluminescentes e raios X), os quais são captados por detectores apropriados, sendo amplificados e processados num sistema analisador específico para cada tipo de sinal.

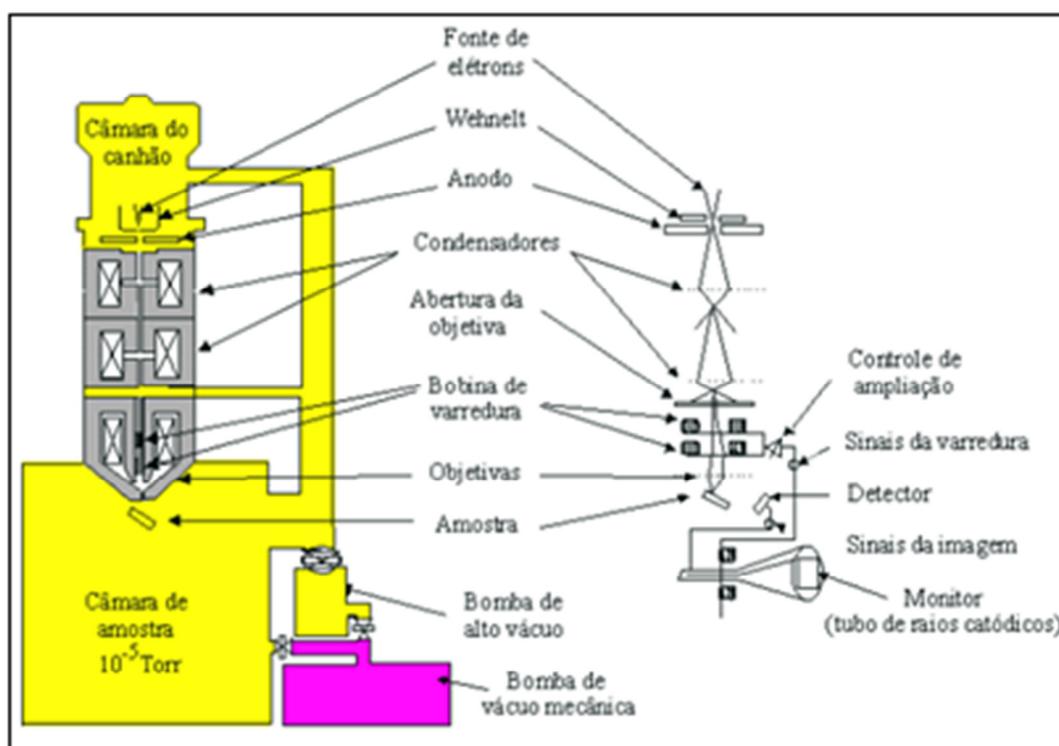


Figura 10 - Representação esquemática de um microscópio eletrônico de varredura - MEV.

Fonte: MANSUR, H.S, 2007.

De acordo com Kestenbach e Botta Filho (1994), a interação que ocorre na microscopia eletrônica de varredura de um feixe de elétrons de alta energia com a superfície da amostra resulta na emissão de elétrons e raios X com uma faixa de distribuição de energia e, em alguns casos, com emissão de radiação catodoluminescente (emissão de luz visível) que possui menor energia que os raios X. Os elétrons gerados pela interação do feixe primário com a amostra podem ser divididos em três tipos: retroespalhados, secundários e Auger, indicados na (Fig. 11).

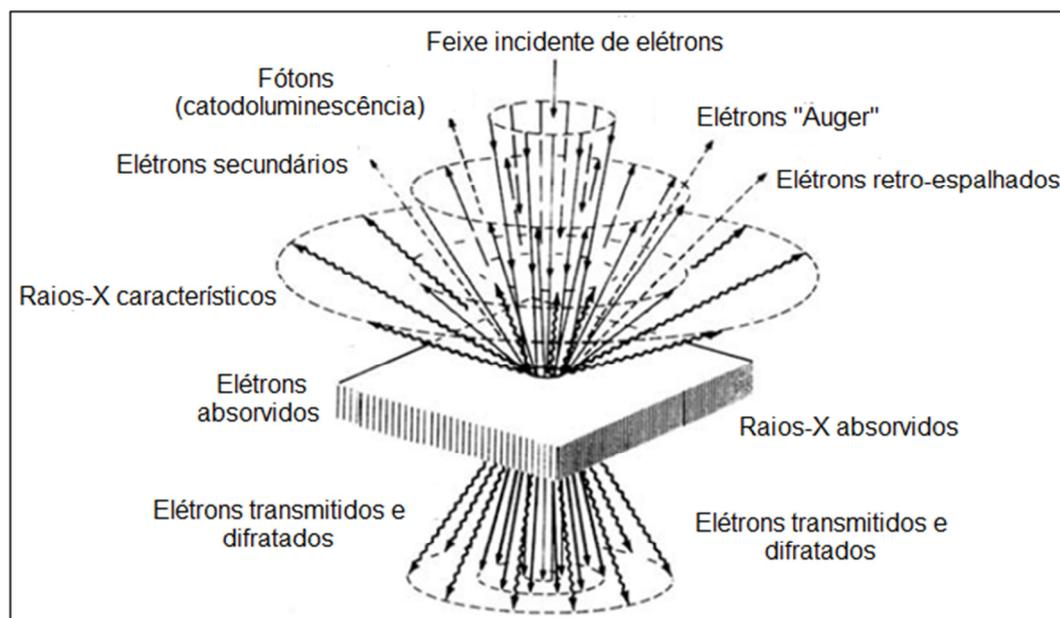


Figura 11 - Tipos de elétrons gerados por microscópio eletrônico de varredura- MEV. Fonte: DAL MOLIN, 2007.

Os elétrons Auger possuem energia variável, profundidade de escape entre 2 e 20 Å e carregam informação sobre a natureza química da amostra. São elétrons formados após a produção de um elétron secundário e não são muito utilizados na microscopia eletrônica de varredura, sendo os elétrons secundários e retroespalhados os sinais de maior interesse para a formação da imagem (DURÁN et al., 2006).

Os elétrons secundários possuem baixa energia (50 eV), emergem de uma profundidade de 100 a 200 Å e fornecem imagem de topografia da superfície da amostra, sendo responsáveis pela obtenção das imagens de alta resolução e aconselháveis para aumentos entre 10 e 100.000 vezes (PADILHA e AMBROZIO FILHO, 2004 apud DURÁN et al., 2006).

Quanto aos elétrons retroespalhados, estes são refletidos por colisões de profundidade entre 300 e 400 Å, obtidos pelo espalhamento elástico dos elétrons cuja trajetória é desviada em mais de 90° em relação à direção do feixe incidente e fornecem imagem característica de variação de composição, sendo indicados para aumentos de até 2.000 vezes. Há dependência entre a intensidade do feixe e o número atômico, sendo que os tons claros correspondem aos elementos com número atômico médio relativamente maior do que aqueles com tons mais escuros. A resolução da imagem de elétrons retroespalhados é menor que a de elétrons

secundários, pois as regiões de liberação de elétrons retroespalhados abrangem uma área maior que aquelas de liberação de elétrons secundários na superfície analisada (DAL MOLIN, 2007).

#### **3.2.4.2 Espectroscopia Raman**

As técnicas de espectroscopia utilizando a luz como fonte de energia para a caracterização dos materiais foram aplicadas desde o começo do século XX. Contudo, somente em 1928, o indiano Chandrasekara Venkata Raman demonstrou experimentalmente o fenômeno que ficou conhecido como efeito Raman (TWARDOWSKI; ANZENBACKER, 1994).

A espectroscopia Raman estuda a interação da radiação eletromagnética com a matéria, sendo um dos seus principais objetivos a determinação dos seus níveis de energia vibracional de átomos ou moléculas. Também, é possível obter informações sobre a estrutura molecular e as ligações químicas presentes. Nas moléculas a região espectral onde as transições são observadas depende do tipo de níveis envolvidos, eles podem ser eletrônicos, vibracionais ou rotacionais (SILVA, 2005).

O efeito Raman pode ser explicado pela colisão entre o fóton incidente e a molécula. Isto muda os níveis de energia vibracional e ou rotacional da molécula por um incremento de energia. Pela lei de conservação de energia, significa que as energias dos fótons incidentes e espalhados serão diferentes, ou seja, o incremento de energia incidente é diferente do incremento de energia espalhada. Este fenômeno ocorre toda a vez que uma onda eletromagnética interage com os modos normais de vibração de um determinado material permitindo que esta radiação interaja com a matéria por processos de absorção ou espalhamento, caracterizando-se este espalhamento como elástico ou inelástico.

O processo se constitui pelo espalhamento inelástico de radiação eletromagnética e monocromática que interage com as moléculas. As frequências vibracionais são determinadas pelas diferenças entre as frequências de radiação espalhada e de radiação incidentes (SALA, 1996 apud HANLON et al., 2000).

A energia total de uma molécula indicada pela equação abaixo é o somatório das energias eletrônica, vibracional e rotacional, sendo a energia eletrônica muito maior que a vibracional e esta por sua vez maior que a rotacional (SILVA, 2005).

$$E_{\text{total}} = E_{\text{el}} + E_{\text{vibr}} + E_{\text{rot}} \quad (\text{Equação 2})$$

Ao incidir um feixe luz monocromático sobre um determinado material ocorrerá uma interação entre os fótons desta luz e as vibrações da rede, dando origem a um fenômeno óptico de baixo sinal e raros de serem detectados, denominados de espalhamento de luz. A Fig. 12 ilustra os espalhamentos de luz gerados pela espectrometria.

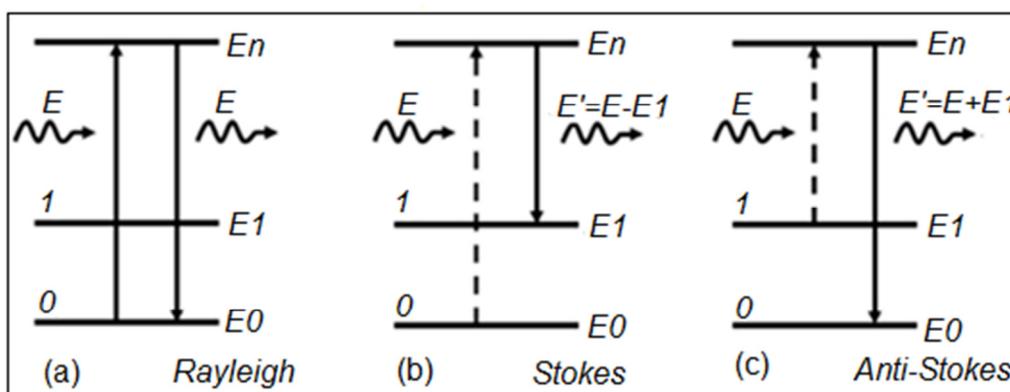


Figura 12 - (a) Espalhamento elástico (Rayleigh) (b) espalhamento Raman Stokes e (c) espalhamento Raman anti-Stokes.  $E$ - energia incidente,  $E_0$  energia no estado fundamental,  $E_1$ - energia no estado vibracional 1,  $E'$ - energia espalhada,  $E_n$ - enésimo nível de energia.

Fonte: SILVEIRA, 2009.

Quando a luz espalhada tem a mesma frequência, ou seja, possui a mesma energia “ $E$ ” que a luz incidente, o fenômeno é do tipo elástico, pois ocorre sem mudança de energia e é denominado de espalhamento Rayleigh (Fig. 12a). Por outro lado, quando o fenômeno ocorre com mudança de energia, é do tipo inelástico, chamado de espalhamento Raman, que pode resultar tanto em um fóton de menor energia, quanto em um fóton de maior energia (SILVEIRA, 2009).

Logo o efeito Raman ocorre quando a molécula de certo material é atingida por um fóton de energia “ $E$ ”, que é absorvido pela molécula e emite outro fóton de energia “ $E'$ ” o qual pode possuir energia  $E > E'$  ou energia  $E < E'$ .

Para o caso de  $E > E'$ , o efeito é conhecido como espalhamento Raman Stokes (Fig. 12b), em que o fóton incidente  $E$  encontra a molécula em um estado vibracional fundamental e o fóton espalhado a deixa em um estado vibracional excitado  $E_n$ . Quando não retorna a seu estado fundamental  $E_0$ , ela atinge um estado vibracional de energia  $E_1$  em direção aleatória: a diferença de energia entre o fóton incidente e o espalhado corresponde, portanto, a energia necessária para excitar esse nível vibracional.

Para o caso de  $E < E'$ , o efeito é conhecido como espalhamento Raman Anti-Stokes (Fig. 12c), onde a molécula se encontra num estado vibracional  $E_1$ . Ao incidir o fóton de energia  $E$  sobre esta molécula, ela atinge um estado excitado  $E_n$  e, ao retornar a seu estado fundamental,  $E_0$ , re-emite um fóton, absorvendo este fóton para a energia que a molécula possuía (SILVEIRA, 2009).

A espectroscopia Raman é uma técnica usualmente empregada na caracterização de nanotubos de carbono fornecendo informações vibracionais e cristalográficas, mas, principalmente, elementos relacionados às propriedades físicas do material (DRESSELHAUS et al., 2004).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento experimental do presente trabalho foi estruturado para obter o entendimento dos fenômenos físicos e mecânicos ocorridos em uma argamassa de revestimentos aditivada com nanotubos, aplicada em um substrato cerâmico e outro de concreto. Em especial, buscou-se observar estes fenômenos comparando dois tipos de argamassa: uma industrializada, existente no mercado, e outra composta laboratorialmente com cimento Portland, areia, aditivo plastificante, nanotubos de paredes múltiplas e água.

A metodologia proposta para o desenvolvimento desse trabalho está esquematicamente apresentada no fluxograma da Fig. 13.

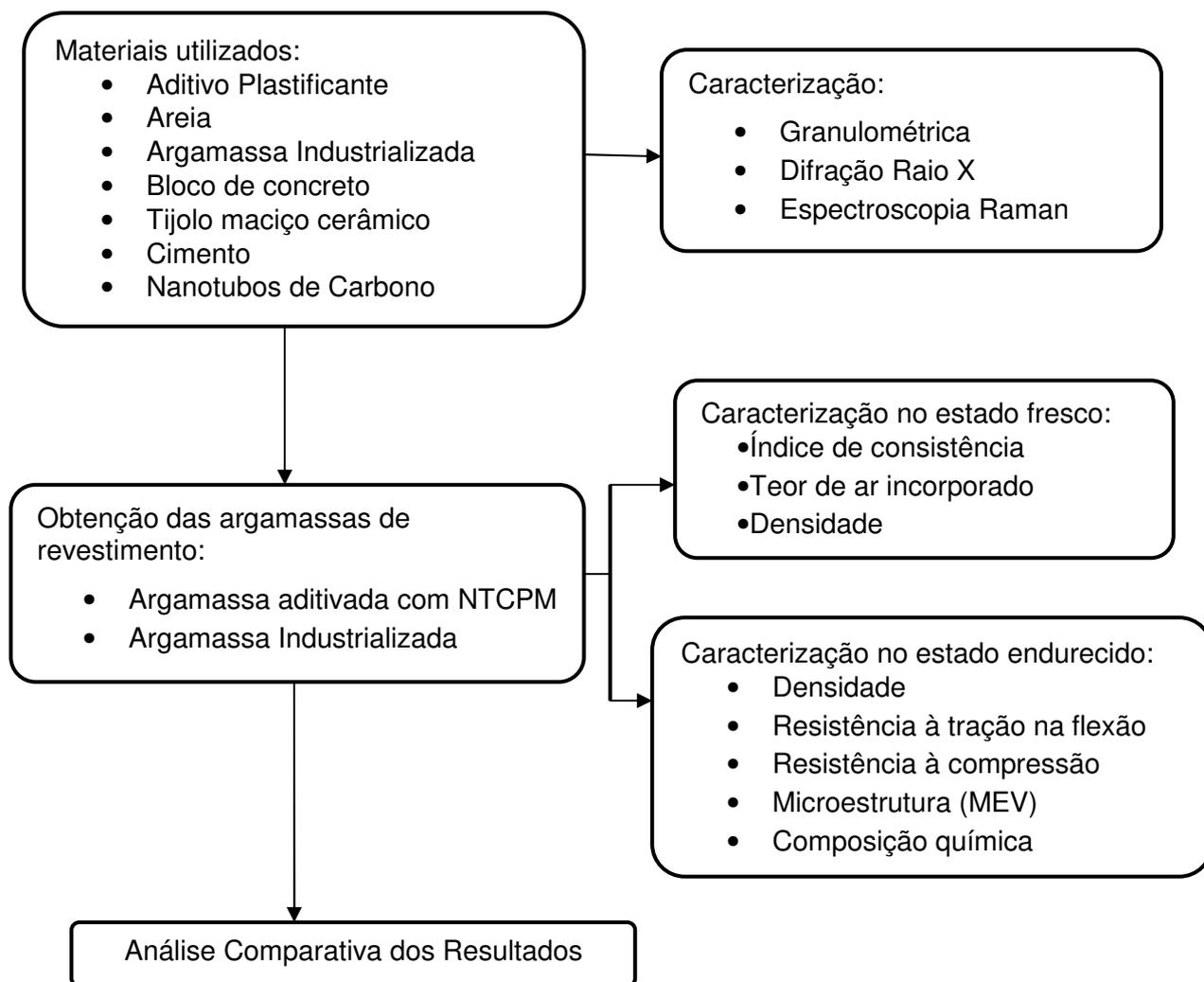


Figura 13 - Fluxograma com as etapas de desenvolvimento do trabalho.

Para o desenvolvimento das etapas previstas na metodologia do trabalho foram executadas as seguintes atividades:

#### 4.1 Obtenção e Caracterização dos materiais utilizados

Para a execução da parte experimental desta pesquisa foram obtidos comercialmente: cimento Portland de Alta Resistência Inicial, areia, aditivo plastificante, NTCPM, argamassa industrializada, tijolos cerâmicos e blocos de concreto.

##### 4.1.1 Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CPV- ARI)

O cimento Portland CPV - ARI utilizado da marca Cimpor foi adquirido comercialmente na cidade de Pelotas-RS, e suas características químicas, físicas e mecânicas, fornecidas pelo fabricante, estão descritas nas Tab. 5 e Tab. 6.

Tabela 5 - Composição química do cimento Portland CPV- ARI

Constituintes	% em massa
Dióxido de Silício (SiO <sub>2</sub> )	19,34
Oxido de Alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	04,55
Oxido de Ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	02,77
Oxido de Cálcio (CaO)	62,43
Oxido de Magnésio (MgO)	02,61
Trióxido de Enxofre (SO <sub>3</sub> )	02,89
Oxido de Sódio (Na <sub>2</sub> O)	00,09
Oxido de Potássio (K <sub>2</sub> O)	00,74
Perda ao Fogo	03,17

Tabela 6 - Propriedades físicas e mecânicas do cimento Portland CPV – ARI.

Propriedades do Cimento CP-V ARI	
Resistência à compressão (MPa) - 3 dias	32,90
Resistência à compressão (MPa) - 7 dias	39,90
Resistência à compressão (MPa) - 28 dias	50,90
Finura # 0,075 (mm)	0,13
Perda ao fogo (%)	2,09
Superfície específica Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	4490
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,11
Início de pega (min.)	125

#### 4.1.2 Areia

A areia utilizada no desenvolvimento do trabalho é de origem quartzosa, proveniente do Areal Timm, localizado na cidade de Pelotas/RS. Esta foi caracterizada quanto à granulometria, módulo de finura, massa unitária e massa específica.

A análise granulométrica da areia foi realizada conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003) e os resultados encontram-se na Tab. 7.

Tabela 7 - Distribuição granulométrica da areia.

Peneiras (mm)% Retido	4,8	2,4	1,2	0,60	0,30	0,15	Fundo
Acumulado	2,23	12,00	30,20	49,16	82,04	95,50	100

As demais características da areia, determinadas segundo normas específicas, estão apresentadas na Tab. 8.

Tabela 8 - Propriedades físicas da areia

Características	Método do Ensaio	Resultados
Módulo de Finura	NBR NM 248:2003	2,71
Massa Unitária (Kg/dm <sup>3</sup> )	NBR NM 45:2006	1,40
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	NBR NM 52:2003	2,63

A partir da distribuição granulométrica da areia fez-se uma nova composição para ser utilizada na produção da argamassa de revestimento aditivada com NTCPM. Nesta utilizou-se a areia passante na peneira de 1,2 mm, para caracterizar uma granulometria similar a utilizada nas argamassas industrializadas.

#### 4.1.3 Aditivo plastificante

O aditivo utilizado no processo de confecção das argamassas foi o plastificante Alvenarit da marca Otto Baumgart, usualmente empregado em argamassas de revestimento.

Segundo dados do fabricante, o Alvenarit é um composto de resinas naturais, tem aparência escura, é isento de cloretos e possui densidade igual a 1,01 g/cm<sup>3</sup>.

#### 4.1.4 Nanotubos de Carbono de Paredes Múltiplas

Os NTCPM utilizados foram adquiridos comercialmente através da empresa Sigma Aldrich Brasil Ltda, com sede em São Paulo/SP. Os NTCPM adquiridos apresentam as características descritas na Tab. 9.

Tabela 9 – Características dos NTCPM.

Densidade	Diâmetro	Comprimento	Forma	Pureza
~2,1 g/ml	5,5 - 6,6 nm	5 µm	pó	> 95%

Fonte: Fabricante.

Para a utilização dos NTCPM na obtenção da argamassa de revestimento fez-se a sua funcionalização para torná-los mais dispersos em água e melhorar a sua dispersão na massa.

Com base nos referenciais bibliográficos fez-se a funcionalização dos nanotubos com solução dos ácidos sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) e nítrico ( $HNO_3$ ), na fração em volume de 3:1, respectivamente, e posteriormente, fez-se a sua neutralização com hidróxido de amônio ( $NH_3$ ). O processo de funcionalização dos NTCPM foi executado da seguinte forma:

- ✓ Utilizando-se de um béquer de 250 ml, pesou-se uma amostra de massa de 1g de nanotubos de NTCPM em uma balança digital da marca AAKER, que, posteriormente, foi colocada em um béquer de 500 ml devidamente limpo e seco;

- ✓ Com a ajuda de uma proveta de 100 ml, colocou-se 10 ml de ácido nítrico (teor entre 65 a 70% / 1.000 ml) e 30 ml de ácido sulfúrico (teor entre 95 a 98% / 1.000 ml) no béquer com os NTCPM.

- ✓ O béquer de 500 ml, foi colocado para agitar em um ultrassom de banho (Fig. 14a), em quatro seções de 30 minutos cada, totalizando duas horas para a dispersão e penetração dos ácidos nos NTCPM. Após a agitação, a mistura permaneceu em repouso por 24 horas.

- ✓ Passadas às 24h, neutralizou-se a mistura com hidróxido de amônio (teor a 97% / 1.000 ml) e mediu-se o pH com auxílio de fitas indicadoras.

- ✓ Passadas 24h filtrou-se a mistura utilizando-se um filtro de membrana de acetato de celulose com 0,2  $\mu m$  de porosidade e 47 mm de diâmetro e se fez varias lavagens com água destilada deionizada até atingir um pH entre 7 e 8 (Fig. 14b).

- ✓ Por fim, no material neutralizado utilizou-se o ultrassom de ponta (Fig. 14c), em seções de 10 minutos cada, para finalizar o procedimento da funcionalização.

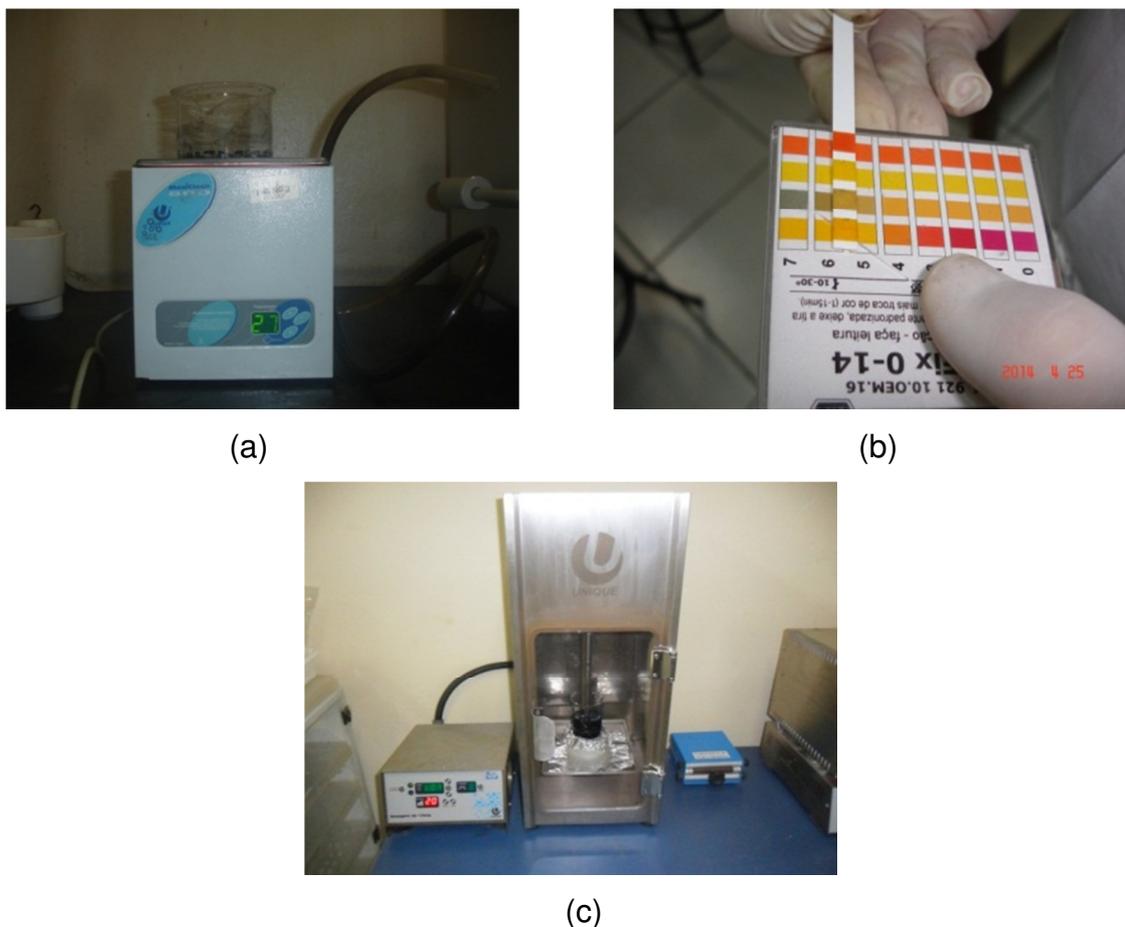


Figura 14 - Processo de funcionalização; (a) ultrassom de banho, (b) medição do pH (c) ultrassom de ponta.

A confirmação do grau de pureza dos NTCPM foi determinada por espectroscopia Raman. Os ensaios de caracterização foram realizados no Laboratório de Materiais Cerâmicos do Curso de Engenharia de Materiais da UFRGS.

#### 4.1.5 Argamassa Industrializada

A argamassa industrializada utilizada foi a argamassa industrializada denominada de Votomassa Assentamento e Revestimento, da marca Votorantim Cimentos. Segundo dados do fabricante, esta é composta de cimento Portland, areia calcária fina, areia média fina, retentor de água e incorporador de ar. A tab. 10

apresenta as características físicas e mecânicas da argamassa industrializada, também fornecidas pelo fabricante.

Tabela 10- Características físicas e mecânicas da argamassa industrializada

Ensaio	Método	Resultado
Resistência à compressão (MPa)	NBR 13279:2005	5,5 a 9,0
Densidade da massa aparente (Kg/m <sup>3</sup> )	NBR 13280:2005	1400 a 1800
Resistência à tração na flexão (MPa)	NBR 13279:2005	1,5 a 2,7
Densidade da massa no estado fresco (Kg/m <sup>3</sup> )	NBR 13278:2005	1600 a 2000
Retenção de água (%)	NBR 13277:2005	72 a 85

#### 4.1.6 Água

A água utilizada na produção das argamassas foi da rede pública, fornecida pela empresa municipal denominada de Serviço Autônomo de Saneamento de Pelotas – SANEP.

#### 4.1.7 Tijolos maciços cerâmicos

Os tijolos maciços cerâmicos foram utilizados como substrato para a aplicação das argamassas de revestimento. Estes foram adquiridos junto à olaria Alvorada, localizada na cidade de Pelotas/RS, nas dimensões de 6 cm x 12 cm x 24 cm (espessura, largura e comprimento, respectivamente). Segundo o fornecedor, a temperatura de obtenção dos tijolos foi de cerca de 850° C.

#### 4.1.8 Blocos de concreto

Os blocos de concreto utilizados como substrato para a aplicação das argamassas de revestimento foram adquiridos na empresa Artefatos de Concreto Pedro Osório, localizada na cidade de Pedro Osório/RS, nas dimensões de 14 cm x 19 cm x 39 cm de comprimento (espessura, largura e comprimento, respectivamente).

## 4.2 Obtenção das argamassas de revestimento

Nesta etapa do projeto surgiram questionamentos quanto as quantidades a serem utilizadas na formulação da argamassa aditivada com NTCPM. Como solução, definiu-se pelo emprego da formulação de argamassa indicada por Candia e Franco (1998) e até hoje usada, na proporção de 1 cimento : 1 cal : 6 areia (em volume). Segundo os autores, esse traço resulta em bons resultados nas propriedades de retenção de água, tempo de sarrafeamento, resistência de aderência à tração e cisalhamento, resistência à compressão e módulo de deformação.

A composição da argamassa a ser testada foi, então, proposta com cimento CPV-ARI, areia, aditivo plastificante, NTCPM e água. A quantidade de aditivo plastificante utilizada seguiu as especificações do fabricante e a quantidade de NTCPM foi definida a partir de referências bibliográficas como sendo igual a 0,3% em massa de cimento.

As proporções em volume foram convertidas em massa com as quantidades de material seco fixas, tendo como referência o índice de consistência aproximado de  $250 \pm 10$  mm, atendendo dessa forma a recomendação da norma NBR 13276 (ABNT, 2005), para dosagem da proporção de água/materiais secos. Em função disto, utilizou-se o fator água/cimento igual a 1,3 para a confecção das argamassas. A Tab.11 apresenta as quantidades dos materiais utilizados na formulação proposta para a argamassa de revestimento com NTCPM, que foi identificada como ANTCPM.

Tabela 11 - Composição da argamassa ANTCPM.

Material	Quantitativo	Unidade
Cimento	335	g
Areia média	2.445,50	g
0,30 % NTCPM	1,0 (funcionalizado)	g
Aditivo	1,35	ml
Água	435,5	ml

Os materiais utilizados na composição da argamassa foram pesados em balança de precisão de 0,1 g, disponível no Laboratório de Ciência e Engenharia de Materiais do Curso de Engenharia de Materiais da UFPel.

Para a produção da argamassa utilizou-se uma argamassadeira (Fig. 15), com capacidade de 2.500 g de material anidro, e procedeu-se conforme a NBR 13278 (ABNT 2005). O fator água/cimento para a argamassa com NTCPM foi de 1,3.

Para a confecção das argamassas os NTCPM foram secos em estufa a 110° C e pesados para a determinação efetiva da quantidade utilizada. Desta forma, buscou-se corrigir as possíveis perdas de NTCPM ocorridas durante o procedimento de filtragem a vácuo. Os NTCPM foram inseridos dentro de um becker de 500 ml e, posteriormente, acrescentou-se a quantidade de água prevista para a mistura. O cimento foi o último material a ser adicionado. Os materiais foram misturados até atingir a consistência de pasta. Por fim, a pasta foi misturada a areia na argamassadeira.



Figura 15 - Argamassadeira utilizada na produção das argamassas de revestimento.

A argamassa industrializada, identificada com (AI) foi utilizada conforme especificação do fabricante e as quantidades usadas estão descritas na Tab. 12.

Tabela 12 - Composição de argamassa industrializada (AI).

Material	Água	Fator água/massa
2.500,00 g	362 ml	0,144

### 4.3 Caracterização das argamassas de revestimento ANTCPM e AI

A metodologia de caracterização das argamassas de revestimento com NTCPM e industrial foi a mesma e os ensaios foram realizados no Laboratório do Núcleo de Estudos de Materiais Compósitos Avançados do curso de Engenharia Civil e no Laboratório de Anatomia e Microscopia da Madeira do curso de Engenharia Industrial Madeireira, ambos da UFPEL.

Nos corpos de prova das argamassas no **estado fresco** determinou-se:

- 1) Densidade da massa, que é a razão entre a massa do material sólido pelo seu volume, incluindo os vazios impermeáveis. O ensaio de densidade foi executado conforme NBR 13278 (ABNT, 2005).
- 2) Teor de ar incorporado, que representa a quantidade de ar existente em um determinado volume de argamassa. Este ensaio foi realizado através da NBR 13278 (ABNT, 2005). Foram realizadas três determinações por traço.
- 3) Índice de Consistência, que define o espalhamento da argamassa em uma mesa de consistência (Fig. 16). Este ensaio foi realizado através da NBR 13276 (ABNT, 2005), foram realizadas três medições por traço.



(a)



(b)

Figura 16 - Ensaio de Consistência (a) em repouso; (b) posterior aos golpes.

Nos corpos de prova das argamassas no **estado endurecido** determinou-se:

1) Densidade aparente, que representa a razão entre a massa e o volume total de argamassa após a cura. Este ensaio foi realizado de acordo com a NBR 13280 (ABNT, 2005), em corpos de prova prismáticos com dimensões de 40 mm x 40 mm x 160 mm (altura, largura e comprimento, respectivamente) e os 28 dias de cura. Foram utilizados 3 corpos de prova para a argamassa ANTCPM e 3 corpos de prova para a argamassa AI.

2) Absorção de água por imersão de um corpo de prova ao longo do tempo, em função da variação da massa até a sua estabilização. Este ensaio foi realizado de acordo com a NBR 9778 (ABNT, 2009), em 4 corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura, aos 28 dias de cura. Para este ensaio foram utilizados 04 corpos de prova para a argamassa com adição de NTCPM e 04 quatro corpos de prova para a argamassa industrializada.

3) Resistência à tração na flexão. Os ensaios foram realizados de acordo com a NBR 13279 (ABNT, 2005) em corpos de prova de seção prismática de 40 mm x 40 mm x 160 mm (altura, largura e comprimento, respectivamente), aos 28 dias de cura, em uma prensa EMIC DL30000 (Fig. 17), com velocidade de 50 N/s. Para este ensaio foram utilizados 5 corpos de prova para a argamassa com NTCPM e 5 corpos de prova para a argamassa industrializada.



Figura 17 - Equipamento utilizado para o ensaio de resistência à tração na flexão.

4) Resistência à compressão. Os ensaios foram realizados de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 1997), em corpos cilíndricos de seção de 50 mm x100 mm, aos 28 dias de cura, uma prensa EMIC DL10000 (Fig. 18), com velocidade de carregamento de 50 N/s. Para este ensaio foram utilizados 5 corpos de prova de cada uma das argamassas propostas neste trabalho. Os ensaios de caracterização física e mecânica foram realizados no Laboratório do Núcleo de Estudos de Material Compósito Avançados do curso da Engenharia Civil e no Laboratório de Propriedades Físicas do curso de Engenharia Industrial Madeireira, ambos da UFPEL.

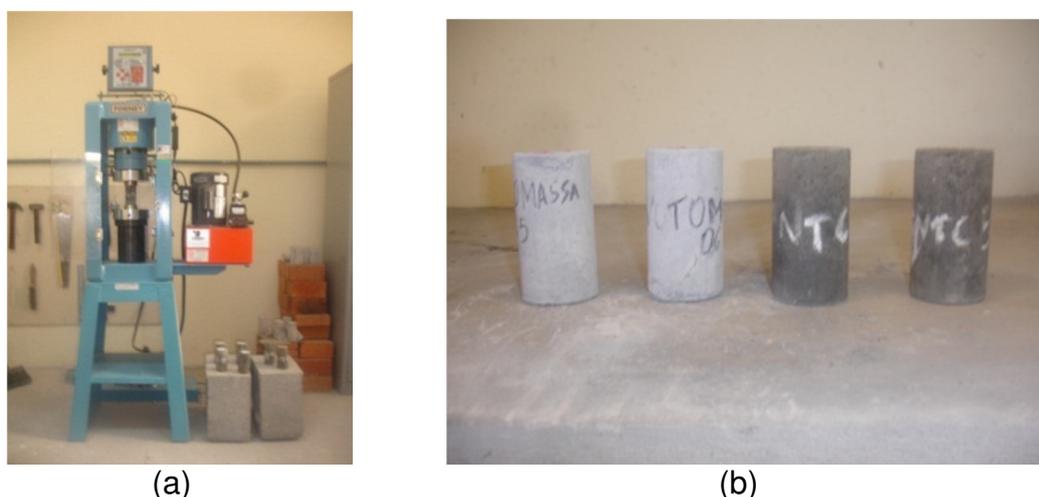


Figura 18 - Ensaio de resistência à compressão; (a) Prensa utilizada, (b) Corpos de prova de AI e ANTCPM.

5) Análise microestrutural e de composição química. As análises foram feitas em amostras extraídas dos substratos, após 28 dias de cura da argamassa. As amostras analisadas tiveram origem em pedaços (fragmentos) obtidos em corpos de prova (dimensões de 1,0 cm e 2,0 cm, espessura e diâmetro, respectivamente), extraídos com auxílio de uma serra circular manual (Fig. 19). Estas foram secas em estufa a 110° C, por 24 horas, e posteriormente metalizadas com ouro. Após metalizadas foram mantidas secas em um béquer com sílica gel. A análise da microestrutura foi feita em um microscópio eletrônico de varredura da marca Jeol, modelo JSM - 6610 LV, existente no Centro de Microscopia da FURG.



Figura 19 - Processo de extração das amostras dos substratos (ANTCPM e AI).

Na análise da microestrutura identificou-se a presença dos NTCPM e a composição química pontual por energia dispersiva (EDS) dos constituintes das argamassas utilizadas (chapisco, ANTCPM e AI) e, também, das interfaces substrato-chapisco e chapisco-argamassa de revestimento. A identificação das interfaces substrato-chapisco e chapisco-argamassa de revestimento foi a olho nú, sem uso de equipamentos.

#### 4.4 Aplicação das argamassas de revestimento ANTCPM e AI

As argamassas de revestimento foram aplicadas sobre dois diferentes tipos de paredes, uma confeccionada com tijolos maciços cerâmicos (Fig. 20a) e outro confeccionado com blocos de concreto (Fig. 20b).



(a)



(b)

Figura 20 - Paredes usadas para a aplicação das argamassas de revestimento NTCPM e AI; (a) cerâmico; (b) concreto.

Para a correta execução do revestimento, as paredes foram colocadas em gabaritos de madeira, onde a espessura da camada de revestimento foi fixada em um centímetro. A aplicação do revestimento nas superfícies seguiu o usualmente feito na construção civil, que define o leve umedecimento das superfícies, a aplicação de chapisco e, posteriormente, a execução da camada de argamassa de revestimento desempenada, conforme Fig. 21.



Figura 21 - Aplicação da argamassa de revestimento no substrato (a) execução; (b) revestimento pronto.

A argamassa de chapisco utilizada neste trabalho foi composta de cimento e areia média seca, desprezando, portanto o coeficiente de inchamento do agregado miúdo, traço 1:3, em volume, de acordo com as orientações das normas NBR 13755 (ABNT, 1997), NBR 7200 (ABNT, 1998), o qual foi convertido em massa para melhor aferição do traço (Tab. 13). O fator água/cimento utilizado para a argamassa de chapisco foi de 2,2.

Tabela 13 - Composição da argamassa do chapisco.

Areia Média	Cimento	Água
887,0 g	242,6 g	533,72 ml

A cura das argamassas ocorreu ao ar livre conforme as condições de trabalho dos revestimentos aplicados na construção civil.

#### 4.5 Análise dos Resultados

A análise dos resultados comparou o desempenho das duas argamassas testadas, no tocante as propriedades físicas e mecânicas. Os resultados de microscopia foram utilizados para verificar a efetiva formação de interfaces.

#### 4.6 Limitações da pesquisa

Os fatores listados abaixo devem ser considerados na análise dos resultados da pesquisa.

- ✓ Na realização deste trabalho não foram utilizadas as formas metálicas previstas na norma NBR 13279 (ABNT, 2005) para a confecção dos corpos de prova de seção prismática de 40 mm x 40 mm x 160 mm (altura, largura e comprimento, respectivamente).

- ✓ Os testes de consistência das argamassas foram prejudicados pela necessidade de deslocamento, transporte e tempo de armazenamento do material até a realização do ensaio.

- ✓ O processo de dispersão dos NTCPM foi realizado em três laboratórios diferentes, fato que pode ter prejudicado o material, em função de transportes durante o seu tempo de repouso.

- ✓ A presença da camada de ancoragem obtida com argamassa de chapisco acabou por criar dificuldades e não permitiu a efetiva análise das interfaces das argamassas com os respectivos substratos. Pois a ancoragem aconteceu entre o revestimento de chapisco e as argamassas propostas.

- ✓ A determinação das propriedades físicas e químicas das argamassas testadas não ocorreu em corpos de prova expostos a intempérie.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Caracterização do cimento Portland CP V- ARI.

O cimento Portland CPV-ARI, foi caracterizado por difração de raios X, no Laboratório de Ciência e Engenharia de Materiais do Curso de Engenharia de Materiais da UFPel, em um equipamento da marca Shimadzu, modelo XRD 6000, operando com as seguintes condições: radiação Cu  $K\alpha$ ,  $\lambda=1,54184 \text{ \AA}$ , tensão = 30 kV e corrente = 30 mA.

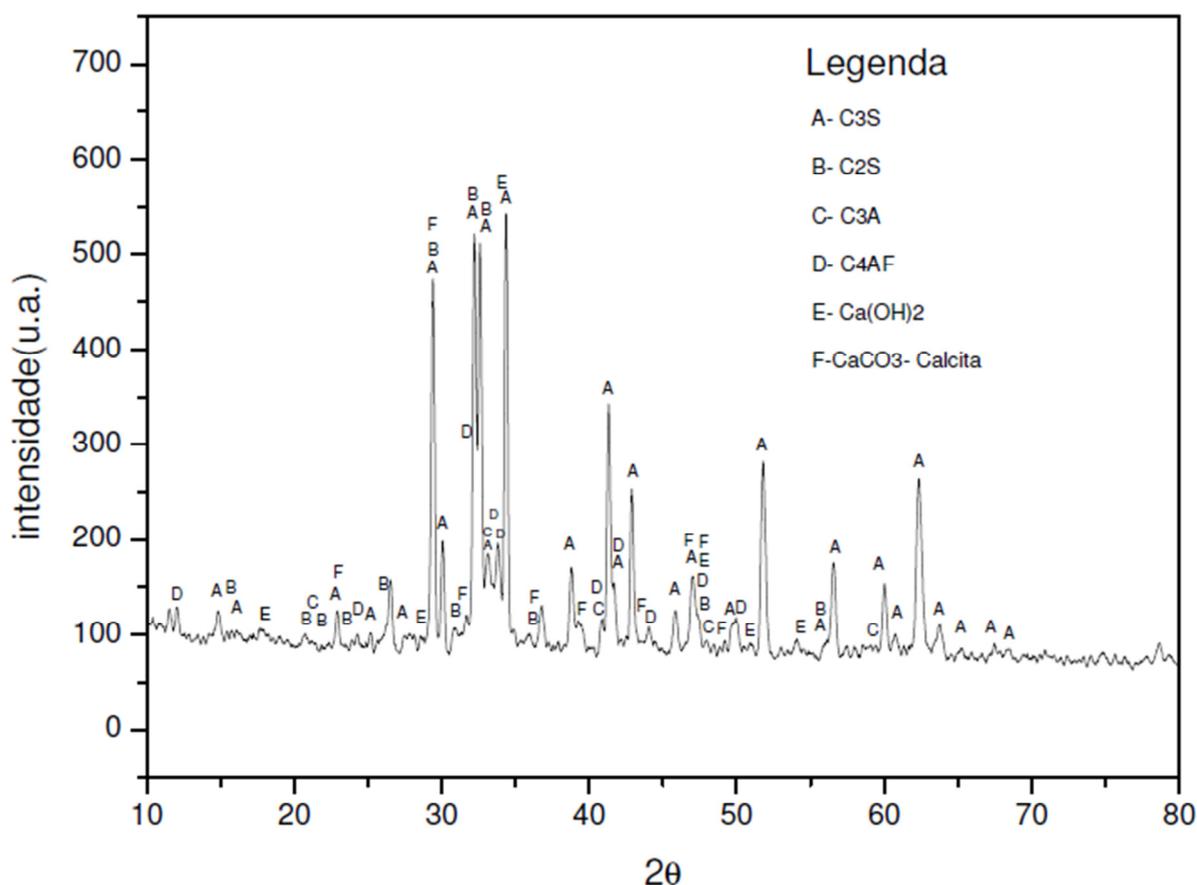


Figura 22 – Difratograma do Cimento Portland CPV – ARI

A Fig.22 apresenta o difratograma obtido e a Tab. 14 os compostos identificados a partir de fichas cristalográficas do centro internacional de arquivos de difração (JCPDS).

Tabela 14 - Compostos identificados no cimento Portland CP V- ARI.

Ficha	Nome do composto	Fórmula química	Símbolo
24-0034	Silicato dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C2S
44-1481	Hidróxido de cálcio	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	-
05-0586	Carbonato de cálcio	$\text{CaCO}_3$	-
20-0237	Silicato de cálcio	$\text{Ca}_2\text{SiO}_4$	-
30-0226	Ferro aluminato tetracálcico	$2\text{CaO} \cdot (\text{Al Fe})\text{O}_3$	C4AF
38-1429	Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C3A
49-0442	Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C3S
72-1937	Carbonato de cálcio	$\text{CaCO}_3$	-
81-2027	Carbonato de cálcio	$\text{CaCO}_3$	-

Fonte: JCPDS, 1986.

A partir do difratograma do cimento portland pode-se observar um padrão típico para este material, com identificação das fases cristalinas de seus principais componentes: alita (C3S), belita (C2S), Aluminato Tricálcico (C3A) e Ferroaluminato Tetracálcico (C4AF).

## 5.2 Caracterização da argamassa industrializada.

Assim como para o cimento Portland utilizado, a argamassa industrializada também foi caracterizada por difração de raios X no Laboratório de Ciência e Engenharia de Materiais do Curso de Engenharia de Materiais da UFPEL, em um equipamento da marca Shimadzu, modelo XRD 6000, operando com as seguintes condições: radiação  $\text{Cu K}\alpha$ ,  $\lambda=1,54184 \text{ \AA}$ , tensão = 30 kV e corrente = 30 mA. A Fig.23 apresenta o difratograma obtido e a Tab. 15 os compostos identificados a partir de fichas cristalográficas do centro internacional de arquivos de difração (JCPDS).

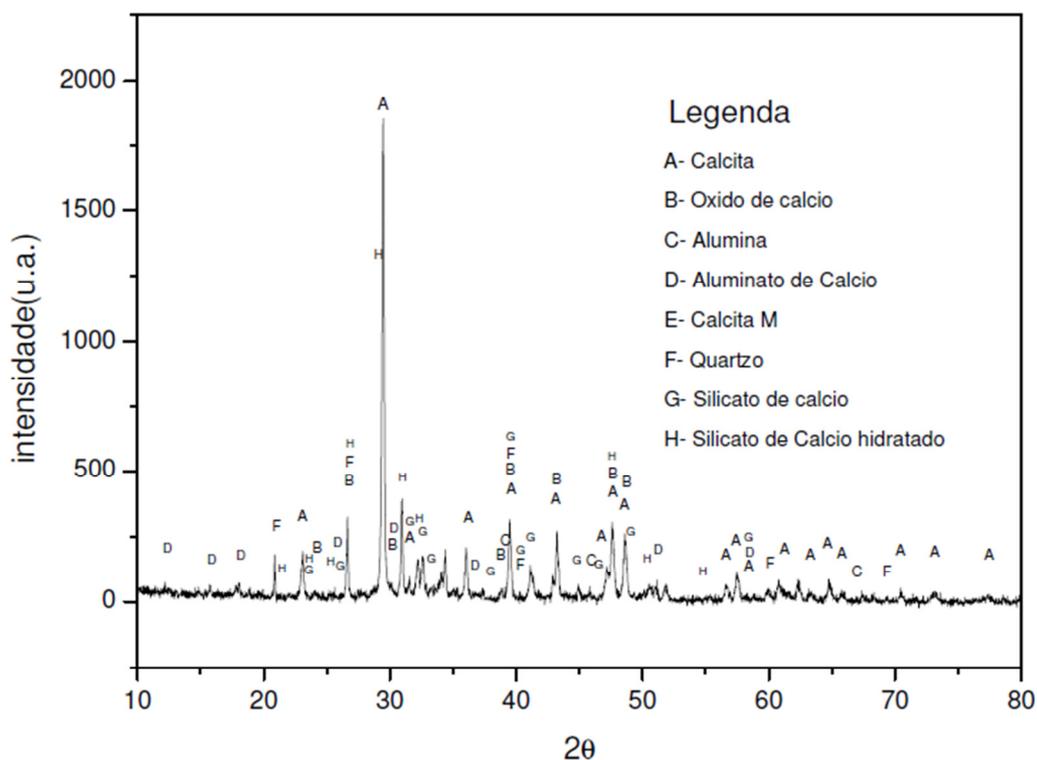


Figura 23 – Difratoograma de raios X da argamassa industrializada utilizada.

Tabela 15 - Compostos identificados na argamassa industrializada

Ficha	Nome do composto	Fórmula química
72-1652	Calcita	$\text{CaCO}_3$
28-0775	Oxido de cálcio	$\text{CaO}$
37-1462	Alumina	$\text{Al}_2\text{O}_3$
11-0357	Aluminato de cálcio	$\text{Ca}(\text{Al}_2\text{O}_2)_2$
89-1354	Calcita M	$\text{CaCO}_3$
85-0865	Quartzo	$\text{SiO}_2$
15-0641	Silicato de cálcio hidratado	$\text{CSH}$
20-0237	Silicato de cálcio	$\text{Ca Si O}_3$

No difratograma de raios X da argamassa industrializada pode-se observar um padrão típico para este material, com identificação das fases cristalinas de seus principais componentes como a calcita, oxido de cálcio, alumina, aluminato de cálcio e quartzo.

### 5.3 Caracterização dos nanotubos de carbono de parede múltiplas.

De acordo com Belin et al., (2005), podem-se resumir as características dos nanotubos de carbono, segundo seu espectro Raman, da seguinte forma:

- ✓ Uma banda inferior a  $200\text{ cm}^{-1}$  referente aos modos radiais de respiração (RBM) característicos de NTC, sendo sua frequência em função de seus diâmetros;
- ✓ Uma banda característica do grau de desordem, ou seja, relacionada a defeitos como bifurcações, aberturas, curvaturas, formações helicoidais e carbono amorfo, denominada *D*, caracterizada por um pico com máximo em torno de  $1340\text{ cm}^{-1}$ ;
- ✓ Uma banda de alta frequência, entre  $1500$  e  $1600\text{ cm}^{-1}$ , chamada banda *G*, que esta relacionada as ligações  $sp^2$  dos nanotubos de carbono não defeituosos;
- ✓ Modos de segunda ordem entre  $2450$  e  $2650\text{ cm}^{-1}$ , geralmente, denominado modo *G'*;
- ✓ Combinação entre as bandas *D'* e *G'* entre  $2775$  e  $2950\text{ cm}^{-1}$ .

A relação entre as intensidades das bandas *D* e *G* ( $I_D/I_G$ ) é modificada quando os nanotubos de carbono são tratados com agentes químicos que promovem a sua oxidação. Isso se deve ao aumento do grau de desordem dos NTCs devido a estes tratamentos que promovem a quebra, o rompimento das paredes e extremidades (refletido no aumento da intensidade da banda *D* e redução da intensidade da banda *G*).

Em suas pesquisas, Stobinski et al., (2010) mostraram que nanotubos de carbono funcionalizados com ácido nítrico apresentaram uma redução na intensidade da banda *G* quando comparada a banda *D*. Estas alterações nas bandas podem ser atribuídas ao aumento do número de átomos de carbono com hibridização  $sp^3$  no material. Mas a redução da intensidade da banda *G* indica alterações na estrutura eletrônica do NTCPM como consequência, por exemplo, da diferente quantidade de grupos funcionais presentes nas paredes e extremidades dos tubos.

A presença da banda *D* nos espectros Raman está associada a possíveis defeitos nas paredes dos tubos ou à presença de carbono amorfo, sendo a intensidade dessa banda proporcional à quantidade desses defeitos. Assim, para uma análise qualitativa comparativa entre diferentes amostras, realiza-se uma

análise baseada na relação entre a intensidade das bandas *D* e *G* ( $I_D/I_G$ ) em que maiores razões indicam nanotubos com mais defeitos (JORIO et al., 2007).

A Tab. 16 e o espectro da Fig. 24 apresentam a análise dos NTCPM não funcionalizados e funcionalizados com os ácidos sulfúrico e nítrico, utilizados na obtenção da argamassa de revestimento.

Tabela 16 - Razão  $I_D/I_G$  média de três amostras de NTCPM funcionalizados e não funcionalizados.

Nanotubos	$I_D/I_G$ média
NTCPM não funcionalizado	1,18
NTCPM funcionalizado (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> _HNO <sub>3</sub> )	1,32

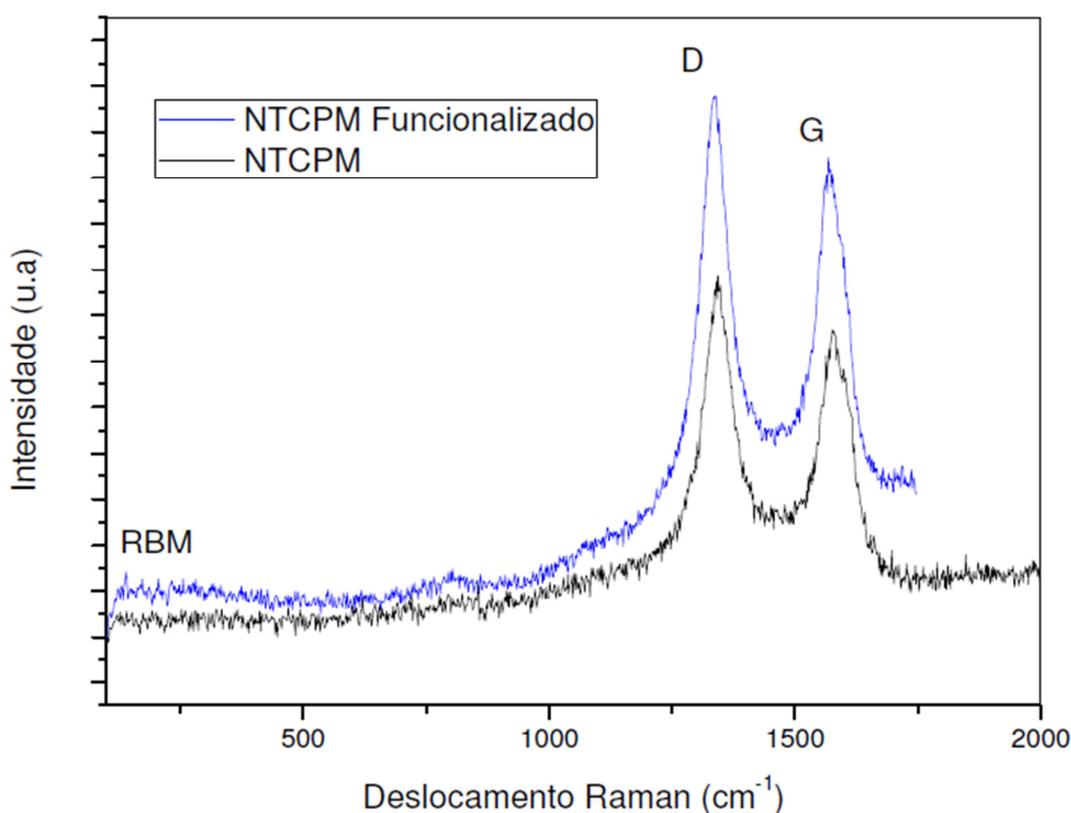


Figura 24 - Espectro Raman de NTCPM funcionalizados com ácidos sulfúrico e nítrico, comparados com NTCPM não funcionalizados.

Como pode-se ver nos resultados da Tab.16 e no espectro da Fig. 24, a funcionalização dos NTCPM conduziu a um aumento dos defeitos, tendo em vista que houve um incremento na razão  $I_D/I_G$ .

## 5.4 Caracterização das argamassas de revestimento ANTCPM e AI

### 5.4.1 Argamassas no Estado Fresco

A Tab. 17 apresenta, comparativamente, os resultados de caracterização das argamassas no estado fresco.

Tabela 17 - Caracterização das argamassas de revestimento no estado fresco

Argamassas	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Teor de ar incorporado (%)	Índice de consistência (mm)	
			Valor	Desvio Padrão
ANTCPM	1,78	7,0	240	2,08
AI	1,68	15,0	225	1,53

Nesta percebe-se que a argamassa de revestimento com NTCPM apresenta-se com densidade 6% maior, índice de consistência 6,6% superior e percentual de ar incorporado 53 % menor que a argamassa industrializada. Os resultados obtidos indicam que a adição de NTCPM na argamassa de cimento CPV ARI, alterou a sua consistência de massa. A melhor condição de consistência da argamassa com NTCPM já havia sido observada durante a sua aplicação nos substratos, quando se mostrou com uma melhor condição de aplicabilidade e espalhamento. O maior valor de ar incorporado na argamassa industrializada se justifica pela presença do aditivo incorporador de ar presente na sua conformação, resultando, portanto, em uma argamassa com densidade menor que a argamassa aditivada com NTCPM, conforme ilustrada na Tab. 17.

### 5.4.2 Argamassas no Estado Endurecido

As Tab. 18, 19, 20, 21 e 22 apresentam resultados de caracterização física e mecânica das argamassas de revestimento testadas.

A Tab. 18 apresenta, comparativamente, os valores de densidade de massa aparente das argamassas de revestimento. Os valores obtidos mostram que o endurecimento da massa não alterou significativamente as densidades do estado

fresco. A justificativa para tal fato está, provavelmente, na controlada e reduzida quantidade de água adicionadas as argamassas.

Tabela 18 - Densidade de massa das argamassas de revestimento testadas

Argamassas	Peso médio (g)	Volume médio (cm <sup>3</sup> )	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
ANTCPM	489,23	282,22	1,73
AI	445,82	276,88	1,61

A Tab. 19 apresenta, comparativamente, os valores de absorção de água das argamassas de revestimento. Nesta observa-se que a absorção de água da argamassa com NTCPM é cerca de 16% maior que a da argamassa industrializada. A justificativa para este resultado está, possivelmente, no fator água/cimento usado, que para a argamassa com NTCPM foi muito superior (1,3) ao da argamassa industrializada (0,14). A maior quantidade de água presente na argamassa com NTCPM resultou na formação de uma maior quantidade de poros.

Tabela 19 - Valores de absorção das argamassas.

Argamassas	Média (%)	Desvio padrão
ANTCPM	15,55	0,22
AI	13,35	0,20

A Tab. 20 apresenta, comparativamente, os valores de resistência à tração na flexão, obtidos nas argamassas de revestimento.

Tabela 20 - Resistência à tração na flexão das argamassas testadas.

Argamassas	Tensão Média (MPa)	Desvio Padrão
ANTCPM	3,78	0,26
AI	3,39	0,39

Os resultados da Tab. 20 mostram que a resistência da argamassa com NTCPM foi 12 % maior que a obtida na argamassa industrializada. Todavia esta diferença é pequena frente a resultados encontrados em outros estudos com NTCPM que atingiram cerca de 25 % de ganhos. Esta redução de ganhos pode estar ligada à diferença entre o comprimento e o diâmetro dos NTCPM utilizados conforme ilustrados na Tab. 21, pois possuem um fator de forma (relação entre diâmetro/comprimento) diferente do proposto pelos outros pesquisadores como Li et al., (2005) e Batiston (2010), Yakovlev et al., (2006). Este resultado vem a reforçar a hipótese de que esse fator é relevante na resistência à tração na flexão, pois quanto maior for o comprimento dos nanotubos maior será a interação entre a matriz de cimento este material, proporcionando uma melhor ancoragem, formando ao longo da massa cimentícia, um fenômeno, cujo comportamento se assemelha a uma microarmadura inserida no compósito, aumentando, portanto a tenacidade na fratura.

Tabela 21 - Fatores de forma de nanotubos de carbono

Parâmetro	*Esta pesquisa	Batiston	Yakovlev et al.	Li et al.
d (nm)	5,5 – 6,6	40 - 70	> 100	10 - 30
L (µm)	5	5 - 15	> 20	0,5 - 500
L/d	758 - 909	71 - 375	> 200	17 - 50.000

\*Fonte: Fabricante, 2014.

A Tab. 22 apresenta, comparativamente, os valores obtidos para a resistência à compressão axial.

Tabela 22 - Resistência à compressão axial das argamassas testadas

Argamassas	Tensão Média (MPa)	Desvio Padrão
ANTCPM	4,84	0,12
AI	4,23	0,11

Nos resultados da Tab. 22 observa-se que a argamassa com NTCPM obteve acréscimo em torno de 15 % no valor de sua resistência à compressão axial em relação à argamassa industrializada. Assim como para a resistência à tração na flexão, o percentual de ganho obtido na argamassa com NTCPM é inferior ao alcançado por outros pesquisados, como por exemplo, Li et al., (2005) que em seus experimentos obteve um acréscimo de até 19% na resistência à compressão. Este resultado possivelmente, também, se justifique pelo fator de forma do NTCPM utilizado.

### 5.5 Análise microestrutural e de composição química

Nas Fig. 25 e 26, é possível visualizar as interfaces argamassa NTCPM-chapisco e chapisco-tijolo cerâmico.

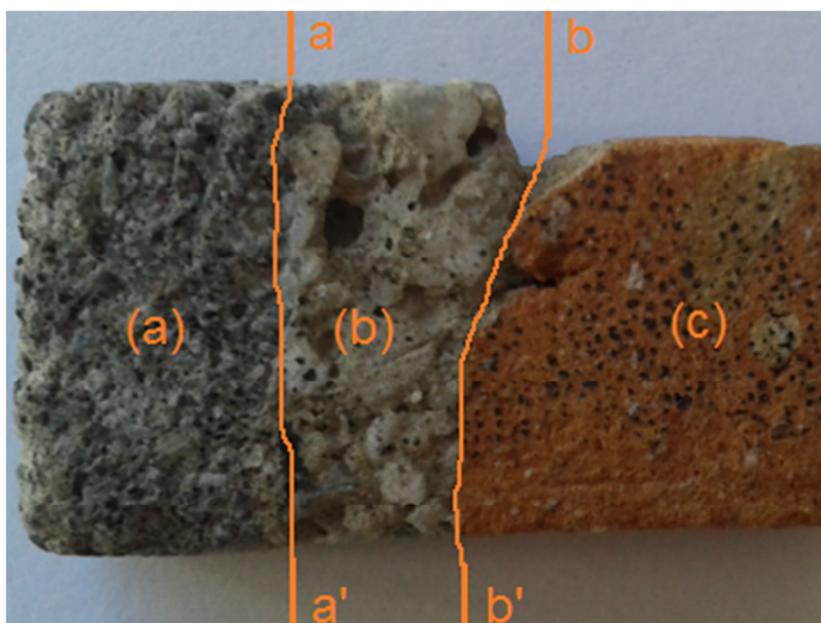


Figura 25 - Interfaces: (a) argamassa NTCPM, (b) chapisco e (c) tijolo cerâmico.

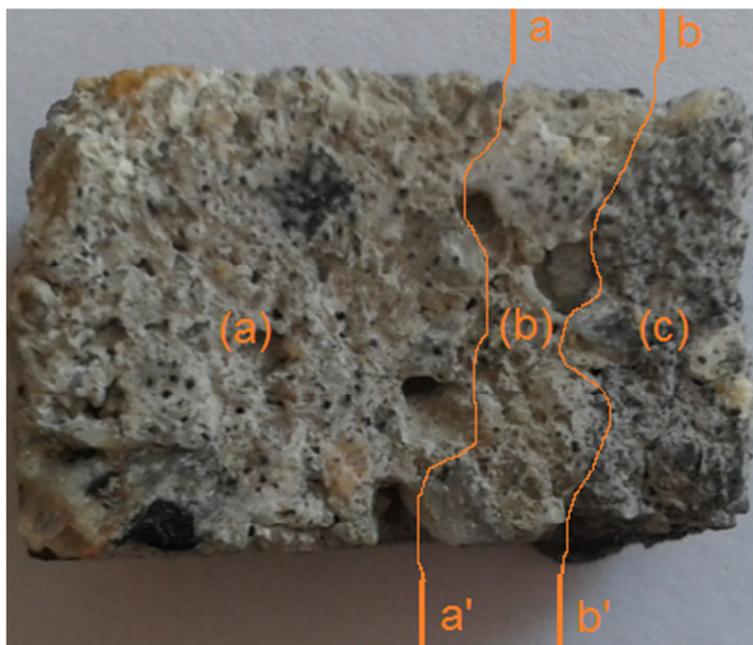


Figura 26 - Interfaces: (a) bloco de concreto, (b) chapisco e (c) argamassa com NTCPM.

Por ser de interesse do estudo a análise de composição química elementar das interfaces ocorreu apenas nas linhas formadas entre as argamassas testadas (ANTCPM e AI) e a argamassa de chapisco. As Fig. 27 e 28 apresentam os resultados obtidos.

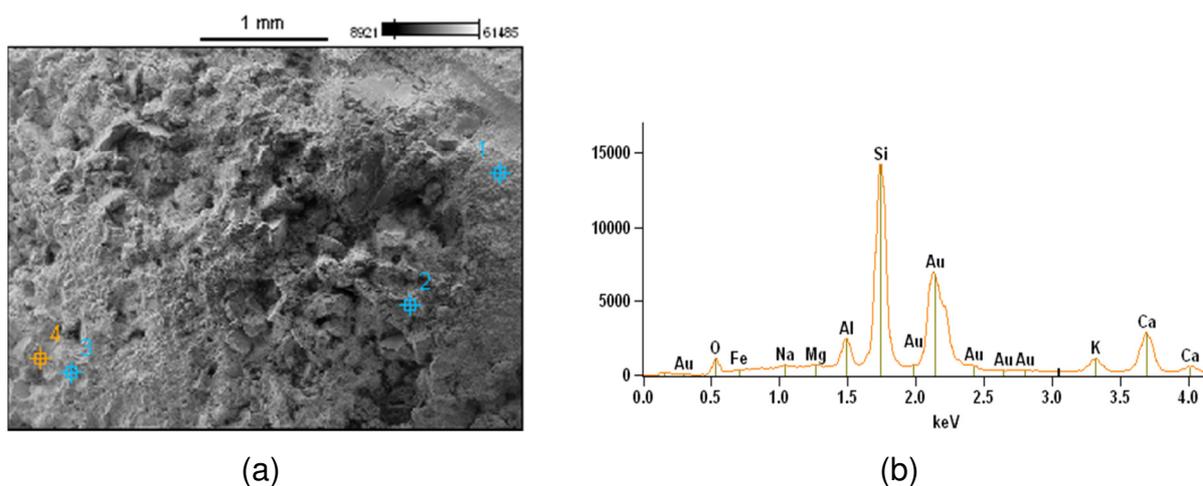


Figura 27 - Interfaces: (a) micrografia; (b) composição química elementar obtida na interface ANTCPM – chapisco, no ponto 2.

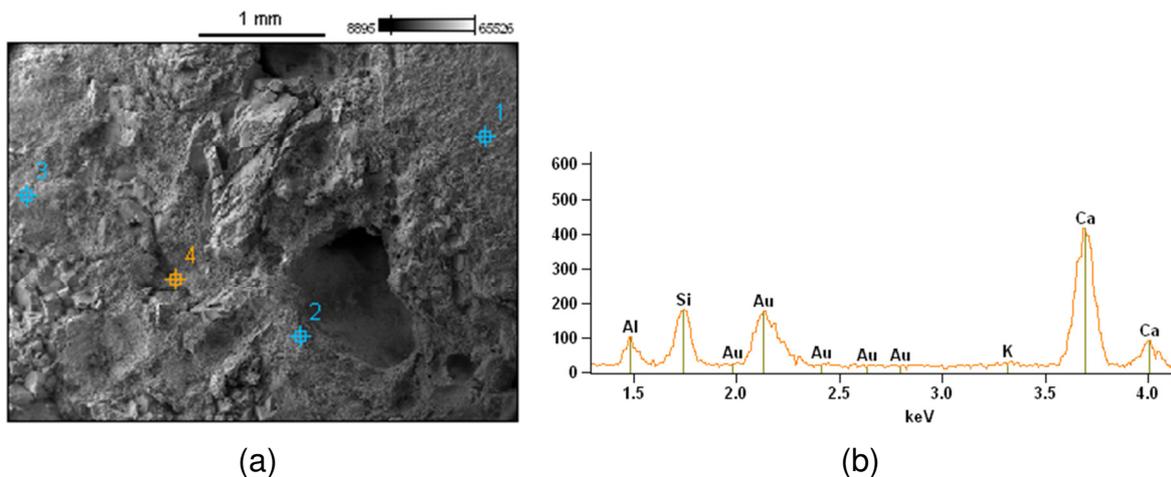


Figura 28 - Interfaces: (a) micrografia; (b) composição química elemental obtida na interface Al – Chapisco, no ponto 4.

Os resultados de análise de composição química das interfaces não possibilitaram aferir nenhuma conclusão efetiva sobre a interação das argamassas constituintes.

As Fig. 29, 30 e 31 apresentam os resultados obtidos na análise de composição química elemental das argamassas utilizadas.

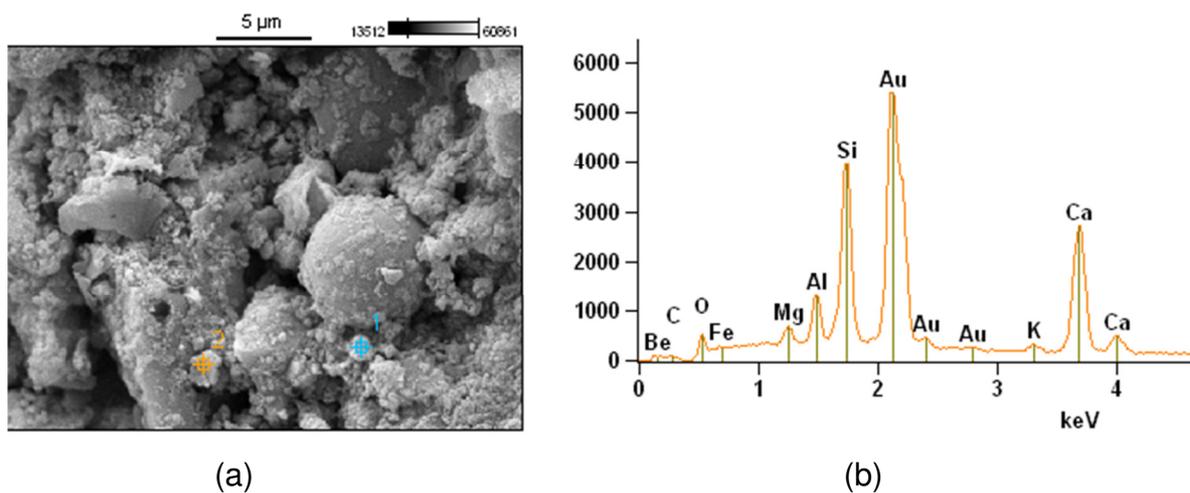


Figura 29 - Argamassa chapisco (a) micrografia; (b) composição química elemental, ponto 2.

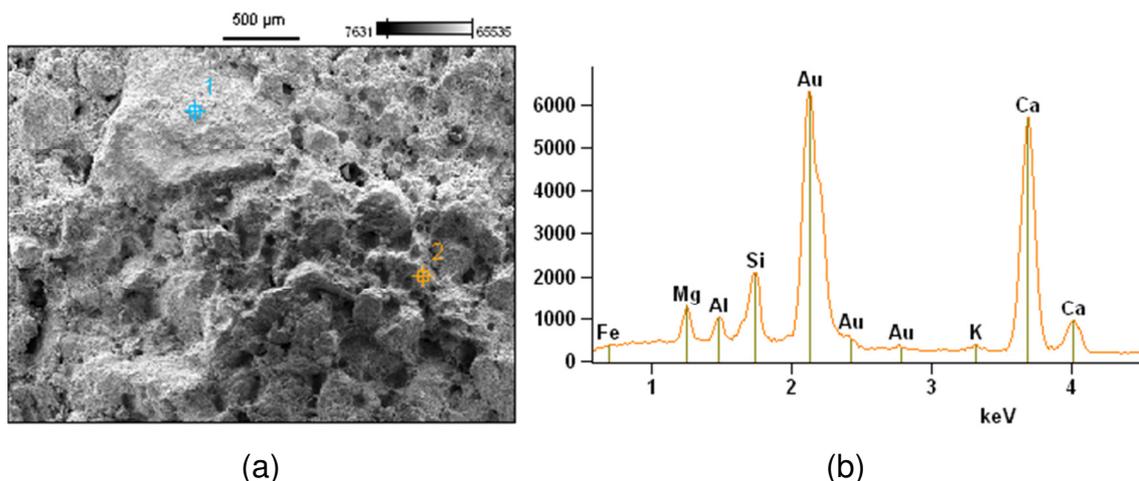


Figura 30 - Argamassa Al: (a) micrografia; (b) composição química elemental, ponto 2.

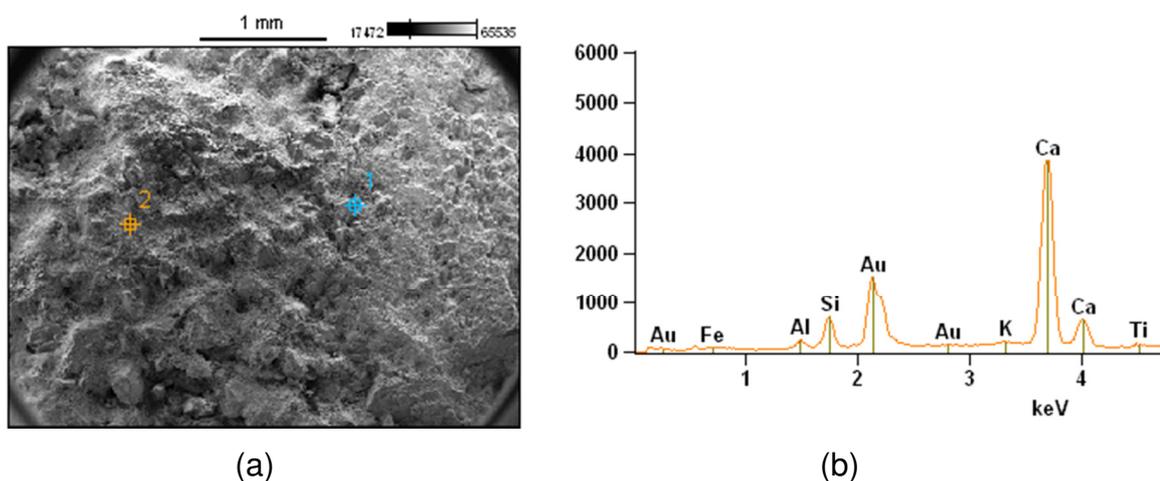


Figura 31- Argamassa ANTCPM: (a) micrografia; (b) composição química elemental, ponto 2.

Como já esperado, nas análises de composição das argamassas utilizadas foram identificados picos mais intensos de Ca, Si, K, Al, Mg e Na, característicos na sua formação. Cabe salientar que os elementos identificados não representam a totalidade dos constituintes dos materiais visto que a análise é pontual. O ouro identificado é resultado do processo de metalização das amostras. Nas argamassas do chapisco o silício apresenta-se com maior concentração e na argamassa com NTCPM e na industrializada o Ca predomina

Complementando a análise da argamassa com NTCPM, as Fig. 32 e 33 apresentam micrografias onde é possível identificar a presença dos nanotubos.

Outras micrografias resultantes da análise microestrutural encontram-se no apêndice 13.

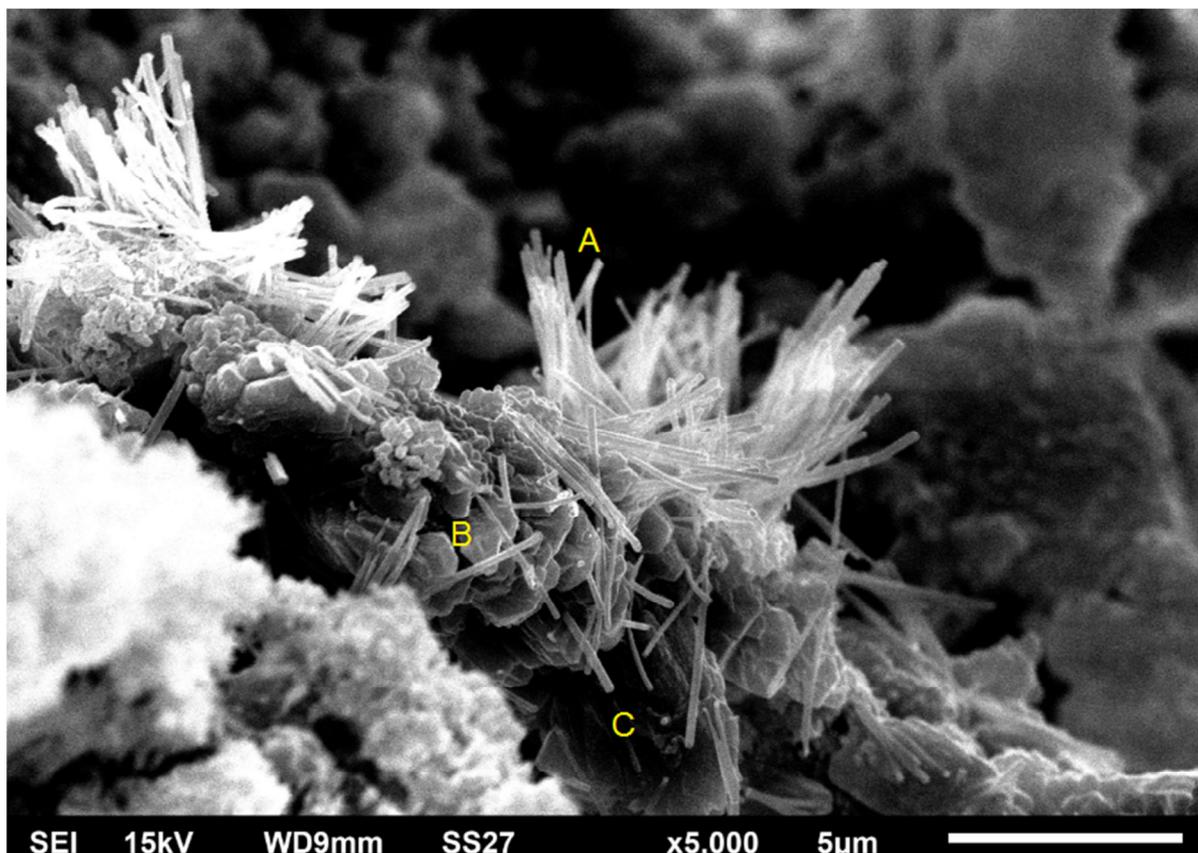


Figura 32 – Micrografia de uma amostra da argamassa com NTCPM: Identificação de constituintes.

Na Fig. 32, como indicado na literatura, é possível observar a formação de cristais aciculares, individuais ou aglomerados que representam diferentes elementos na hidratação do cimento. No aglomerado visualizado, com formato pontiagudo contata-se a formação da etringita (ponto A), de placas hexagonais de hidróxido de cálcio em torno (ponto B) e no formato cilíndrico a presença dos NTCPM (ponto C).

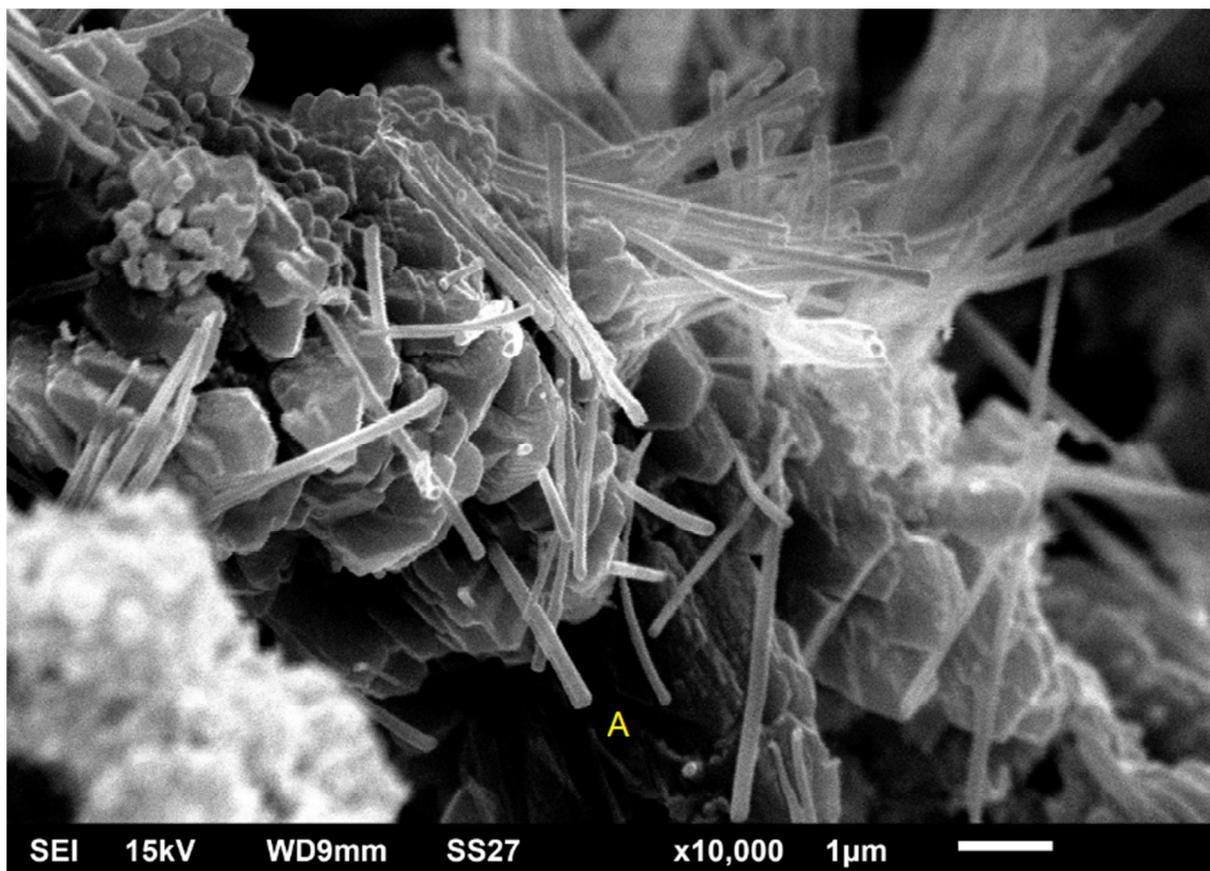


Figura 33 – Micrografia de uma amostra da argamassa com NTCPM: Identificação dos NTCPM.

Na Fig. 33, mais precisamente no ponto A, é possível observar a presença de vários filamentos de formato cilíndrico e seção transversal em formato de círculo apresentando-se flexionados (curvos) caracterizando a presença de NTCPM. Na imagem percebe-se, também, a formação de uma rede ou malha formada pelos NTCPM, fato que pode ter sido relevante quanto aos ganhos de resistência mecânica obtidos na argamassa com nanotubos.

## 6. CONCLUSÕES

Considerando os resultados obtidos no desenvolvimento do trabalho, pode-se inferir as seguintes conclusões:

- ✓ É possível obter argamassa de revestimento com nanotubos de carbono de paredes múltiplas funcionalizados em meio ácido.

- ✓ A presença dos NTCPM na argamassa é indicada pela cor escurecida adquirida pela mesma, conforme ilustrado na (Fig. 18b).

- ✓ Fatores como teor, fator de forma, funcionalização e dispersão eficaz dos NTCPM interferem nas propriedades físicas e mecânicas da argamassa de revestimento.

- ✓ Comparativamente, a argamassa aditivada com NTCPM apresentou propriedades físicas e mecânicas superiores as de uma argamassa industrializada utilizada como parâmetro.

- ✓ O melhor desempenho da argamassa com NTCPM pode ser atribuído as redes/malhas formadas na matriz cimentícia, conforme observado na Fig 33, que possibilitaram maior capacidade de absorção de cargas e redução na propagação de fissuras.

- ✓ Apesar de promissor, o uso de NTC como reforço de argamassas necessita de uma investigação mais profunda sobre a sua condição de aderência.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOSTINHO, C. S. A. **Estudo da evolução do desempenho no tempo de argamassas de cal aérea**. 2008. 89f. (Mestrado em Engenharia Civil). Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM. C780. **Standard Test Method for Preconstruction and Construction Evaluation of Mortars for Plain and Reinforced Unit Masonry**. Philadelphia, 2014. 14p.

ANDREWS, R.; JACQUES, D.; RAO, A. M.; DERBYSHIRE, F.; QIAN, D.; FAN, X.; DICKEY, E. C.; CHEN, J. Continuous production of aligned carbon nanotubes: a step closer to commercial realization. **Chemical Physics Letters**, v.303, n.5-6, p. 467-474, 1999.

ANTUNES, R.P.N. **Influência da reologia e da energia de impacto na resistência de aderência de revestimentos de argamassa**. 2005. 156f. Tese (Doutorado), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5732. **Cimento Portland comum**. Rio de Janeiro, 1991. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5733. **Cimento Portland de alta resistência inicial**. Rio de Janeiro, 1991. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5735. **Cimento Portland alto-forno**. Rio de Janeiro, 1991. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5736. **Cimento Portland pozolânico**. Rio de Janeiro, 1999. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5737. **Cimento Portland resistentes a sulfatos**. Rio de Janeiro, 1992. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7200. **Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Procedimento**. Rio de Janeiro, 1998. 13p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211. **Agregados para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro, 2009. 2p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215. **Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro, 1997. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222. **Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2011. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778. **Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro, 2009. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9831. **Cimento Portland destinado à cimentação de poços petrolíferos.** Rio de Janeiro, 2008. 36p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11578. **Cimento Portland Composto – Especificação.** Rio de Janeiro, 1997. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12989. **Cimento Portland branco - Especificação.** Rio de Janeiro, 1993. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13116. **Cimento Portland de baixo calor de hidratação - Especificação.** Rio de Janeiro, 1994. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13276. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência.** Rio de Janeiro 2005. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13277. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da retenção de água.** Rio de Janeiro, 2005. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13278. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.** Rio de Janeiro 2005. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13279. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.** Rio de Janeiro, 2005. 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13280. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido.** Rio de Janeiro, 2005. 2p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13281. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos.** Rio de Janeiro, 2005. 7p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13528. **Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Determinação da resistência de aderência à tração.** Rio de Janeiro, 2010. 11p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13529. **Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Terminologia.** Rio de Janeiro, 2013. 13p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13755. **Revestimento de paredes externas e fachadas com placas cerâmicas e com utilização de argamassa colante - Procedimento.** Rio de Janeiro, 1997. 11p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15261. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear).** Rio de Janeiro, 2005. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15900. **Água para amassamento do concreto – Parte 1 Requisitos.** Rio de Janeiro, 2009. 11p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248. **Agregados - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM ISO 3310-1. **Peneiras de ensaio – Requisitos técnicos e verificação.** Rio de Janeiro, 2010. 20p.

BATISTON, E. R. **Estudo exploratório dos efeitos de nanotubos de carbono em matriz de cimento.** 2007. 80f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

BAUER, L.A.F. **Materiais de construção.** 5. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos (LTC), 2005. 435 p.

BAUER, E.; SOUSA, J. G. G.; GUIMARÃES, E. A. Estudo da consistência de argamassas pelo método de penetração estática de cone. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, VI, 2005, Florianópolis. **Anais do...** Florianópolis: ANTAC, 2005. p. 95-105.

BAUER, R.J.F. Patologia em revestimentos de argamassa inorgânica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, II, 1997, Salvador. **Anais do...** Salvador: CETA / ANTAC, 1997. P 321 – 33.

BELIN, T., EPRN, F. Characterization Methods of Carbon Nanotubes: **A Review. Materials Science and Engineering B**, v. 119, p. 105-118, 2005.

CANDIA, M. C.; FRANCO, L. S. Contribuição ao estudo das técnicas de preparo da base no desempenho dos revestimentos de argamassas. São Paulo: EPUSP, **Boletim Técnico:** São Paulo, 1998. 13p.

CAPAZ, Rodrigo B.; CHACHAM, Hélio, Nanotubos e a nova era do carbono. **Ciência Hoje**, v. 33, n. 198, out. 2003. Disponível em: <<http://www.fisica.ufc.br/redenano/capaz.pdf>>. Acesso em: 20 abr. 2013>. Acesso em: 20 abr. 2013.

CARASEK, H. **Aderência de argamassas à base de cimento Portland a substratos porosos; avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo da ligação.** 1996. 285f. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica da USP, São Paulo.

CARASEK, H.; CASCUDO, O; SCARTEZINI, L. M. Importância dos materiais na aderência dos revestimentos de argamassa. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, IV, 2001, Brasília. **Anais do...** Brasília: PECC / ANTAC, 2001. p 43 - 67.

CARASEK, H. Argamassas. In: Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. ISAIA, G.C. (Organizador/Editor). São Paulo: **IBRACON**, 2007 p 863 – 804.

CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. Caracterização reológica de argamassas pelo método de squeeze-flow. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, VI, 2005, Florianópolis e INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MORTARS TECHNOLOGY, I, 2005, Florianópolis. **Anais do...** Florianópolis: ANTAC, 2005. p. 121-143.

CARNEIRO, A. M. P. **Contribuição ao estudo da influência do agregado nas propriedades de argamassas compostas a partir de curvas granulométricas.** 1999. 203f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

CARNEIRO, A. M. P.; CINCOTTO, M. A. **Dosagem de argamassas através de curvas granulométricas.** São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1999. Boletim Técnico n. 237.

CARVALHO JR., A. N. **Avaliação da aderência dos revestimentos argamassados: uma contribuição à identificação do sistema de aderência mecânico.** 2005. 331f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

CEOTTO, L. H; BANDUK, R. C; NAKAKURA, E. H. **Revestimento de argamassas: boas práticas em projeto, execução e avaliação.** Porto Alegre: ANTAC, 2005. 96p.

CHAIPANICH, A.; NOCHAIYA, T.; WONGKEO W.; TORKITTIKUL P. Compressive strength and microstructure of carbon nanotubes–fly ash cement composites. **Materials Science and Engineering: A**, v. 527, p. 1063–1067, 2010.

CHEW, M. Y. L.; PING, T. P. Staining of facadas. Singapura, 2003. apud UEMOTO, K. L.; SATO, N. M. N.; JOHN, V. M. Influência do sistema argamassa/pintura nos fenômenos de transporte de água em revestimentos de argamassas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, VIII, 2009, Curitiba: **Anais do...** Curitiba: ANTAC, 2009.

CINCOTTO, M.A., SILVA, M. A. C., CARASEK, H. **Argamassas de revestimento; Características, propriedades e métodos de ensaio** (Publicação IPT 2378). 1. ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1995. 118p.

CINCOTTO, M.A.C.; CARNEIRO, A.M.P. Estudo da influência da distribuição granulométrica nas propriedades de argamassas dosadas por curvas

granulométricas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 3., 1999, Vitória: **Anais do...** Vitória: UFES, 1999.

CINCOTTO, M. A., BOLORINO, H. A influência do tipo de cimento nas argamassas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, II, 1997, Salvador. **Anais do...** Salvador: CETA / ANTAC, 1997. p15 - 25.

CORTES, D. D.; KIM, H. K.; PALOMINO, A. M.; SANTAMARINA, J.C.. Rheological and mechanical properties of mortars prepared with manufactured sands. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n.10 p.1142 - 1147, out. 2008.

CRUZ, N. T. C. C. **Estudo da influência da granulometria das areias no desempenho de rebocos de ligante hidráulico**. 2008. 98f. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

COUTO, Giselle Giovanna do. **Nanopartículas de níquel: síntese, caracterização, propriedades e estudo de sua utilização como catalisadores na obtenção de nanotubos de carbono**. 2006. 127f. Dissertação (Mestrado em Química) – Departamento de Química, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

DAL MOLIN, Denise Carpena Coitinho. Técnicas experimentais para estudo da microestrutura. In: ISAIA, Geraldo C. (Ed.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: **IBRACON**, v. 1. cap. 14, p.403-436, 2007.

DRESSELHAUS, M.S.; DRESSELHAUS, G.; JORIO, A. Unusual properties and structure of carbon nanotubos. **Annual Review of Materials Research**, v. 34, p. 247- 278, 2004.

DURÁN, Nelson; MATTOSO, Luiz Henrique Capparelli; MORAIS, Paulo Cezar de. **Nanotecnologia – Introdução, preparação e caracterização de nanomateriais e exemplos de aplicação**. São Paulo: Artliber Editora, 2006. 208 p.

ESUMI, K.; ISHIGAMAI, M.; NAKAJIMA, A.; SAWADA, K.; HONDA, H.. Chemical treatment of carbono nanotubes, **Carbon**, v. 34, p 279, Dez. 1995.

FREITAS, Cleverson de. **Argamassas de revestimento com agregados miúdos de britagem da região metropolitana de Curitiba: propriedades no estado fresco e endurecido**. 2010 113f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

GLEIZE, P.J.P. **Relatório de estágio Pós-Doutoral para CAPES**, 2005.

GOMES, A. M.; NERO, J. M. G.; APPLETON, J. A. S. Novo método para a avaliação da trabalhabilidade e consistência das argamassas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, I., 1995, Goiânia. **Anais do...** Goiânia: ANTAC, 1995. p. 83-91.

GUIMARÃES, J. E. P. **A cal. Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil.** 2ª ed. São Paulo: Pini, 2002. 341p.

HANLON, E.B.; Manoharan R.; Koo, T.W.; K. E. Shafer, K. E.; Motz, J. T.; Dasari, R. R.; Feld, M. S. Prospects for in vivo Raman spectroscopy. **Physics in Medicine and Biology**, v.45, p. R1-R59, 2000.

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

JOHN, V. M. Repensando o papel da cal hidratada nas argamassas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, V., 2003, São Paulo. **Anais do ...** São Paulo: ANTAC, 2003. p. 47-63.

JORIO, A., DRESSELHAUS, G., DRESSELHAUS, M., **Carbon Nanotubes: Advanced Topics in the Synthesis, Structure, Properties and Applications.** 1 ed. New York: Springer-Verlag, Berlin 2008.

JOURNET, C.; BERNIER, P. **Production of carbon nanotubes.** **Applied Physics A**, v. 67, p.1-9, 1998.

KESTENBACH, Hans-Jürgen; BOTTA FILHO, Walter José. **Microscopia eletrônica: transmissão e varredura.** São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1994. 104 p.

KONSTA-GDOUTOS, M. S.; ZOI S. M.; SURENDRA, P. S. Highly dispersed carbon nanotube reinforced cement based materials. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 7, p. 1052-1059, 2010.

KOSHIO, R.; YUDASAKA, M.; Lijima, S. Uma maneira simples de reagir quimicamente nanotubos de carbono de parede simples com materiais orgânicos usando a ultrasonificação. **Nano Letters**, v. 1, n. 7, p. 361-363, 2001.

KIHARA, Y; CENTURIONE, S. L. O Cimento Portland. In: CONCRETO: Ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: **IBRACON**, 2005. p. 295-322.

LAND, F.R **Argamassas de assentamento e revestimento.** Escola Politécnica da USP/BNH-CEF. Relatório Final, julho. 1987.

LI, Geng Ying; WANG, Pei Ming; ZHAO, Xiaohua. 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: 20 mar. 2014.

LI, G.Y. ; WANG, P.M; ZHAO, X. Mechanical Behavior and microstructure of cement composites incorporating surface-treated multi-walled carbon nanotubes, **Carbon**, v. 43, p 1239-1245, dez. 2004.

MAKAR, J.; MARGESON, J.; LUH, J. Carbon nanotube / cement composites – early results and potential applications. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONSTRUCTION MATERIALS: PERFORMANCE, INNOVATIONS AND STRUCTURAL IMPLICATIONS, 3., 2005, Vancouver. **Anais do...** Vancouver: Com MAT, 2005. Disponível em: <<http://www.irc.nrc-cnrc.gc.ca/ircpubs>>. Acesso em: 19/03/2014.

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: 25 mar. 2014.

MANSUR, H. S. **Notas de Aula de Caracterização de Superfícies e Interfaces. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e Minas.** UFMG. Belo Horizonte, 2007.

MARSHALL, W.M.; SIMINA P.N.; JOSEPH G. S., Measurement of Functionalised Carbon Nanotube Carboxylic Acid Groups Using a Simple Chemical Process. **Carbon**, v. 44, p 1137-1141, 2006.

MATTOS, L. R.S. **Identificação e caracterização das argamassas para revestimento externo utilizadas na cidade de Belém-PA.** 2001.162f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MELO, V. S. **Nanotecnologia aplicada ao concreto: efeito da mistura física de nanotubos de carbono em matrizes de cimento Portland.** 2009. 146f. Dissertação (Mestrado em Engenharia, área de concentração materiais de Construção civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

MELO, V. S.; CALIXTO, J. M. F.; LADEIRA, L. O. Desempenho de argamassas de cimento Portland contendo nanotubos de carbono e aditivo de melamina. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 52, 2010, Fortaleza. **Anais do...** Fortaleza: IBRACON, 2010.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** 1 ed. São Paulo: Pini, 1994. 573p.

MEHTA, P. K. ; MONTEIRO, P.J.M. **Aglomerantes Hidráulicos em Concreto Estruturas, Propriedades e Materiais.** Editora Pini, São Paulo,1994. p. 187-238.

MEHTA, P.K., MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais. 3 ed.** São Paulo: Pini, 2008, 581p.

MOISALA, Anna; NASIBULIN, Albert G.; KAUPPINEN, Esko I.. **Journal Physics: Condensed Matter**, 10 out. 2003. The Role of metal nanoparticles in the catalytic production of single-walled carbon nanotubes.

NAKAKURA, E. H. **Análise e classificação das argamassas industrializadas segundo a NBR 13281 e a MERUC.** 2003. 198f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

OSORIO, A. G. **Funcionalização de nanotubos de carbono e sua utilização como reforço em matriz de hidroxiapatita.** 2008. 74f. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

PADILHA, Ângelo Fernando e AMBROZIO FILHO, Francisco. **Técnicas de Análise Microestrutural.** São Paulo: Hemus Livraria, Distribuidora e Editora, 2004. 190 p.

RODRIGUES, M. P. S. F. F. **Revestimentos de impermeabilização de paredes à base de ligantes minerais.** Lisboa: 1993. 278f. Mestrado (Mestrado em Construção) - Universidade Técnica de Lisboa – Instituto Superior Técnico (IST), Lisboa.

SALA, O. **Fundamentos da Espectroscopia Raman no Infravermelho.** São Paulo: Ed UNESP, 1996. p 13-15.

SHAFFER, M. S. P.; FAN, X.; WINDLE, A. H. Dispersion and packing of carbon nanotubes. **Carbon**, v. 36, nº 11, pp. 1603–1612, 1998.

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

SENTONE, D.T.; ROMANO, R.C.O.; PILEGGI, R.G.; JOHN, V. M. Caracterização reológica de argamassas mistas aditivadas com incorporador de ar. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, VIII, 2009, Curitiba. **Anais do...** Curitiba: ANTAC, 2009.

SOBOLEV, K.; FLORES, I.; HERMOSILLO, R.; TORRES-MARTÍNEZ, L. M. Nanomaterials and nanotechnology for high-performance cement composites. In: SOBOLEV, K. ; SHAH, S. P. (Ed.). Nanotechnology of concrete: recent developments and future perspectives. United States of America: **American Concrete Institute**, SP-254, p. 93-120, 2008.

SILVA, N. G. **Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária.** 2006. 164f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2006.

SILVA, Eveline Junqueira. **Espectroscopia Raman e Histopatologia clássica na avaliação de tendinite induzida por collagenase em ratos wistar.** 2005. 98f. Dissertação (Mestrado em Promoção de Saúde), Universidade de Franca, Franca.

SILVEIRA, João Borges. **Preparação e Caracterização de Resinas Epóxi Transparente Dopada com Nanoestruturas Semicondutoras.** 2009. 115f. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais) - Universidade Estadual Paulista, Ilha solteira-São Paulo, 2009.

STOBINSKI, L.; LESIAK, B.; KOVER, L.; TOTH, J.; BINIAK, S.; TRYKOWSKI, G.; JUDEK, J.. Multiwall carbon nanotubes purification and oxidation by nitric acid studied by the FTIR and electron spectroscopy methods, **Journal of Alloys and Compounds**, v. 501, n1, pp. 77– 84. 2010.

TRISTÃO, F. A. **Influência da composição granulométrica da areia nas propriedades das argamassas de revestimento**. 219f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1995.

TRISTÃO, F.A. **Influência dos parâmetros texturais das areias nas propriedades das argamassas mistas de revestimento**. 2005, 234f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

TWARDOWSKI, J.; ANZENBACKER, P. **Raman em IR Spectroscopy in Biology and Biochemistry**. New York; Ellis Horwood, 1994.

UEMOTO, K., L.; SATO, N., M., N.; JOHN, V., M. Influência do sistema argamassa/pintura nos fenômenos de transporte de água em revestimentos de argamassas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, VIII, 2009, Curitiba. **Anais do...** Curitiba: ANTAC, 2009.

WANSOM, S.; KIDNER., N.J.; WOO, L.Y.; MASON, T.O. Impedance response of multi-walled carbon nanotube/cement composites. **Cement Concrete Composites**, v. 28, n.6, p. 509–519, 2006.

VAISMAN L.; WAGNER H. D.; MAROM G. **The role of Surfactants in dispersion of carbon nanotubes** **Advances in Colloid Interface Science**, 128-130, 2006.

YAKOBSON, B. I.; SMALLEY, R. E. Fullerene Nanotubes: C<sub>1.000.000</sub> and Beyond. **Am. Scient.**, v. 85, n.4, p. 324-337, 1997.

YAKOVLEV, Grigorij; KERIENÉ, Jadvyga; GAILIUS, Albinas; GIRNIENÉ Ingrida. **Cement based foam concrete reinforced by carbon nanotubes**. **Materials Science**, v.12, n2, p. 147-151, 2006. Disponível em: <<http://www.Ktu.it/it/mokslas/zurnalai/medz/medz0-85/12%20Ceramics>> Acesso em: 12 fev. 2014.

YOSHIDA, A. T.; BARROS, M. M. S. B. Caracterização de argamassas no estado fresco: peculiaridade na análise de argamassas industrializadas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, I, 1995, Goiânia. **Anais do...** Goiânia: ANTAC, 1995. p. 53-62.

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

## **APÊNDICES**

Apêndice 1 – Determinação da massa específica do cimento Portland, por meio do frasco volumétrico de Lê Chatelier e massa unitária de acordo com NBR NM 45 (ABNT, 2006).

Massa específica do cimento CPV-ARI			
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Massa (g)	60,00	60,00	60,00
Leitura Inicial (cm <sup>3</sup> )	00,00	00,00	00,00
Leitura final (cm <sup>3</sup> )	19,55	19,45	19,70
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,06	3,08	3,04
Média	3,06		
Desvio Padrão	0,02		

Massa unitária do cimento CPV-ARI			
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Massa do cimento (Kg)	3,120	3,190	3,230
Volume do recipiente (dm <sup>3</sup> )	2,780	2,780	2,780
Massa unitária (Kg/dm <sup>3</sup> )	1,13	1,15	1,16
Média	1,15		
Desvio Padrão	0,02		

Apêndice 2 – Determinação da massa específica da argamassa votomassa assentamento e revestimento, por meio do frasco volumétrico de Lê Chatelier.

Massa específica da votomassa (lê Chatelier)			
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Massa (g)	60,00	60,00	60,00
Leitura Inicial (cm <sup>3</sup> )	00,00	00,00	00,00
Leitura final (cm <sup>3</sup> )	21,70	22,00	21,50
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,76	2,72	2,79
Média	2,76		
Desvio Padrão	0,03		

Apêndice 3 – Determinação da massa específica da areia, por meio do frasco volumétrico de Chapmann e massa unitária de acordo com NBR NM 45 (ABNT, 2006).

Massa específica da areia			
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Massa (g)	500,00	500,00	500,00
Leitura Inicial (cm <sup>3</sup> )	200,00	200,00	200,00
Leitura final (cm <sup>3</sup> )	390,00	395,00	393,00
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,63	2,56	2,59
Média	2,60		
Desvio Padrão	0,03		

Massa unitária da areia			
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Massa da areia (Kg)	19,80	19,55	19,65
Volume do recipiente (dm <sup>3</sup> )	14,00	14,00	14,00
Massa unitária (Kg/dm <sup>3</sup> )	1,41	1,39	1,40
Média	1,40		
Desvio Padrão	0,01		

Apêndice 4 – Determinação da composição granulométrica do agregado miúdo através da NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Peneiras (mm)	Retida acumulada média	Determinação 1			Determinação 2		
		Massa retida (g)	Retida individual %	Retida acumulada %	Massa retida (g)	Retida individual %	Retida acumulada %
4,8	2,23	27,70	2,07	2,07	23,87	2,39	2,39
2,4	12,00	99,85	9,99	12,06	95,45	9,55	11,93
1,2	30,20	179,10	17,91	29,97	185,00	18,50	30,43
0,6	49,16	189,15	18,92	48,88	190,00	19,00	49,43
0,3	82,04	329,95	33,00	81,88	327,55	32,76	82,19
0,15	95,50	134,80	13,48	95,36	134,57	13,46	95,64
Fundo	100,00	46,45	4,65	100,00	43,56	4,36	100,00
Total		1000,00	100,00	270,20	1000,00	100,00	272,01
Módulo de Finura	2,71	2,70			2,72		

Apêndice 5 – Determinação da densidade da massa no estado fresco de acordo com a NBR 13278 (ABNT, 2005).

Densidade das argamassas (Recipiente de PVC)

	AI 01	AI 02	AI 03	ANTCPM 01	ANTCPM 02	ANTCPNM 03
Massa argamassa + Cápsula PVC (g)	890,50	879,15	883,63	920,13	931,81	936,14
Massa recipiente vazio (g)	110,25	110,25	110,25	110,25	110,25	110,25
Volume recipiente (cm <sup>3</sup> )	460	460	460	460	460	460
Densidade da massa (g/cm <sup>3</sup> )	1,69	1,67	1,68	1,76	1,78	1,79
Média	1,68			1,78		
Desvio Padrão	0,010			0,015		

Apêndice 6 – Determinação do teor de ar existente, no estado fresco, de acordo com a NBR 13278 (ABNT, 2005).

Teor de ar incorporado

	AI 01	AI 02	AI 03	ANTCPM 01	ANTCPM 02	ANTCPM 03
Teor de ar (%)	14	16	15	06	08	6,5
Média	15			7		
Desvio Padrão	1			1,04		

Apêndice 7 – Determinação do Índice de consistência das argamassas, no estado fresco, de acordo com a NBR 13276 (ABNT, 2002).

Índice de consistência

	AI 01	AI 02	AI 03	ANTCPMI 01	ANTCPM 02	ANTCPM 03
Diâmetro <sub>1</sub> (mm)	223	226	221	239	240	245
Diâmetro <sub>2</sub> (mm)	225	224	223	238	236	241
Diâmetro <sub>3</sub> (mm)	227	228	226	240	243	242
Í.Consistência (mm)	225	226	223	239	240	243
Média	225			241		
Desvio Padrão	1,53			2,08		

Apêndice 8 – Determinação da densidade das massas, no estado endurecido, de acordo, com a NBR 13280 (ABNT, 2005).

Densidade das massas						
	AI 01	AI 02	AI 03	ANTCPM 01	ANTCPM 02	ANTCPM 03
Altura (cm)	4,25	4,20	4,12	4,23	4,31	4,30
Largura (cm)	4,12	4,11	4,08	4,09	4,12	4,10
Comp. (cm)	16,14	16,10	16,07	16,07	16,08	16,06
Volume (cm <sup>3</sup> )	282,61	277,91	270,13	278,02	285,53	283,13
Massa (g)	457,83	447,44	432,20	478,19	499,68	489,82
Densidade g/cm <sup>3</sup> )	1,62	1,61	1,60	1,72	1,75	1,73
Média	1,61			1,73		
Desvio Padrão	0,010			0,015		

Apêndice 9 – Determinação da absorção das argamassas, no estado endurecido, de acordo, com a NBR 9778 (ABNT 1987).

Absorção das argamassas					
Amostras	Massa seca (g)	Massa Úmida (g)	Absorção (%)	Média	Desvio Padrão
1 - AI	457,83	519,86	13,55	13,35	0,20
2 - AI	447,44	507,75	13,48		
3 - AI	432,20	488,90	13,12		
4 - AI	439,15	497,34	13,25		
1 - ANTCPM	478,19	553,17	15,68	15,46	0,22
2 - ANTCPM	499,68	577,48	15,57		
3 - ANTCPM	489,82	565,35	15,42		
4 - ANTCPM	485,53	559,27	15,18		

Apêndice 10 – Determinação da resistência à compressão, aos 28 dias de idade, de acordo com a NBR 13279.

Votomassa (AI)					
	AI 01	AI 02	AI 03	AI 04	AI 05
Carga máxima aplicada (KN)	8,1	8,2	8,4	8,3	8,5
Resistência à Compressão (MPa)	4,074	4,176	4,278	4,227	4,390
Média / Desvio Padrão	4,23 / 0,11				

Argamassa proposta (ANTCPM)					
	ANTCPM 01	ANTCPM 02	ANTCPM 03	ANTCPM 04	ANTCPM 05
Carga max. aplicada (KN)	9,4	9,8	9,5	9,2	9,7
R. Compressão (MPa)	4,787	4,991	4,838	4,685	4,940
Média / Desvio Padrão	4,848 / 0,12				

Apêndice 11 – Determinação da resistência à tração na flexão, aos 28 dias de idade, de acordo com a NBR 13279 (ABNT, 2005).

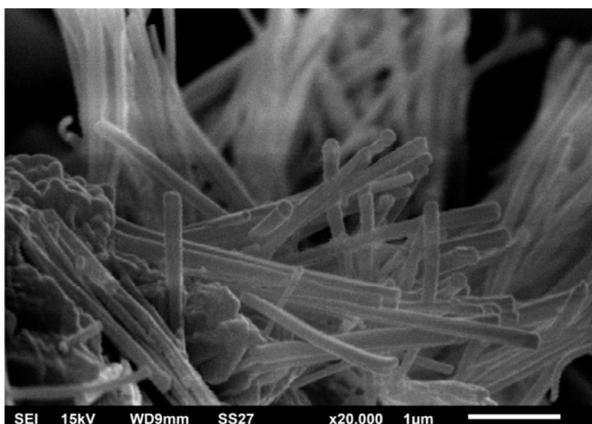
Votomassa (AI)					
	AI 01	AI 02	AI 03	AI 04	AI 05
Carga máxima aplicada (KN)	1,54	1,34	1,69	1,32	1,34
Distância entre apoios (mm)	100	100	100	100	100
R. à Tração na flexão (MPa)	3,61	3,14	3,98	3,09	3,13
Média / Desvio Padrão	3,39 / 0,39				

Argamassa (ANTCPM)					
	ANTCPM 01	ANTCPM 02	ANTCPM 03	ANTCPM 04	ANTCPM 05
Carga. máxima aplicada (KN)	1,65	1,69	1,71	1,43	1,58
Distância entre apoios (mm)	100	100	100	100	100
Resistência. à Tração na flexão (MPa)	3,87	3,97	4,00	3,35	3,72
Média / Des. Padrão	3,78 / 0,26				

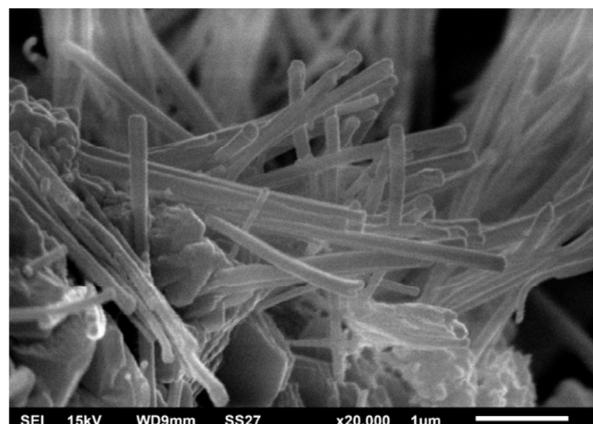
Apêndice 12 – Determinação da razão  $I_D / I_G$  de amostras de NTC funcionalizados e não funcionalizados.

Amostra	Funcionalizados $I_D/I_G$	$I_D/I_G$ média	N. funcionalizados $I_D/I_G$	$I_D/I_G$ média
1	1,29	1,32	1,12	1,18
2	1,35		1,17	
3	1,32		1,24	

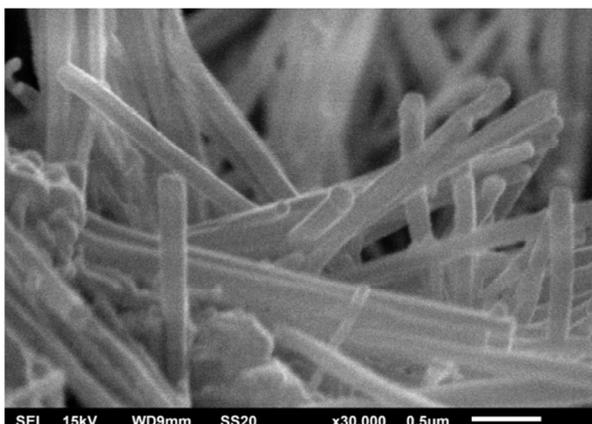
## Apêndice 13 – Microscopias das argamassas com NTCPM.



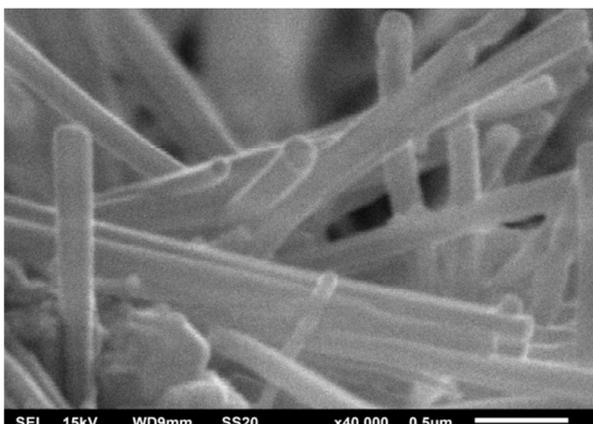
Microscopia 01 Argamassa ANTCPM



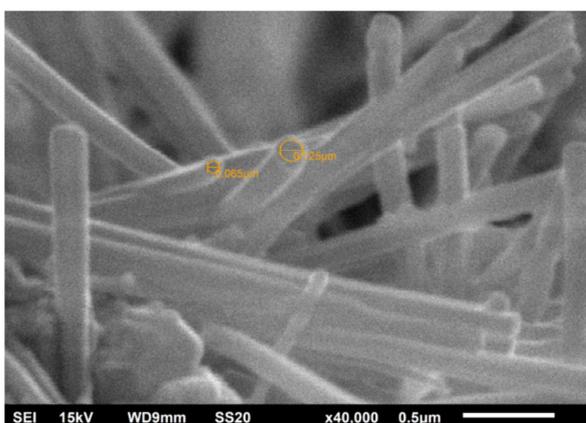
Microscopia 02 Argamassa ANTCPM



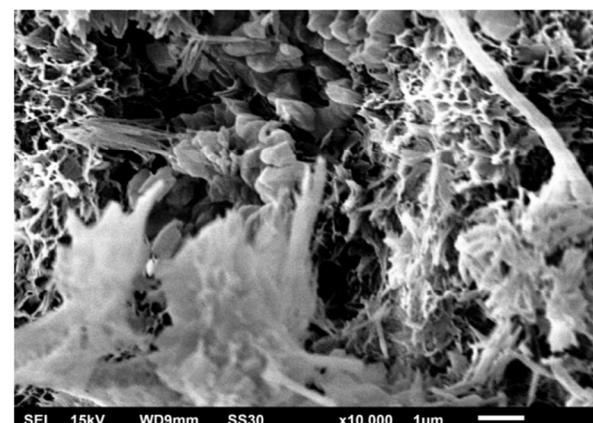
Microscopia 03 Argamassa ANTCPM



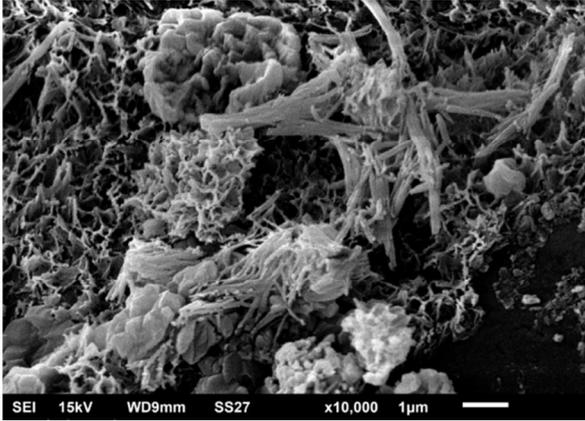
Microscopia 04 Argamassa ANTCPM



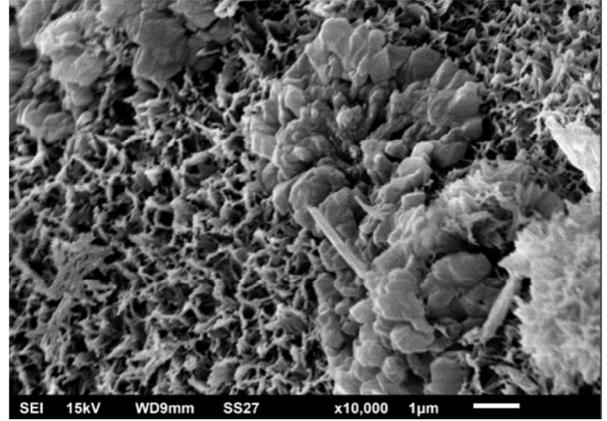
Microscopia 05 Argamassa ANTCPM



Microscopia 06 Argamassa ANTCPM



Microscopia 07 Argamassa ANTCPM



Microscopia 08 Argamassa ANTCPM

## **ANEXOS**

## Anexo A – Ficha técnica da argamassa industrializada.

**votomassa** ficha técnica do produto

**assentamento  
e revestimento**
**Equipamentos:**

- ◄ Colher de pedreiro;
- ◄ Prumo;
- ◄ Desempenadeira de madeira e desempenadeira plástica;
- ◄ Bissnaga ou palheta;
- ◄ Régua técnica 2m;
- ◄ Escova de aço;
- ◄ Misturador de argamassa de eixo horizontal;
- ◄ Masselra;

**10**
**DESEMPENHO:**

Dados obtidos de acordo com a NBR 13281/2005.

NBR 13281/2005	TESTE	MÉTODO DO TESTE	ESPECIFICAÇÃO		RESULTADOS	
	Resistência à compressão (MPa)	NBR 13279/2005	P1 P2 P3 P4 P5 P6	< 2,0 1,5 a 3,0 2,5 a 4,5 4,0 a 6,5 5,5 a 9,0 + 8,0	Aratu Limora Cajamar Cipasa Estrela Itaú de Minas Pacom Sorocinho Rio Branco do Sul	P5 P5 P4 P5 P5 P5 P4 P5 P5
Densidade de massa aparente no estado endurecido (kg/m <sup>3</sup> )	NBR 13280/2005	M1 M2 M3 M4 M5 M6	< 1200 1000 a 1400 1200 a 1600 1400 a 1800 1600 a 2000 + 2000	Aratu Limora Cajamar Cipasa Estrela Itaú de Minas Pacom Sorocinho Rio Branco do Sul	M4 M4 M4 M4 M4 M4 M4 M4 M4	



7

**Votorantim**  
Cimentos

NBR 1328V/2005	TESTE	MÉTODO DO TESTE	ESPECIFICAÇÃO	RESULTADOS	
	Resistência à tração na flexão (MPa)	NBR 13279/2005	R1	< 1,5	Aratu R3
			R2	1,0 a 2,0	Limeira R3
			R3	1,5 a 2,7	Cajamar R3
			R4	2,0 a 3,5	Cipasa R3
R5			2,7 a 4,5	Estrela R3	
R6			≥ 3,5	Itaú do Minas R4	
Coeficiente de capilaridade (g/dm <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> )	NBR 15259/2005	C1	< 1,5	Pocem R3	
		C2	1,0 a 2,5	Sorocimino R3	
		C3	2,0 a 4,0	Rio Branco do Sul R4	
		C4	3,0 a 7,0	Aratu C4	
		C5	5,0 a 12,0	Limeira C4	
		C6	≥ 10,0	Cajamar C5	
Densidade de massa no estado fresco (kg/m <sup>3</sup> )	NBR 13278/2005	D1	< 1400	Cipasa C4	
		D2	1200 a 1600	Estrela C4	
		D3	1400 a 1800	Itaú do Minas C4	
		D4	1600 a 2000	Pocem C4	
		D5	1800 a 2200	Sorocimino C4	
		D6	≥ 2000	Rio Branco do Sul C4	
Retenção de água (%)	NBR 13277/2005	U1	< 78	Aratu D4	
		U2	72 a 85	Limeira D4	
		U3	80 a 90	Cajamar D4	
		U4	86 a 94	Cipasa D4	
		U5	91 a 97	Estrela D4	
		U6	95 a 100	Itaú do Minas D4	
				Pocem U2	
				Sorocimino U2	
				Rio Branco do Sul U2	



NBR 1328Y/2005	TESTE	MÉTODO DO TESTE	ESPECIFICAÇÃO		RESULTADOS	
	Resistência potencial de aderência à tração (MPa)	NBR 15258/2005	A1 A2 A3	< 0,20 > 0,20 > 0,30	Aratu	A3
					Limaira	A3
					Cajamar	A3
Cipasa					A3	
Estolo	A3					
Itaú de Minas	A3					
Pocom	A3					
Socoráino	A3					
Rio Branco do Sul	A3					
Preparo da Mistura*)	NBR 13276/2005	1 2	Mistura sem tempo adicional Mistura com tempo adicional de 15 segundos	Aratu	2	
				Limaira	1	
				Cajamar	2	
				Cipasa	1	
Estolo	2					
Itaú de Minas	1					
Pocom	2					
Socoráino	2					
Rio Branco do Sul	2					
Resistência de aderência à tração (MPa)	NBR 13528/2010 NBR 13749/1996	> 0,2 > 0,3	Revestimento sem chapisco Revestimento com chapisco	Aratu	> 0,3	
				Limaira	> 0,3	
				Cajamar	> 0,3	
				Cipasa	> 0,3	
Estolo	> 0,3					
Itaú de Minas	> 0,3					
Pocom	> 0,3					
Socoráino	> 0,3					
Rio Branco do Sul	> 0,3					

**Observação:** a) Preparo de mistura: Mistura sem tempo adicional (30 segundos). Mistura com tempo adicional (30 segundo + 15 segundos).

